НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
Институт энергетики

ИНСТИТУТ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ ИМ. Л.А. МЕЛЕНТЬЕВА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

НАЦИОНАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ
ПРИ МИНИСТЕРСТВЕ ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ИНЖЕНЕРНАЯ АКАДЕМИЯ АРМЕНИИ

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ: состояние и перспективы

Сборник докладов II Международной научной конференции
(Минск, 3–6 октября 2022 г.)

Под редакцией
доктора экономических наук Т. Г. Зориной

Минск
«Беларуская навука»
2023

УДК 620.9(476)(082)
ББК 31.19(4Беи)я43
У81

У81 **Устойчивое** развитие энергетики Республики Беларусь: состояние и перспективы : сб. докл. II Междунар. науч. конф. (Минск, 3–6 окт. 2022 г.) / под ред. Т. Г. Зориной. – Минск : Беларус. навука, 2023. – 461 с.
ISBN 978-985-08-2994-8.

В сборнике представлены материалы, освещающие состояние устойчивого развития энергетики в Республике Беларусь и за рубежом, а также вопросы реализации научного, технического, производственного и кадрового потенциала, сосредоточенного в академических и отраслевых институтах, высших учебных заведениях и в реальном секторе, для реализации конкретных направлений устойчивого развития энергетики.

Издание предназначено для научных работников, специалистов, аспирантов и студентов в области энергетики.

УДК 620.9(476)(082)
ББК 31.19(4Беи)я43

ISBN 978-985-08-2994-8

© Институт энергетики НАН Беларуси, 2023
© Оформление. РУП «Издательский дом «Беларуская навука», 2023

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для сохранения устойчивого развития земной цивилизации необходимо в масштабах всей Земли осознать необходимость решения проблемы расслоения жителей планеты по уровню доступа к жизнеобеспечивающим ресурсам с уменьшением уровня потребления для отдельных групп граждан. Концепция устойчивого развития объединяет три сферы: социальную, экономическую и экологическую.

Изменившаяся социально-экономическая ситуация в мире привела к кризисным процессам практически во всех сферах жизнедеятельности общества. Однако путь, по которому идет мировая экономика, основанная в основном на ископаемых углеводородах, может привести к разрушению природной среды, дегуманизации общества, углублению социального расслоения населения Земли. Необходимо осуществить переход энергетики на эффективный путь развития, позволяющий удовлетворить энергетические и жизненные потребности нынешнего и будущего поколений, сохранить окружающую среду и благоприятное состояние ресурсно-природного потенциала, устойчивость которого определяется состоянием природной среды, способностью экономно использовать все ресурсы, современными экологически чистыми производственными технологиями, развитой инфраструктурой и качеством жизни населения.

Энергетика является одной из движущих сил экономического развития и выполнения Повестки дня для устойчивого развития на период до 2030 года и играет огромную роль в предотвращении изменения климата. Признание той роли, которую энергетика играет в современном обществе, имеет огромное значение, однако наблюдается серьезная нестыковка между согласованными энергетическими и климатическими целевыми показателями и подходами, которые применяются для их достижения.

В настоящее время примерно 80 % всей энергии производится из разных видов ископаемого топлива. Многие страны используют ископаемые источники энергии, и уголь, нефть и газ по-прежнему играют важнейшую роль в обеспечении их энергетической безопасности и экономического благополучия. Вместе с тем было бы несправедливо игнорировать то воздействие, которое изменение климата оказывает на население планеты.

Поэтому разработка и поиск методов и технических средств экономии энергии и использования возобновляемых, экологически чистых ее источников стала насущной задачей выживания человечества до конца нового столетия.

В мире все больше внимания уделяется вопросам, касающимся глобального изменения климата, вызванного главным образом выбросами углекислого газа (CO_2), связанными с энергетикой. В целях эффективного сокращения эмиссии CO_2 при сохранении экономического роста различные страны начали искать новые пути развития, среди которых устойчивое энергетическое развитие стало широко пропагандируемым направлением.

Все большее число стран стремятся перейти на путь низкоуглеродного развития для достижения «зеленого» роста, снижения своей зависимости от ископаемых видов топлива и содействия глобальным усилиям по смягчению последствий изменения климата.

Существуют такие ключевые пути содействия устойчивому развитию энергетики, как стимулирование инноваций, выработка и передача экологически чистой энергии; направление инвестиций и финансирования на низкоуглеродные проекты; укрепление человеческого капитала, ресурсов и институционального потенциала, которые, в свою очередь, будут способствовать поддержке роста «зеленой» энергетики и достижению целей устойчивого развития.

При нынешней геополитической ситуации, наблюдающейся в мире, на первое место выступают вопросы энергетической независимости как в глобальном, так и в региональном аспектах, которые также нацеливают государства и правительства стран на применение новых инструментов стимулирования использования возобновляемых источников энергии.

Инициатива «Устойчивая энергетика для всех» адресована всем секторам общества: бизнесу, правительствам, инвесторам, населению и академическим кругам и направлена на достижение к 2030 г. трех основных целей:

обеспечение повсеместного доступа к современным энергетическим услугам;

снижение мирового потребления электроэнергии на 40 %;

увеличение доли ВИЭ (возобновляемых источников энергии) в мире до 30 %.

Понятие устойчивого развития основывается на конструктивных определениях прав и обязанностей по отношению к природным ресурсам, а также справедливом их распределении. Лишь это ведет к обеспечению ныне живущих и будущих поколений нормированным количеством жизненно важных ресурсов при условии сохранения среды обитания человека. На этом должна основываться любая программа развития.

В свете вышеназванных процессов, связанных с глобализацией энергетики и объединением энергетических рынков, исследование вопросов разработки долгосрочных и краткосрочных прогнозов развития и функционирования энергосистем становится все более актуальным.

С целью разработки предложений по повышению устойчивого развития энергетики Республики Беларусь и совместному использованию межрегиональных знаний и положительного практического опыта в этом направлении 3–6 октября 2022 г. в Минске состоялась Международная научная конференция «Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь: состояние и перспективы», доклады на которой представлены в настоящем сборнике. Проведение конфе-

ренции преследовало следующие цели: демонстрация новейших достижений науки и техники в области устойчивого развития энергетики; обмен опытом по применению передовых практических методов реализации стратегии устойчивого развития энергетики; международное научное сотрудничество в области устойчивого развития энергетики.

В рамках конференции обсуждались следующие направления: методологические проблемы оценки устойчивости энергетических систем; состояние и перспективы развития возобновляемой энергетики в глобальном и региональном масштабах; современные проблемы и перспективы развития энергетической системы Республики Беларусь; возобновляемая и ядерная энергетика как факторы повышения устойчивости развития энергетики Республики Беларусь; технологические, экономические, экологические и социальные аспекты устойчивого развития энергетики Республики Беларусь; функционирование и развитие энергетических систем; экологические вопросы энергетики; международное сотрудничество в области энергетики; энергетическая безопасность; зарубежный опыт в области устойчивого энергетического развития; информационные технологии и математическое моделирование в энергетике. В рамках конференции совместно с кафедрой ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые источники энергии» Белорусского национального технического университета был проведен Международный семинар экспертов по экологическим вопросам энергетики «Декарбонизация энергетического сектора. Роль кафедр ЮНЕСКО в обмене научными знаниями».

Академик, заслуженный энергетик Республики Беларусь
А. А. Михалевич

Доктор экономических наук, профессор
Т. Г. Зорина

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 621.316

И. Г. Ахметова[1], Ю. С. Валеева[2]

ТЕХНОЛОГИЗАЦИЯ ОТРАСЛЕЙ ЭНЕРГЕТИКИ, ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГО-, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

[1]Доктор экономических наук, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Российская Федерация
[2]Кандидат экономических наук, доцент, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Российская Федерация

Аннотация. В современных условиях научно-технологическое развитие энергетической отрасли является актуальным направлением для реализации новых проектов и проведения исследований. Татарстан – ведущий регион России в области реализации энергетической политики, поэтому обладает большим потенциалом развития данной отрасли. В теоретическом блоке статьи обозначены основные направления научно-технического развития. В практическом блоке представлены вектор и аспекты развития энергетической отрасли до 2030 г. применительно к Республике Татарстан. Выделены основные ключевые вызовы и цели устойчивого развития в корреляции с предложенными направлениями развития энергетической отрасли.

Ключевые слова: энергетическая отрасль, развитие, научно-технологический, вызовы, перспективы.

I. G. Akhmetova[1], Yu. S. Valeeva[2]

TECHNOLOGIZATION OF ENERGY INDUSTRIES, INCREASING ENERGY AND RESOURCE EFFICIENCY AND ENERGY SAVING ON THE EXAMPLE OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN

[1]Doctor of Economic Sciences, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation
[2]Ph. D. in Economics, Associate Professor, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

Annotation. In modern conditions, the scientific and technological development of the energy industry is an important direction for the development of new projects and research. Tatarstan is the leading region of Russia in the implementation of energy policy, therefore, it has a great potential for the development of this industry. The theoretical block of the article outlines the main directions of scientific and technological development. The practical block presents the vector and aspects

of the development of the energy industry until 2030 in relation to the Republic of Tatarstan. The main key challenges and goals of sustainable development are identified in correlation with the proposed directions for the development of the energy industry.
Keywords: energy industry, development, scientific and technological, challenges, prospects.

Введение. Трансформируются институциональные механизмы, включая обеспечение благоприятной среды для предпринимательства, защиты и коммерциализации прав интеллектуальной собственности. Окна возможностей для Республики Татарстан связаны с использованием человеческого капитала и научных достижений для вовлечения региональных компаний в наукоемкие звенья цепочек стоимости, модернизации мощностей, оптимизации процессов производства, закрепления на новых рынках, включая нишевые высокотехнологичные; созданием условий для локализации передовых технологий и управленческих компетенций; сокращением трансакционных издержек в результате адаптации к меняющимся формам экономических отношений.

Окнами возможностей для Республики Татарстан могут быть направления НИОКР в области создания, конвергенции, проникновения во все сферы жизнедеятельности искусственного интеллекта, робототехники, биотехнологий; новых источников энергии, способов ее хранения и передачи.

Перед энергетикой России, согласно Энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 года, стоит важная цель – максимальное содействие социально-экономическому развитию страны. Для того, чтобы в условиях изменений как мировой экономики, так и экономики Российской Федерации достичь поставленной цели, необходим безотлагательный переход к другому типу энергетики, которая была бы способна отвечать на вызовы и решать накопившиеся проблемы. Характеристики указанного перехода включают: структурную диверсификацию; цифровую трансформацию и интеллектуализацию отраслей топливно-энергетического комплекса (ТЭК); уменьшение негативного воздействия отраслей ТЭК на окружающую среду.

Материалы и методы исследования. Большое значение для энергетики имеет Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации как инструмент стратегического планирования в сфере обеспечения национальной безопасности Российской Федерации. В ней с учетом произошедших изменений в международной обстановке и внутренней политике, нормативном правовом обеспечении в сфере стратегического планирования в Российской Федерации актуализированы вызовы, угрозы и риски энергетической безопасности, определены цель, направления и задачи государственной деятельности по ее обеспечению.

«Энергетика и окружающая среда» отражает компромиссы между удовлетворением растущего спроса на энергоснабжение, обеспечением здоровой окружающей среды и чистого воздуха и защитой человечества от изменения климата. Выбросы из энергетического сектора составляют 60 % от общего объема выбросов парниковых газов, таким образом, в этом секторе необходимо при-

нять меры по уменьшению углеродного следа во всей цепочке энергоснабжения и по поддержке усилий в области смягчения последствий изменения климата.

Региону необходимо использовать потенциал устойчивой энергетики в рамках экономики замкнутого цикла. Одной из стратегических задач станет обеспечение доступности сырья, необходимого для внедрения этого подхода. На первом плане национальных стратегий должна быть практика устойчивого управления ресурсами, основанная на принципах экономики замкнутого цикла и включающая весь спектр целей и задач повестки дня на период до 2030 года.

Результаты и их обсуждение. Переход к устойчивой энергетической системе – это долгосрочная задача, для решения которой должны быть охвачены все основные компоненты устойчивого развития с целью сохранения социальной сплоченности. Потенциал направлений развития энергосектора РТ до 2030 года обусловлен стремлением внести свои решения в наиболее перспективные и значимые для развития энергетического комплекса направлениях.

1. *Альтернативная энергетика. Энергетический переход.*

Структурная диверсификация в первую очередь предполагает снижение доли углеродной энергетики и увеличение сектора централизованного энергоснабжения на децентрализованное. Экологические проблемы, создаваемые традиционным транспортом, стимулируют правительство Российской Федерации запускать «зеленую» транспортную политику, которая реализуется в Стратегии пространственного развития Российской Федерации.

Окна возможностей для Татарстана заключаются в потенциальном снижении негативного воздействия жизнедеятельности общества на окружающую среду и климат; развитии возобновляемой энергетики и экономики замкнутого цикла, расширении и интенсификации развития рекреационных территорий; повышении качества жизни населения в связи с ожидаемым внедрением более жестких стандартов охраны окружающей среды и сокращением загрязнений.

Минэкономразвития Российской Федерации планирует потратить 418 млрд руб. на развитие электротранспорта в России до 2030 г. Казань вошла в число пилотных городов этой программы. ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» является участником государственной программы «Развитие зарядной инфраструктуры для транспортных средств с электродвигателями в Республике Татарстан» на 2021–2025 гг. с задачей научного сопровождения и реализацией разрабатываемых проектов. Большим заделом стратегического проекта является выполнение НИОКТР, заключенным с Производственным объединением «Зарница» на период 2021–2023 гг. по теме «Организация высокотехнологичного производства мобильных установок заряда электротранспорта высокой мощностью с интегрированной системой накопления электроэнергии» в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства (Постановление Правительства Российской Федерации от 09.04.2010 г., № 218).

В рамках направления «зеленые» технологии генерации электроэнергии на базе возобновляемых источников энергии продолжится подготовка специа-

листов по ВИЭ для работы на существующих в Российской Федерации станциях: около 30 СЭС и ВЭС, более 30 малых и строящихся ГЭС (потребность кадров более 4000 специалистов).

Основные направления развития «зеленых» технологий:

разработка методик выявления оптимальных площадок при ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» для размещения ВЭС с последующим производством в том числе «зеленого водорода» методом электролиза;

разработка научных основ для оптимизации моделей работы ветропарков и других объектов возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Прогнозирование выработки ветропарками и другими объектами, создание Центра развития «зеленых» технологий генерации электроэнергии на базе возобновляемых источников энергии, в частности электроэнергии на базе ветра. Моделирование оптимальных сценариев производства электрической энергии при различных ветроусловиях.

Для функционирования такой микроэнергосистемы необходимы программно-аппаратные комплексы с распределенной архитектурой и системами управления, построенные с применением различных методов искусственного интеллекта, которые обеспечат:

синтез договорных условий;

выдачу управляющих воздействий на силовое оборудование, соответствующих договорным условиям и обеспечивающих выполнение технологических ограничений;

реализацию энергообмена на физическом уровне.

MicroGrid – система, которая включает собственные источники генерации энергии и в кризисные ситуации способна взять на себя задачу по удовлетворению спроса потребителей. Это своего рода уменьшенная версия централизованной системы электроснабжения.

Энергосбережение и энергоэффективность должны стать основными элементами энергетических систем будущего. Содействие развитию низкоуглеродной экономики замкнутого цикла является сложнейшей и важнейшей задачей, требующей масштабного международного сотрудничества, а также мониторинга разработки технологий хранения энергии, которые необходимо развивать в целях поддержки непостоянных систем возобновляемой энергетики.

В области энергосбережения предусмотрена разработка экологически эффективных и ресурсосберегающих технологических решений для систем водопользования и водоотведения на предприятиях энергетического сектора.

Импортозамещение и цифровые системы в энергетике и смежных отраслях.

При создании перспективных транспортных средств в рамках общемирового тренда с электрическими приводами, роботизированных транспортных средств на водородном и других видах газового топлива отечественные разработки должны опираться на мировой опыт: сотрудничество с ведущими автомобильными корпорациями и университетами Европы и Америки. В резуль-

тате данного сотрудничества отечественное автостроение получит реальные конструктивные и технологические решения автомобилей с различными приводами и разнообразного назначения (водоробус, электробус, карьерный самосвал-робот и т. д.).

Для разработки данных образцов техники необходимо активизировать деятельность по подготовке конструкторской и технологической документации с учетом отечественных технологий и материалов для локализации производства на территории Российской Федерации. Эти задачи приоритетно развивать на базе научно-технического центра ПАО «КАМАЗ». В настоящее время в Центре ведутся разработки по актуализации конструкторской документации на серийные изделия, разработки перспективных образцов автотранспортных средств и исследования в области критических технологий. К данными работам привлечены ученые ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ», ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университетс, Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», ФГБУН «Федеральный исследовательский центр “Казанский научный центр РАН”», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» и т. д.

Одной из важных задач данного проекта является создание класса материалов на основе композитных материалов под автомобильные технологии массового производства в соответствующем ценовом диапазоне, а также создание и развитие производства отечественной автокомпонентной базы и отечественных автомобильных материалов для традиционных транспортных средств (дизельные) и транспортных средств различного назначения (легковые, грузовые, пассажирские, специальные) на альтернативных источниках энергии (газ, водород, электроэнергия), включая автономные. Внедрение газомоторных видов топлива позволит автомобильной отрасли Российской Федерации конкурировать на мировом рынке.

В рамках направления по разработке электротранспорта и зарядной инфраструктуры важной задачей является разработка комплексного решения регионального уровня MicroGrid посредством:

создания и внедрения новых технологии в области проектирования, эксплуатации мобильных и стационарных кондуктивных (проводных), индуктивных (беспроводных) зарядных станций с накопителями электроэнергии для электротранспорта общественного и индивидуального назначения с целью их дальнейшего производства и развития зарядной инфраструктуры общественного и индивидуального назначения;

разработки и внедрения в образовательный процесс новых профилей и обеспечения кадрами для развития проектов интеллектуального электротранспорта, зарядной инфраструктуры и накопителей электроэнергии;

создания студенческого ОКБ по проектированию и производству электротехнического оборудования электромобилей и зарядных станций, стартап-платформы, бизнес-проектов для вовлечения студентов и молодых ученых в исследовательскую и производственную деятельность;

разработки опытного образца и производства мобильной установки для заряда электротранспорта высокой мощности с интегрированной системой накопления электроэнергии с возможностями масштабирования мощности;

разработки и производства станции быстрой зарядки с возможностью масштабирования мощности силовых преобразователей для электротранспорта общественного и индивидуального назначения;

разработки опытного образца и производства многоцелевой беспилотной платформы на электрической тяге с увеличенным запасом автономного хода для дистанционного мониторинга технического состояния энергетических и особо опасных объектов;

разработки и производства тяговых электроприводов с синхронными вентильными электродвигателями с постоянными магнитами для электротранспорта.

Для реализации обозначенных направлений предполагается создание центра наукоемких технологий опережающего развития интеллектуального электротранспорта и зарядной инфраструктуры, дооснащение учебной научной лаборатории «Электромобильный и беспилотный транспорт и зарядная инфраструктура» при ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Создание платформы водородных технологий в энергетике предполагает:

создание технологии и промышленной установки электролизного получения водорода при переработке сточных вод тепловой электрической станции (ТЭС);

создание технологии гибридной установки (топливный элемент – газовая турбина) получения тепловой и электроэнергии с использованием водородсодержащих газовых смесей на ТЭС;

создание технологии и промышленного образца водородной автозаправочной станции (АЗС) с применением электрохимических технологий – электролизного получения водорода, электрохимической компрессии и электродеионизации для водоподготовки;

создание более эффективных каталитических систем для получения водорода традиционными способами;

создание систем и материалов для хранения и транспортировки водорода;

создание технологии внутрипластового получения водорода и повышения нефтеотдачи на месторождениях трудноизвлекаемых углеводородов и запуск пилотного участка на объектах нефтедобывающих компаний Республики Татарстан.

В рамках программы предусмотрена разработка, организация производства и выпуск водородных АЗС с локализацией производства в Республике Татарстан.

2. *Интеллектуальная энергетика – цифровая трансформация и интеллектуализация отраслей ТЭК*, согласно Энергетической стратегии Российской Федерации, приведет к получению потребителями новых прав и возможностей, новой продукции и услуг. Интеллектуальная энергетика, по Доктрине энергетической безопасности, помогает преодолеть несоответствие между потребностями социально-экономического развития Российской Федерации и возможностями ТЭК на данный момент, что является вызовом для энергетического комплекса страны.

Реализация данного направления – в рамках развития проектов мониторинга технического состояния и повышения надежности электроэнергетики, предикативного анализа состояния проводов, арматуры и опор воздушных линий электропередач.

Разработка технологий неразрушающего контроля и диагностика технического состояния изоляционного оборудования посредством внедрения технологии непрерывного бесконтактного неразрушающего контроля технического состояния изоляционного оборудования станций, подстанций, воздушных и кабельных линий электропередач.

Разработка и внедрение цифровых распределенных систем мониторинга оборудования электрических подстанций позволит обеспечить надежность, контроль технического состояния, диагностику электротехнического оборудования.

Разработка и внедрение беспилотных и мобильных робототехнических платформ мониторинга состояния и ремонта ЛЭП и подстанций предопределяет необходимость применения инструментов беспилотной и робототехнической платформ в энергетике.

Основные задачи данного направления:

создание экспериментальной мастерской с целью технологической отработки изготовления и производства малых серий инновационной наукоемкой продукции, разрабатываемой на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»;

формирование отраслевой среды сбора и хранения информации о состоянии различных узлов и механизмов, математическая обработка, а также ситуационное управление;

развитие информационно-коммуникационной инфраструктуры в цифровых платформах, имеющих распределенную устойчивую защищенную структуру и обладающих значительными вычислительными мощностями.

Предполагается создание Центра разработки и внедрения цифровых распределенных систем мониторинга линий электропередач и подстанций при ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». Научные разработки по данному управлению в настоящее время реализуются на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» в научно-исследовательской лаборатории «Мониторинг технического состояния и повышение надежности электроэнергетики», научно-исследовательской лабора-

тории «Технологии неразрушающего контроля и диагностика технического состояния изоляционного оборудования», научно-исследовательской лаборатории «Беспилотные и робототехнические платформы в энергетике».

Цифровые системы энергетического комплекса Республики Татарстан предопределяют необходимость разработки data-центра для создания системы интеллектуального анализа больших данных для решения задач долгосрочного прогнозирования, анализа рынков и перспективных компетенций, проведения научно-практических разработок цифровых инструментов, компенсирующих недостаток ресурсов и позволяющих достичь принципиально новых результатов, в первую очередь в образовании, здравоохранении, общественном развитии и социальной и экономической политике; проведение научно-практических разработок когнитивных и поведенческих моделей человека. Все это позволит повысит доступность образовательных программ и образовательных сервисов через внедрение цифровых инструментов.

Этому способствуют следующие факторы:

реализованные и текущие исследовательские проекты в области электротранспорта, ветроэнергетики, платформы водородных технологий, плазменной переработки отходов с получением энергии;

наличие индустриальных партнеров Российской Федерации, в том числе имеющих ведущие позиции в своей отрасли;

связь с образованием по требуемым направлениям (международные образовательные программы, программы дополнительного профессионального образования);

экономический потенциал: бюджетное финансирование (федеральные целевые программы), договоры НИОКР с промышленными предприятиями.

Экономия энергии приносит финансовую выгоду предприятиям не только в виде стоимости сэкономленной энергии, но и в виде повышения производительности в результате оптимизации процессов. Главным вызовом на пути к повышению промышленной энергоэффективности является решение проблемы высокоэнергоемких процессов в таких отраслях, как нефтедобывающая и нефтехимическая промышленность, сельское хозяйство. Инновации, целевые исследования и разработки могут способствовать повышению эффективности промышленности.

Основными целями развития энергосектора являются:

обеспечение технологического лидерства Республики Татарстан в сфере водородных АЗС, систем хранения и транспортировки водорода, развитие электротранспорта и зарядной инфраструктуры, возобновляемых источников энергии, энергоэффективного электросетевого хозяйства и генерации электроэнергии;

обеспечение энергетической безопасности Российской Федерации и Республики Татарстан за счет разработки и внедрения импортонезависимых нефтепромысловых реагентов, технологий и оборудования, а также решение задач ускоренного импортозамещения в области энергетических технологий и оборудования.

В рамках обозначенной цели определены следующие задачи:

достижение оптимального уровня энергетической безопасности и обеспечение баланса между производством и потреблением энергии и мощности в энергетической системе на основе ускоренного внедрения отечественных технологий с использованием результатов востребованных исследований и разработок, интеллектуального капитала в сфере энергетики и смежных отраслях;

создание эффективной устойчивой экосистемы партнерства с ведущими энергетическими университетами, создаваемыми научными центрами при ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» и промышленными корпорациями в рамках существующих и планируемых к созданию стратегических проектов энергетического комплекса региона;

внедрение интегрированных решений на основе предиктивной аналитики, Big Data, предоставления технических услуг, проведения мониторинга, разработки цифровых решений для энергосектора республики; разработка образовательных программ, подготовка и переподготовка специалистов требуемой квалификации для реализации задач подпрограммы;

создание зарядной инфраструктуры различной мощности в регионе, разработка и внедрение атомных и водородных технологий;

создание отечественных компонентов систем хранения, транспортировки и использования водородного топлива на транспорте;

разработка и реализация MicroGrid системы для предприятий реального сектора и smart energy для региона;

создание широкой линейки отечественных реагентов и катализаторов, технологий и оборудования, обеспечивающих полный цикл от получения, хранения, транспортировки, до использования полезных ископаемых в энергетической отрасли;

разработка научных основ для оптимизации моделей работы объектов возобновляемых источников энергии, методик выявления оптимальных площадок для размещения ВЭС, СЭС.

Рассмотрим связь между вызовами социально-экономического развития и стратегическими задачами (табл. 1).

Взаимосвязь реализации мероприятий с актуальными вызовами социально-экономического развития мезо-, макро- и глобального уровней осуществлена на основе сопоставления основных приоритетов направлений развития энергосектора Республики Татарстан с решаемыми с ее помощью задачами, обеспечивающими эффективную адаптацию республики к рассматриваемым вызовам в рамках укрепления и развития научно-технологического комплекса.

Реализация направлений развития энергосектора Республики Татарстан позволит решить ряд стратегических задач научно-технологического развития республики в сфере формирования адаптационных механизмов региона к системным преобразованиям, вызванным переходом мировой и национальной экономики в фарватер шестого технологического уклада (табл. 2).

Реализация направлений развития энергосектора Республики Татарстан позволит минимизировать риски, генерируемые большими вызовами современной и будущей технологических повесток.

Таблица 1. **Связь направлений развития энергосектора Республики Татарстан с вызовами социально-экономического развития**

Глобальные вызовы	Большие (национальные) вызовы	Региональные вызовы (мезовызовы)
Изменение климата	Обострение международных отношений, повлекших за собой санкционное давление на национальную экономику Российской Федерации, вызвало нарушение, а в ряде случаев – и разрушение логистических связей на отраслевом и региональном уровнях, необходимость интенсификации механизмов импортозамещения в стратегически значимых секторах экономики	Исчерпание возможностей экстрактивной (ориентированной на экспорт углеводородного сырья, преимущественно низкого технологического передела) модели экономического роста Республики Татарстан, усугубляющейся симптомами «голландской болезни», зависимостью от технологий, импортных материалов и компонентов в важнейших отраслях и сферах экономики, на фоне формирования цифровой экономики и появления ограниченной группы стран-лидеров, обладающих новыми производственными технологиями и ориентированных на использование возобновляемых ресурсов. Увеличение числа стихийных бедствий и экономического ущерба от них
Демографическое развитие	Сравнение региональных особенностей изменения продолжительности жизни и уровня образования населения выявило ряд кардинальных диспропорций, которые обусловлены технологическим развитием. В России – значительный износ основных фондов, высокая зависимость экономики от экспорта продукции с низкой добавленной стоимостью и примитивной производственной цепочкой, высокая энергоемкость ВВП	Несвоевременное усиление региональной инновационной системы и модернизация основных фондов приведет к стагнации социально-экономических институтов и снижению уровня доходов населения. Монопрофильность ряда промышленных центров и высокая импортозависимость технико-технологического контура / слабый технологический суверенитет в приоритетных сферах социально-экономического развития территории
Новые модели открытых инноваций	Появление ограниченной группы стран-лидеров, обладающих новыми производственными технологиями и ориентированных на использование возобновляемых ресурсов	Недостаточная глобальная конкурентоспособность обрабатывающей промышленности, недостаток сырья для нефтегазохимии; экологические проблемы. Модели догоняющего развития и технологической зависимости от иностранных поставщиков; дисбаланс спроса и предложения на рынке труда, включая дефицит высококвалифицированных специалистов в узкоспециализированных и технологических сферах; автономия науки от реального сектора экономики; слабая инновационная активность предприятий

Окончание табл. 1

Глобальные вызовы	Большие (национальные) вызовы	Региональные вызовы (мезовызовы)
«Цифровой прогресс» / цифровая трансформация	Качественное изменение характера глобальных и локальных энергетических систем	Угрозы для Республики Татарстан связаны с риском утраты конкурентоспособности на мировых и внутренних рынках из-за отставания в темпах и масштабах перехода к новой цифровой революции в условиях санкционного давления на Российскую Федерацию, ограничения доступа к передовым технологиям
Усиление когнитивных и физических возможностей человека	Демографический переход, обусловленный увеличением продолжительности жизни людей, изменением их образа жизни, и связанное с этим старение населения, угрозы глобальных пандемий, увеличение риска появления новых и возврата исчезнувших инфекций	Традиционно высокая доля нефтедобывающих и нефтехимических отраслей определяют антропогенную нагрузку на окружающую среду и связанное с ней снижение потенциала здоровьесбережения жителей региона
Доступная и «чистая» энергии	Обеспечение доступа к источникам энергии не будет эффективным решением вопроса при ненадежном энергоснабжении.	Изменения в экономическом состоянии отрасли, возможные колебания цен на энергоносители и их поставку
Актуальное и доступное образование	Базовая экономическая жизнедеятельность зависит от непрерывных поставок топлива, рационального управления, эффективной и стабильно работающей распределительной системы	Невысокий уровень внутрирегиональных кооперационных связей образования, науки, инноваций и реального сектора экономики. Утрата или существенное осложнение из-за санкционного давления устоявшихся кооперационных цепочек, в том числе в сферах приобретения высокотехнологичного оборудования, гарантийного технического обслуживания и ремонта действующего парка оборудования
Пандемии		Утрата или существенное осложнение из-за санкционного давления устоявшихся кооперационных цепочек, в том числе в сферах приобретения химических реагентов и катализаторов, высокотехнологичного оборудования, гарантийного технического обслуживания и ремонта действующего парка оборудования

Реализация направлений развития энергосектора Республики Татарстан позволит минимизировать риски, генерируемые большими вызовами современной и будущей технологических повесток.

Энергетический сектор является ключом к экономической стабильности и инклюзивному росту. Обозначенные направления развития энергетического сектора предопределяют безопасную, доступную и устойчивую энергетику за счет перехода к рыночно ориентированному низкоуглеродному энергетическому

Таблица 2. **Описание рисков реализации направлений развития энергосектора Республики Татарстан и возможных последствий недостижения целевых показателей ее эффективности**

Вызовы	Описание рисков	Последствия наступления	Способы минимизации рисков в рамках решения ключевых задач
Изменение климата. Новые модели открытых инноваций	Углеродный след стимулирует компании брать на себя обязательства по переходу на ВИЭ. Отсутствие региональной программы развития водородной энергетики. Мусорные полигоны и мусоросжигательные заводы вредны для экологии. Потребность увеличения плотности энергии в накопителях с 400 до 600 Вт·ч/кг. Высокая конкуренция со стороны иностранных производителей оборудования ВИЭ. Отсутствие в РТ опыта построения реальных производственных цепочек по данному направлению. Отсутствие экономической модели для инвестиций в разработку и производство	Отказ от атома в пользу ВИЭ создает риски и ведет к нестабильности всей энергосистемы, повышению тарифов на электричество и зависимости от импорта той же электроэнергии из соседних стран	Разработка проектов ВИЭ. Диверсификация рисков при энергопереходе. Разработка новых материалов для генерации и накопления энергии и технологий их производства для повышения энергоэффективности плазменной технологии утилизации отходов. Развитие замещающих технологий. Переобучение персонала
«Цифровой прогресс» / цифровая трансформация	Высокий износ основных фондов предприятий энергетического комплекса региона. Отсутствие технологий и производства современного оборудования. Нехватка конкурентоспособных генерирующих мощностей. Зависимость от иностранного оборудования. Регуляторные барьеры развития рынка электроэнергии. Неоднородность территориальной структуры	Введение новых санкций, влияющих на отрасль. Отсутствие необходимого объема инвестиций. Увеличение цен на используемое топливо и транспортировку. Неисполнение обязательств по поставке мощности. Простой и поломка генерирующего оборудования. Изменение налогообложения, валютного регулирования, таможенного контроля и пошлин. Снижение потребления электроэнергии. Зависимость от климатический условий. Стихийные бедствия и техногенные аварии	

сектору. Центральное место в этом занимает расширение использования возобновляемых источников энергии.

Таким образом, инновации в области энергоэффективности и ресурсоэффективности часто рассматриваются в качестве беспроигрышных возможностей как для экономических, так и для экологических показателей компаний. Инновации представляют собой сложные виды деятельности, которые также нуждаются в нормативных стимулах, вносят существенный вклад в экономический успех фирм.

Список использованных источников

1. Анисимов, А. С. Основные проблемы инвестиционной деятельности в топливно-энергетическом комплексе России / А. С. Анисимов, И. Г. Ахметова // Современные технологии и экономика в энергетике (МТЕЕ – 2020) : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 23 апр. 2020 г. / Санкт-Петербург. политехн. ун-т Петра Великого ; ред. И. А. Лазарева [и др.]. – СПб., 2020. – С. 11–13.

2. Ахметова, И. Г. Основные аспекты разработки стратегии научно-технологического развития Республики Татарстан / И. Г. Ахметова, Ю. С. Валеева // Стратегирование: теория и практика. – 2022. – Т. 2, № 2. – С. 270–292.

3. Ваньков, Ю. В. Повышение надежности транспортировки тепловой энергии до потребителей в условиях модернизации системы горячего водоснабжения / Ю. В. Ваньков, И. Н. Запольская // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики : материалы 92-го заседания Междунар. науч. семинара им. Ю. Н. Руденко, Казань, 21–26 сент. 2020 г. / Ин-т систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибир. отд-ния Рос. акад. наук ; ред. Н. И. Воропай. – Казань, 2020. – С. 355–363.

4. Стимулирование развития электротранспорта как инструмент развития территории / Ю. С. Валеева [и др.] // Вестн. Казан. гос. энергет. ун-та. – 2022. – Т. 14, № 1 (53). – С. 155–172.

5. Energy Sector Enterprises in Digitalization Program: Its Implication for Open Innovation / Y. Valeeva [et al.] // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. – 2022. – Vol. 8, № 2. – P. 1–20.

References

1. Anisimov, A. S. Osnovnye problemy investicionnoj deyatel’nosti v toplivno-energeticheskom komplekse Rossii / A. S. Anisimov, I. G. Ahmetova // Sovremennye tekhnologii i ekonomika v energetike (MTEE – 2020) : materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Sankt-Peterburg, 23 apr. 2020 g. / Sankt-Peterburgskij politekhn. un-t Petra Velikogo ; red. I. A. Lazareva [et al.]. – Sankt-Peterburg, 2020. – S. 11–13.

2. Ahmetova, I. G. Osnovnye aspekty razrabotki strategii nauchno- tekhnologicheskogo razvitiya Respubliki Tatarstan / I. G. Ahmetova, Yu. S. Valeeva // Strategirovanie: teoriya i praktika. – 2022. – T. 2, № 2. – S. 270–292.

3. Van’kov, Yu. V. Povyshenie nadezhnosti transportirovki teplovoj energii do potrebitelej v usloviyah modernizacii sistemy goryachego vodosnabzheniya / Yu. V. Van’kov, I. N. Zapol’skaya // Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol’shih sistem energetiki : materialy 92-go zased. Mezhdunar. nauch. seminara im. Yu. N. Rudenko, Kazan’, 21–26 sent. 2020 g. / In-t sistem energetiki im. L. A. Melent’eva Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj akad. nauk ; red. N. I. Voropaj. – Kazan’, 2020. – S. 355–363.

4. Stimulirovanie razvitiya elektrotransporta kak instrument razvitiya territorii / Yu. S. Valeeva [et al.] // Vestn. Kazan. gos. energ. un-ta. – 2022. – T. 14, № 1 (53). – S. 155–172.

5. Energy Sector Enterprises in Digitalization Program: Its Implication for Open Innovation / Y. Valeeva [et al.] // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. – 2022. – Vol. 8, № 2. – P. 1–20.

УДК 620.9

Т. Г. Зорина

УСТОЙЧИВОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ КАК ОСНОВНОЙ ДРАЙВЕР ТРАНСФОРМАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Доктор экономических наук, профессор, Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Статья посвящена анализу современного состояния развития энергетики Республики Беларусь. На основе авторской методики проведен анализ динамики устойчивого энергетического развития Республики Беларусь в 1995–2020 гг. Выделены основные барьеры устойчивого развития энергетики и пути их преодоления.

Ключевые слова: энергетика, концепция устойчивого развития, индекс устойчивого энергетического развития.

T. G. Zoryna

SUSTAINABLE ENERGY DEVELOPMENT AS THE MAIN DRIVER OF POWER ENGINEERING TRANSFORMATION IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Doctor of Economics, Professor, Institute of Power Engineering of NAS of Belarus Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The article is devoted to the analysis of the current state of power engineering development in the Republic of Belarus. Based on the author's methodology, an analysis was made of the dynamics of sustainable energy development of the Republic of Belarus in 1995–2020. The main barriers to sustainable development of the power engineering and ways to overcome them are identified.

Keywords: power engineering, concept of the sustainable development, index of sustainable energy development.

Введение. Энергетическая система Беларуси – стабильно работающий технологический комплекс, который обеспечивает надежное и бесперебойное снабжение потребителей страны энергией.

В энергетической системе в настоящее время продолжается работа по обновлению и повышению эффективности работы производственных фондов, а также повышению надежности энергоснабжения потребителей. Наряду с модернизацией основных производственных фондов и внедрением новых высокоэффективных генерирующих мощностей проводится системная работа по снижению затрат на производство и реализацию энергии. Наиболее важным проектом для энергетического комплекса Республики Беларусь остается ввод в эксплуатацию Белорусской атомной станции. Это имеет существенное значение для развития не только энергетической сферы, но и всей экономики.

Ввод Белорусской АЭС позволит:

диверсифицировать структуру топливно-энергетического баланса и заместить до 5 млрд $м^3$ природного газа и, как следствие, снизить удельный вес газа при производстве энергии с 95 до 60 %;

уменьшить выбросы парниковых газов в атмосферу до 10 млн т в год;

придать качественно новый интеллектуальный и технологический импульс развитию страны и обеспечить дополнительные гарантии укрепления государственной независимости и экономической безопасности Беларуси.

Это соответствует стратегической цели развития топливно-энергетического комплекса, предусматривающей удовлетворение потребностей экономики и населения страны в энергоносителях на основе их максимального эффективного использования при снижении нагрузки на окружающую среду.

Можно выделить три основных этапа развития энергетического комплекса Республики Беларусь:

повышение экономической целесообразности функционирования (до 2000 г.);

укрепление энергетической безопасности (2000–2016 гг.);

устойчивое энергетическое развитие (с 2017 г.).

Современный этап характеризует развитие энергетического комплекса Республики Беларусь в период ее интеграции в мировое сообщество.

К основным факторам внешней среды, которые оказывают влияние на функционирование энергетического комплекса, можно отнести следующие.

Усиление влияния экологических и социальных факторов. На данном этапе Республика Беларусь активно участвует в глобализационных процессах реализации концепции устойчивого развития мирового сообщества.

Так, на 21-й сессии Конференции Сторон Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата 12 декабря 2015 г. принято Парижское соглашение, которое направлено на реализацию резолюции Генеральной Ассамблеи ООН «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития до 2030 года» и поддержку экологической целостности, возобновляемых источников энергии, «зеленой» экономики, передачу высокоэффективных технологий, смягчение последствий изменения климата и адаптацию к изменяющемуся климату.

2 мая 2017 г. Президиум Совета Министров Республики Беларусь одобрил Национальную стратегию устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года. Это долгосрочная стратегия, определяющая цели, этапы и направления перехода Республики Беларусь к постиндустриальному обществу и инновационному развитию экономики при гарантировании всестороннего развития личности, повышении стандартов жизни человека и обеспечении благоприятной окружающей среды.

В 2017 г. Национальный координатор по достижению Целей устойчивого развития, заместитель председателя Совета Республики Марианна Щеткина представила в ООН Национальный добровольный доклад Республики Беларусь

«Об осуществлении повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года».

В 2018 г. Национальным статистическим комитетом принята Дорожная карта по разработке статистики по Целям устойчивого развития, и с 2019 г. организацией ведется статистический учет реализации Целей устойчивого развития на основе разработанных индикаторов.

Влияние 4-й промышленной революции на энергетический сектор. «Индустрия 4.0» – эпоха инноваций, которая характеризуется переходом на полностью автоматизированное цифровое производство, управляемое интеллектуальными системами в режиме реального времени. Новый тип промышленного производства основывается на таких технологиях, как большие данные, автоматизация, блокчейн, интернет вещей, искусственный интеллект, «умные» сети.

Среди выгод цифровизации энергетических систем можно выделить повышение надежности энергоснабжения и качества энергетических услуг для обеспечения возросших требований потребителей, оптимизацию информационных потоков, увеличение эффективности принимаемых решений, производительности и качества работы персонала. В число же основных вызовов и угроз новой индустриальной парадигмы входят проблемы кибербезопасности и необходимость принятия мер по противодействию кибератакам, проблемы обеспечения управляемости, устойчивости и живучести энергетических систем, свойства которых радикально изменяются под влиянием инновационных энергетических технологий,

Стабильно высокая стоимость энергоресурсов. На протяжении исследуемого периода цены на энергоресурсы не отличались стабильностью. В частности, в период 2010–2020 гг. цены на импортный природный газ снизились на 11,86 % и составили в 2020 г. 130,7 долл. США за тыс. $м^3$. Цены на импортируемый каменный уголь также демонстрировали тенденцию к снижению в течение исследуемого периода. Так, если в 2017 г. цена импортируемого каменного угля составила 64,8 долл. США за тонну, то в 2020 г. она была на уровне 41,1 долл. США за тонну, сократившись в 1,57 раза. Неустойчивыми оставались цены на импортируемую сырую нефть. В частности, период 2017–2019 гг. характеризовался ростом цен на данный энергоресурс на 24,18 %: с 294,4 до 365,6 долл. США за тонну. В 2020 г. в результате углубления диверсификации поставщиков сырой нефти и мировых тенденций цена на нее упала в 1,5 раза и составила 243,1 долл. США за тонну (рис. 1).

Сохранение риска дефицита энергоресурсов. Несмотря на проведенные в 2006–2016 гг. мероприятия по увеличению объемов использования собственных энергоресурсов на протяжении всего исследуемого периода доля импортных энергоресурсов, в валовом энергопотреблении имела незначительные колебания от 83 до 85 % (рис. 2). Вместе с тем стабильное снижение данного показателя свидетельствовало о наметившейся тенденции к повышению уровня энергетической самостоятельности Республики Беларусь.

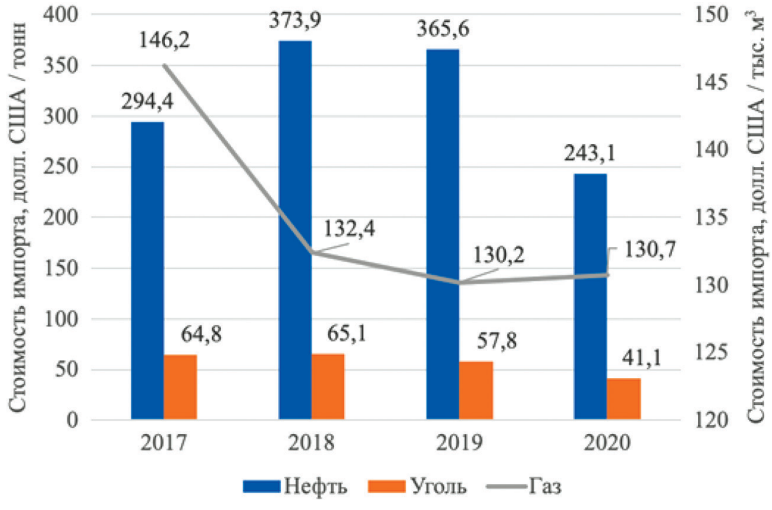


Рис. 1. Цены импортируемых энергоресурсов в Республику Беларусь

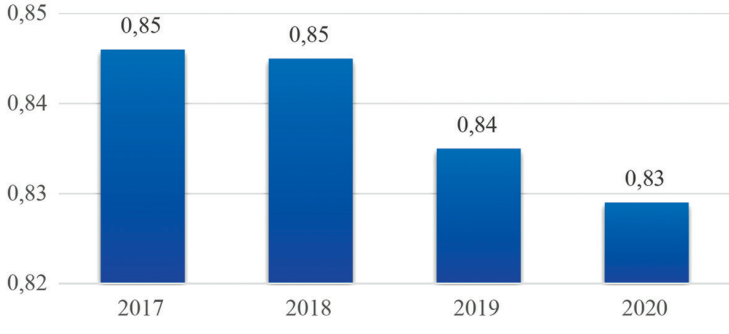


Рис. 2. Доля импортных энергоресурсов в валовом энергопотреблении в Республике Беларусь в 2017–2020 гг.

Усиление влияния мировых тенденций, недостаточный уровень диверсификации поставщиков и энергетической самостоятельности Республики Беларусь в исследуемый период обусловили необходимость перехода в энергетическом планировании от концепции энергетической безопасности к устойчивому энергетическому развитию.

Материалы и методы исследования. Устойчивое энергетическое развитие – процесс развития способной к саморегулированию системы с целью достижения региональной энергетической безопасности при рациональном использовании энергоресурсов, обеспечении социального равенства в области доступа к энергоуслугам и сохранении окружающей среды в условиях неопределенности. Устойчивое энергетическое развитие характеризует не только функционирование энергетического сектора какой-либо территориальной единицы, а в целом определяет направления развития экономики данной территории и ее социальной сферы.

На данном этапе происходит развитие методологии энергетического планирования. В частности, была разработана система показателей, характеризующих отдельные факторы устойчивого энергетического развития, и на их основе – интегральный показатель (индекс устойчивого энергетического развития). Предложенный индекс позволяет оценить текущий уровень устойчивого энергетического развития и проследить его динамику по годам, а также сравнить положение страны с другими странами. Интегральный индекс, характеризующий уровень устойчивого энергетического развития, включает не только традиционные для устойчивого развития экономическую, социальную и экологическую группы показателей, но и технологические, выделенные в отдельную группу. В индексе сбалансированы показатели по внешним и внутренним факторам. Оценивать устойчивое энергетическое развитие страны можно как в целом, так и по отдельным факторам и подсистемам показателей. Одним из этапов методики является нормирование показателей, которое позволяет привести их к единому диапазону. Применение интегрального индекса, характеризующего уровень устойчивого энергетического развития, является целесообразным при разработке стратегии устойчивого энергетического развития [1].

Расчет индекса устойчивого энергетического развития состоит из следующих этапов.

I этап. Отбор показателей.

На данном этапе осуществляется отбор показателей, характеризующих устойчивое энергетическое развитие региона в разрезе экономического, технологического, социального и экологического аспектов. Учитываются показатели, применяемые в мировой практике и рекомендуемые различными учеными, занимающимися данной проблемой.

II этап. Классификация показателей по факторам и определение способа расчета показателей.

Все факторы, характеризующие устойчивое энергетическое развитие, можно разделить по следующим критериям:

по направлению воздействия – на внешние и внутренние;

по описываемой ими сфере – на экономические, технологические, социальные, экологические;

по принципам оценки устойчивого энергетического развития – на наличие ресурсов, направления социально-экономического развития, спрос на энергоресурсы, энергобезопасность.

Классификация показателей представлена в табл. 1.

В табл. 2 представлен способ расчета показателей, характеризующих устойчивое энергетическое развитие.

При расчете индексов вместо показателей «энергоемкость ВВП» и «уровень выбросов CO_2» используются разность единицы и одноименных показателей, поскольку в случае, если показатели оказывают отрицательное влияние на индекс, то учитываются их обратные значения.

Таблица 1. **Система показателей устойчивого энергетического развития**

Факторы	Наличие ресурсов	Направления социально-экономического развития	Спрос на энергоресурсы	Энергобезопасность
Экономический	Доступность кредитных ресурсов	Доля энергетики в ВВП	Уровень рентабельности энергетики	Доля недоминирующих энергоресурсов в общем объеме импорта энергоресурсов
Технологический	Доля собственных энергоресурсов в общем энергопотреблении	Доля инвестиций в энергетику	Энергоемкость ВВП	Доля резервных мощностей в общих мощностях энергетики
Социальный	Уровень занятости	Уровень образования	Доступность топлива и энергии для населения	Уровень электрификации населения
Экологический	Уровень озеленения страны	Уровень здоровья	Коэффициент сокращения потребления энергоресурсов	Уровень выбросов CO_2 от потребления энергии на душу населения
Факторы	**Внешние**	**Внешние**	**Внутренние**	**Внутренние**

Таблица 2. **Классификация и способ расчета показателей, характеризующих устойчивое энергетическое развитие**

Фактор	Показатель	Пояснение
Экономический	Доступность кредитных ресурсов	Разность единицы и процентной ставки по кредитам
	Доля энергетики в ВВП	Отношение суммы объема выпуска по отраслям энергетики к общему объему выпуска в регионе
	Уровень рентабельности энергетики	Отношение суммы объема валовой прибыли от функционирования отраслей энергетики к сумме объема выручки
	Доля недоминирующих энергоресурсов в общем объеме импорта энергоресурсов	Разность единицы и доли доминирующего энергоресурса в общем объеме импорта энергоресурсов
Технологический	Доля собственных энергоресурсов в общем энергопотреблении	Разность единицы и доли импортных энергоресурсов в общем энергопотреблении
	Доля инвестиций в энергетику	Отношение суммы объема инвестиций в отрасли энергетики к общему объему инвестиций в регионе
	Энергоемкость ВВП	Отношение энергопотребления к ВВП
	Доля резервных мощностей в общих мощностях энергетики	Разность единицы и отношения суммы первичной переработки нефти, производства электрической энергии, транспортировки газа по газопроводам и транспортировки нефти по нефтепроводам, приведенных к единым единицам измерения, к сумме мощностей по первичной переработке нефти, электрогенерирующих мощностей, пропускной способности газопроводов и пропускной способности нефтепроводов, приведенных к единым единицам измерения

Окончание табл. 2

Фактор	Показатель	Пояснение
Социальный	Уровень занятости	Разность единицы и доли безработных в общем количестве трудоспособного населения
	Уровень образования	Используется одноименный показатель из индекса развития человеческого потенциала
	Доступность топлива и энергии для населения	Разность единицы и отношения затрат на топливо и энергию к общим затратам домохозяйств
	Уровень электрификации населения	Доля населения, имеющего доступ к электрической энергии
Экологический	Уровень озеленения страны	Доля площади зеленых насаждений в общей площади страны
	Уровень здоровья	Используется одноименный показатель из индекса развития человеческого потенциала
	Коэффициент сокращения потребления энергоресурсов	Разность единицы и отношения энергопотребления в отчетном периоде к предыдущему
	Уровень выбросов CO_2 от потребления энергии на душу населения	Объем выбросов CO_2 от энергопотребления на душу населения

III этап. Сбор базы данных для расчета показателей.

На данном этапе осуществляется сбор данных и формирование базы данных для расчета показателей.

IV этап. Определение веса показателей и факторов.

Вес показателей определяется методом групповой экспертной оценки при непосредственном оценивании. При этом каждый эксперт устанавливает предпочтения показателей при сравнении всех возможных пар. То есть эксперт, рассматривая все возможные пары показателей, в каждой из них устанавливает ту причину, которая, по его мнению, оказывает большее влияние на следствие.

Пусть каждый из m экспертов производит оценку влияния на результат всех пар показателей, давая числовую оценку:

$$r_{ij}^{h} = \begin{cases} 1, \text{ если показатель } O_i \text{ более значим, чем } O_j \\ 0{,}5, \text{ показатели } O_i \text{ и } O_j \text{ равнозначны} \\ 0, \text{ если показатель } O_i \text{ менее значим, чем } O_j \end{cases}, \quad (1)$$

где $h = 1,2,...m$ – номер эксперта; $i,j = 1,2,...n$ – номера показателей (факторов), исследуемых при экспертизе. По результатам экспертизы получаем матрицу парных сравнений.

Последовательность обработки парных сравнений заключается в том, что на основании таблиц парных сравнений m-экспертов строится матрица математических ожиданий оценок всех пар показателей (факторов) по формуле:

$$x_{ij} = \frac{m_i}{m} + 0{,}5\left(\frac{m - m_i - m_j}{m}\right) = \frac{1}{2} + \frac{m_i - m_j}{2m}, \quad (2)$$

где m_i – количество экспертов, отдавших предпочтение показателям (факторов) O_i; m_j – количество экспертов, отдавших предпочтение показателям (факторов) O_j.

Затем по этой матрице вычисляется вектор коэффициентов относительной важности показателей:

$$k = [k_1, k_2, \ldots k_n]^{\tau}.$$

Одним из способов определения значений элементов вектора K является итерационный алгоритм вида:

а) начальное условие $t = 0$:

$$k^0 = [111 \ldots 1]^{\tau};$$

б) рекуррентные соотношения:

$$k^t = \frac{1}{\lambda^t} X k^{t-1},$$

$$\lambda^t = [111 \ldots 1] X k^{t-1}, \; t = (1, 2, \ldots n),$$

где X – матрица математических ожиданий оценок пар показателей (факторов); k^t – вектор коэффициентов относительной важности объектов порядка t.

$$\Sigma_{i=1}^{n} k_i^t = 1 \text{ – условие нормировки;}$$

в) признак окончания:

$$\| k^t - k^{t-1} \| < E,$$

где E – допустимая погрешность.

Согласно Концепции устойчивого развития [1], а также с учетом особенностей энергетики, отличающих ее от других отраслей промышленности (участие в обеспечении национальной безопасности, обязательное наличие резерва генерирующих мощностей и др.), экономические, технологические, социальные и экологические аспекты являются равнозначными. В связи с этим каждому из факторов был присвоен одинаковый вес, равный 0,25.

V этап. Расчет индекса.

На данном этапе происходит расчет индекса по следующей формуле:

$$I = \Sigma_{j=1}^{k} z_j \Sigma_{i=1}^{m} x_{ij} f_{ij}, \tag{3}$$

где I – индекс устойчивого энергетического развития региона (индекс устойчивого развития отрасли энергетики (энергетики в целом); индекс устойчивого развития предприятия энергетики); z_j – вес j-го фактора; x_{ij} – вес i-го показателя для j-го фактора; f_{ij} – значение i-го показателя для j-го фактора; k – количество факторов; m – количество показателей.

VI этап. Нормирование показателей.

Для приведения значений каждого показателя к единому диапазону осуществляется нормирование исходных данных по формуле:

$$x_{i,0-1} = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \tag{4}$$

где $x_{i,0-1}$ – нормализованное значение показателя x_i; x_i – исходное значение показателя; $x_{\min}$ – минимальное значение показателя среди исходных данных; $x_{\max}$ – максимальное значение показателя среди исходных данных.

VII этап. Расчет нормированного индекса.

Нормированный индекс устойчивого энергетического развития (индекс устойчивого развития отрасли энергетики (энергетики в целом); индекс устойчивого развития предприятия энергетики) рассчитывается для разных регионов (отраслей, предприятий) по формуле (3) с последующим выведением их рейтинга.

VIII. Определение рейтинга стран по уровню устойчивого развития.

После расчета индекса устойчивого энергетического развития (индекса устойчивого развития отрасли энергетики (энергетики в целом); индекса устойчивого развития предприятия энергетики) по ряду регионов (отраслей, предприятий) составляется их рейтинг, при этом региону (отрасли, предприятию) с наибольшим значением индекса присваивается 1.

Интегральный индекс, характеризующий уровень устойчивого энергетического развития страны (региона), принимает значения от 0 до 1 (табл. 3). Чем выше значение индекса, тем более устойчивое энергетическое развитие страны (региона) [2].

Таблица 3. **Интерпретация пороговых значений интегральной оценки устойчивого энергетического развития**

Уровень	Границы интервала	Интерпретация интегральной оценки
1	От 0,8 до 1	Сбалансированное устойчивое развитие
2	От 0,6 до 0,8	Высокий уровень устойчивого развития
3	От 0,4 до 0,6	Средний уровень устойчивого развития
4	От 0,2 до 0,4	Низкий уровень устойчивого развития
5	От 0 до 0,2	Неустойчивое развитие

Результаты исследования и их обсуждение. На основе представленной в данной статье методологии автором был проведен анализ устойчивого энергетического развития Республики Беларусь в период 1995–2020 гг.

В качестве источников информации были использованы данные Национального статистического комитета Республики Беларусь, Министерства энергетики Республики Беларусь, а также информация из открытых источников.

На рис. 3 представлен интегральный индекс, характеризующий уровень устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995–2020 гг.

Как видно из рис. 3, наиболее высокого значения интегральный индекс, характеризующий уровень устойчивого энергетического развития Республики Беларусь, достиг в 2020 г. (0,590). Несущественные спады уровня устойчивого энергетического развития в исследуемый период наблюдались в 2000 г. (0,521), в 2009 г. (0,561) и в период 2012–2015 гг. (0,565–0,570). В целом в 2020 г. уровень устойчивого энергетического развития страны увеличился в 1,22 раза по сравнению с уровнем 1995 г.

Для более детального анализа рассмотрим динамику групповых показателей по различным факторам, характеризующим устойчивое энергетическое развитие Республики Беларусь.

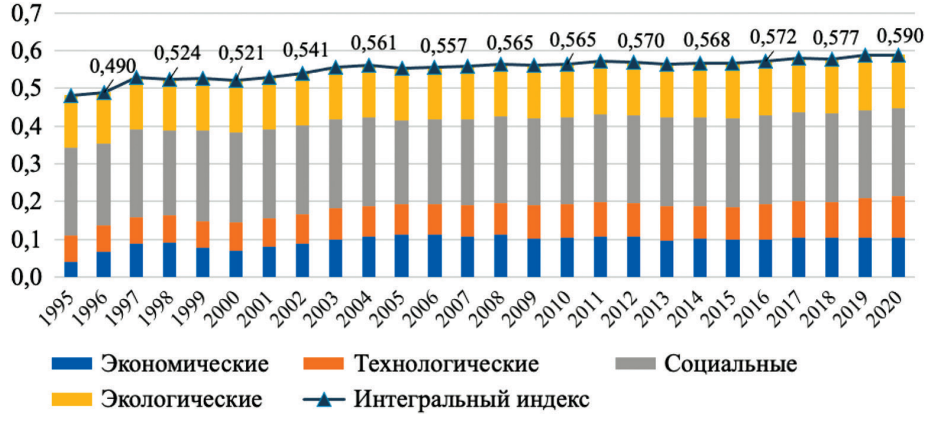


Рис. 3. Интегральный индекс, характеризующий уровень устойчивого энергетического развития Республики Беларусь [3]

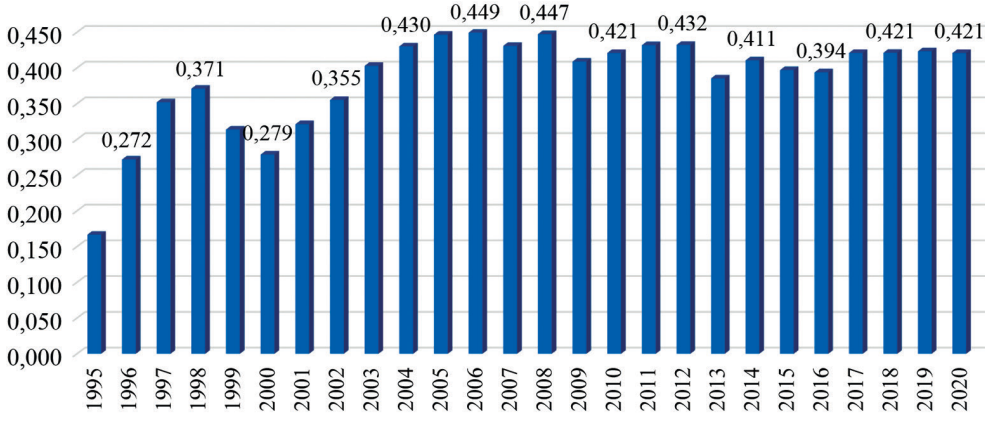


Рис. 4. Индекс, характеризующий экономические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь

На рис. 4 представлен индекс, характеризующий экономические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995–2020 гг.

Как видно из рис. 4, индекс, характеризующий экономические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995–2020 гг., отличается значительной степенью неравномерности. Это обусловлено в первую очередь уровнем общей экономической стабильности в Республике Беларусь, а также эффективностью работы энергетики и доступностью кредитных ресурсов. Его наибольшее значение было достигнуто в 2006 г. (0,449), наименьшее наблюдалось в 1995 г. (0,167). В целом в 2020 г. групповой показатель увеличился на 52,41 % по сравнению с таковым в 1995 г.

На рис. 5 представлен индекс, характеризующий технологические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995–2020 гг.

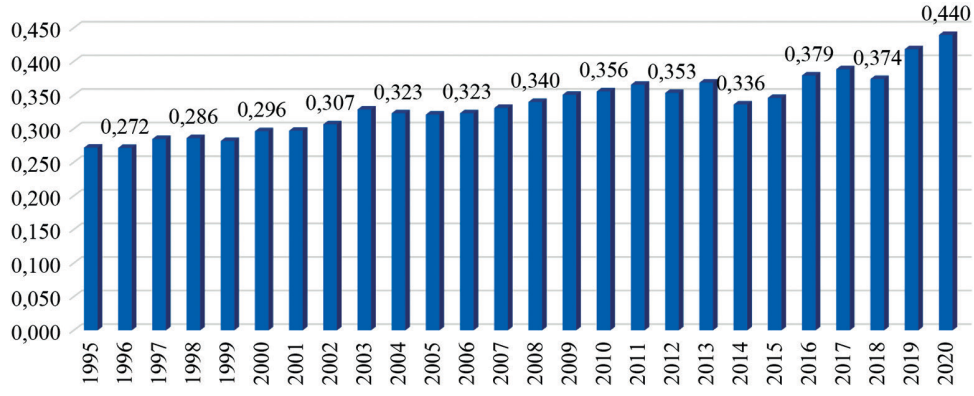


Рис. 5. Индекс, характеризующий технологические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь

Как видно из рис. 5, за исключением 2013, 2014, 2018 гг., для индекса, характеризующего технологические факторы, за исследуемый период был свойственен постоянный рост. В 2020 г. данный показатель увеличился по сравнению с таковым в 1995 г. в 1,62 раза. Наибольшее значение индекс достиг в 2020 г. (0,440), наименьшее – в 1995 г. (0,272).

На рис. 6 представлен индекс, характеризующий социальные факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995–2020 гг.

Как следует из рис. 6, индекс, характеризующий социальные факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь в 1995–2020 гг., отличался неравномерностью. Это обусловлено в первую очередь ценами на топливо и энергетические ресурсы для населения и удельными затратами на них в потребительской корзине. В 2020 г. он снизился по сравнению с 1995 г. на 1,38 %. Наиболее высокого значения данный показатель достиг в 1999 г. (0,959), наименьшее значение наблюдалось в 1996 г. (0,871).

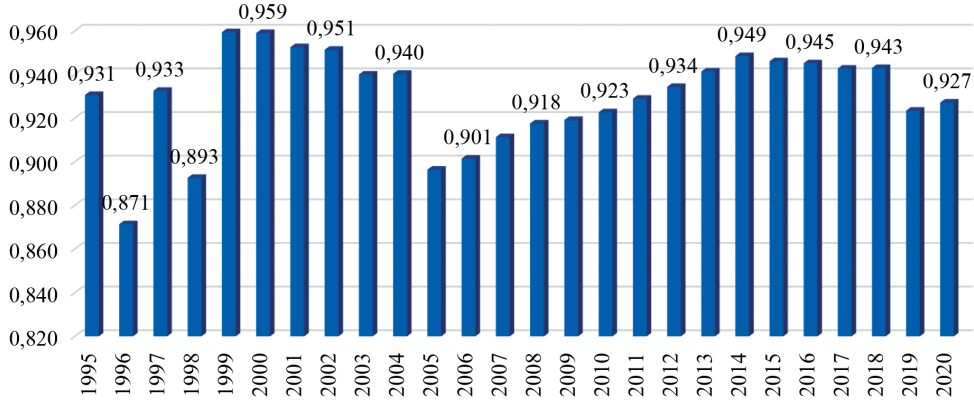


Рис. 6. Индекс, характеризующий социальные факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь

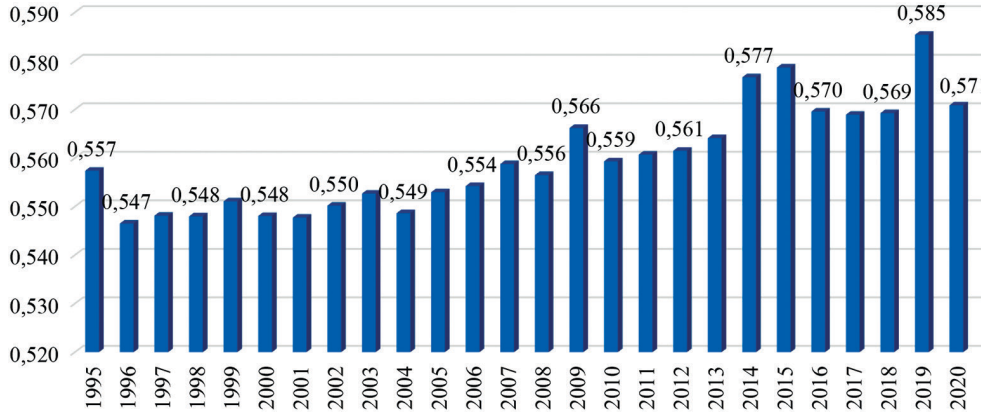


Рис. 7. Индекс, характеризующий экологические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь

На рис. 7 представлен индекс, характеризующий экологические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995–2020 гг.

Как следует из рис. 7, в 1995–2020 гг. групповому показателю, характеризующему экологические факторы устойчивого энергетического развития, была присуща положительная тенденция. В 2020 г. он увеличился по сравнению с 1995 г. на 2,4 %. Наиболее высокое значение данный показатель достиг в 2019 г. (0,585), наименьшее наблюдалось в 1996 г. (0,547).

В качестве основных характеристик энергетического комплекса в 2017–2022 гг. можно выделить следующие.

Снижение потребления топливно-энергетических ресурсов.

Согласно Государственной программе «Энергосбережение» на 2016–2020 годы одной из стратегических целей деятельности в области энергосбережения на период до 2021 года являлось сдерживание роста валового потребления ТЭР при экономическом развитии страны [4].

Целевым показателем реализации подпрограммы 1 «Повышение энергоэффективности» являлось снижение энергоемкости ВВП к 2021 г. не менее чем на 0,7 % к уровню 2015 г.

Реализация данной программы привела к снижению энергоемкости ВВП в 2020 г. на 3 % к уровню 2017 г., и ее состояние оценивалось в 365 кг усл. топл. / млн руб. Следует отметить, что энергетическая составляющая энергоемкости ВВП в исследуемый период снизилась на 6,14 %: с 265,3 кг усл. топл. / млн руб. в 2017 г. до 249 кг усл. топл. / млн руб. в 2020 г. (рис. 8).

Увеличение доли местных видов топлива, возобновляемой и атомной энергетики в энергобалансе.

Согласно Государственной программе «Энергосбережение» на 2016–2020 годы второй из стратегических целей деятельности в области энергосбережения на период до 2021 года являлось дальнейшее увеличение использования местных ТЭР, в том числе ВИЭ.

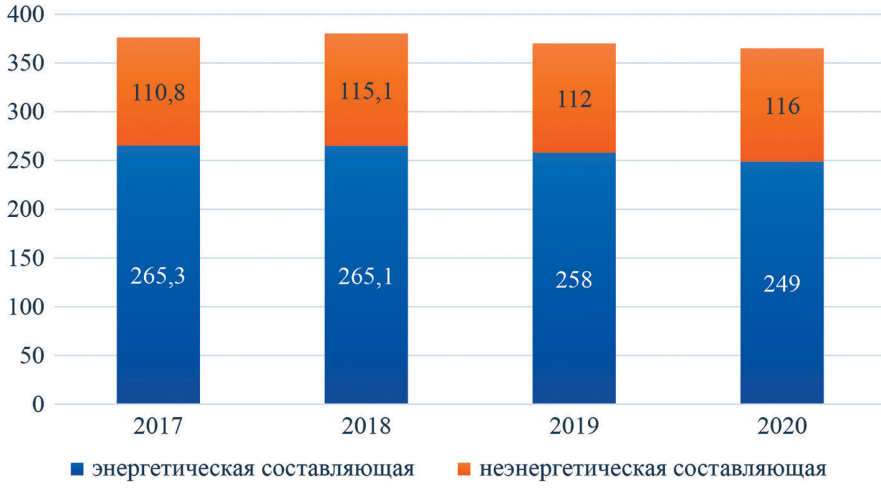


Рис. 8. Энергоемкость ВВП Республики Беларусь (ВВП в ценах 2005 г.), кг усл. топл. / млн рублей

Целевым показателем реализации подпрограммы 2 «Развитие использования местных топливно-энергетических ресурсов, в том числе возобновляемых источников энергии» являлось достижение к 2021 г. отношения объема производства (добычи) первичной энергии к валовому потреблению ТЭР не менее 16 % [4].

В результате реализации данной программы к 2020 г. более 3 % электрической энергии в Республике Беларусь производилось из таких видов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и местных видов топлива, как энергия ветра, солнца, воды, переработка отходов, биомасса и биогаз. При этом наибольший удельный вес в структуре энергоисточников на местных ресурсах приходился на электростанции на биомассе (33,6 %), мини-ГЭС (32,2 %), солнечные электростанции (СЭС) (14,1 %) (рис. 9).

Повышение доли электрической энергии в конечном потреблении за счет электрификации ж/д транспорта, развития электротранспорта и электроотопления.

В целях повышения доли электрической энергии в конечном потреблении в исследуемый период принят ряд нормативных правовых актов различного уровня.

Программа создания государственной зарядной сети для зарядки электромобилей, утвержденная Постановлением Совета Министров Беларуси от 10 октября 2018 г. № 731, принята с целью создать в стране развитую сеть электрозарядных станций (ЭЗС) по предоставлению качественных и доступных услуг по зарядке электромобилей, обеспечивающую комфортное и беспрепятственное передвижение электромобилей по территории республики и соответствующую мировым стандартам [5].

Указ Президента Республики Беларусь от 12 марта 2020 г. № 92 «О стимулировании использования электромобилей» предусматривает меры, которые

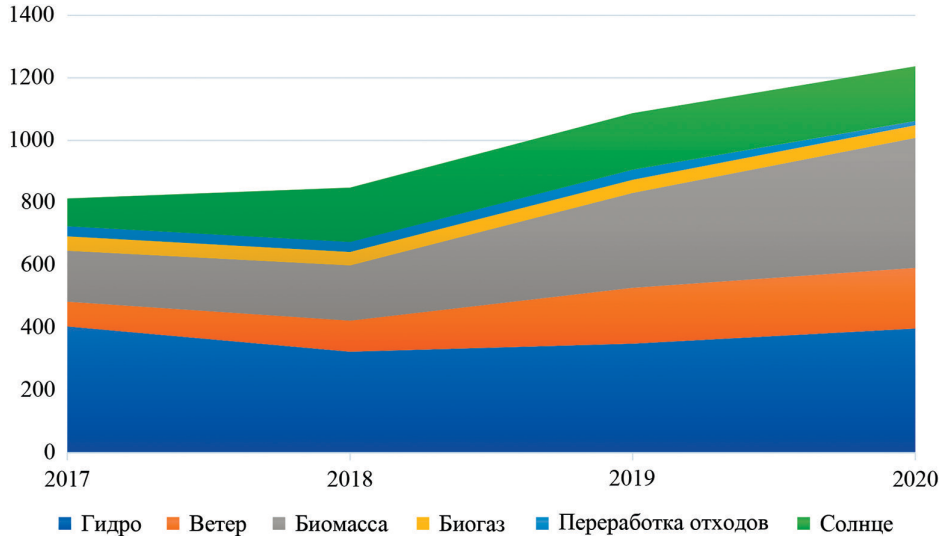


Рис. 9. Производство электрической энергии из различных видов ВИЭ и местных видах топлива в 2017–2020 гг., МВт·ч

призваны стимулировать спрос на электромобили, создание в стране соответствующей зарядной и сервисной инфраструктуры. В частности:

нулевая ставка ввозного НДС на электромобили для физических лиц;

возврат физическим лицам суммы НДС при покупке электромобилей на территории Республики Беларусь;

бесплатная парковка для электромобилей на платных парковках коммунальной формы собственности;

инвестиционный вычет для юридических лиц (индивидуальных предпринимателей) при покупке и эксплуатации электромобилей (зарядных станций) [6].

Комплексная программа развития электротранспорта на 2021–2025 годы, утвержденная Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 9 апреля 2021 г. № 213, направлена на создание новой области экономического роста на основе развития отрасли машиностроения – производства электротранспорта, а также условий для увеличения количества используемых транспортных средств на электрической тяге, расширения инфраструктуры электротранспорта и минимизации негативных влияний на экологию [7].

В рамках выполнения подпрограммы «Освоение в производстве новых и высоких технологий» Государственной программы «Наукоемкие технологии и техника» на 2016–2020 годы разработаны 48 государственных стандартов Республики Беларусь в области электротранспорта, идентичных международным и европейским стандартам, охватывающих узкоспецифические аспекты, относящиеся к электротранспорту и инфраструктуре зарядных станций [8].

В целях стимулирования населения использовать электрическую энергию для нужд отопления, горячего водоснабжения и пищеприготовления Указом

Президента Республики Беларусь от 14 апреля 2020 г. № 127 «О возмещении расходов на электроснабжение эксплуатируемого жилищного фонда» предусмотрена норма, позволяющая возместить часть расходов на выполнение работ по электроснабжению эксплуатируемого жилищного фонда для нужд отопления, горячего водоснабжения и пищеприготовления. Размер возмещения части расходов составляет 20 % от стоимости выполненных работ по электроснабжению эксплуатируемого жилищного фонда, но не более 40 базовых величин, установленных на дату принятия решения о возмещении части расходов [9].

Указом Президента Республики Беларусь от 22 декабря 2018 г. № 492 «Об установлении тарифов на жилищно-коммунальные услуги для населения на 2019 год» установлен комфортный для населения тариф на электрическую энергию для целей отопления и горячего водоснабжения электрифицированного жилого фонда в целях стимулирования потребления электроэнергии в республике с 2019 г. [10].

В соответствии с Государственной программой «Строительство жилья» на 2021–2025 годы, утвержденной Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 28 января 2021 г. № 51, за пять лет планируется ввести в эксплуатацию около 2 млн $м^2$ площади жилых домов, в которых электрическая энергия используется для отопления, горячего водоснабжения и приготовления пищи [11].

Заключение. Проведенное исследование показало, что в настоящее время Республика Беларусь характеризуется достаточным уровнем энергетической безопасности (выполняются все плановые показатели кроме показателей группы «Диверсификация поставщиков и видов энергоресурсов») и средним уровнем устойчивого энергетического развития (0,590 в 2020 г.), что свидетельствует об эффективности энергетического планирования и функционирования энергетического комплекса Республики Беларусь.

Вместе с тем в энергетическом секторе республики остается ряд барьеров, препятствующих устойчивому энергетическому развитию, в том числе:

наличие вертикально-интегрированной монополии;

сохранение перекрестного субсидирования;

недостаточный уровень цифровизации;

недостаточная загрузка производственных мощностей;

отсутствие возможностей экспорта электрической энергии;

недостаточный уровень использования местных видов топлива и возобновляемых источников энергии;

высокий уровень неравномерности графика нагрузки.

В виду вышеизложенного можно выделить следующие предложения республиканским органам государственного управления в части направлений устойчивого энергетического развития Республики Беларусь на период до 2025 г.:

дальнейшее использование рыночных механизмов в энергетическом секторе и переход к модели «Закупочное агентство»;

постепенный отказ от перекрестного субсидирования;

дальнейшее внедрение АСКУЭ;

стимулирование развития электротранспорта;

стимулирование использования электрической энергии в жилищном строительстве для отопления и горячего водоснабжения;

повышение доли использования электрической энергии в железнодорожном транспорте;

стимулирование создания и развития энергоемких производств (водородная энергетика, цементная промышленность, цветная металлургия, химическая промышленность и др.);

стимулирование использования местных видов топлива;

более глубокая дифференциация тарифов на электрическую энергию.

Список использованных источников

1. ООН и Устойчивое Развитие [Электронный ресурс] // Организация Объединенных Наций. – Режим доступа : https://www.un.org/ru/development/%20sustainable/energy.shtml. – Дата доступа : 21.04.2022.

2. Зорина, Т. Г. Формирование стратегии устойчивого энергетического развития / Т. Г. Зорина. – Минск : Мисанта, 2016. – 332 с.

3. Зорина, Т. Г. Устойчивое энергетическое развитие Республики Беларусь: анализ динамики развития в 1995–2018 гг. / Т. Г. Зорина // Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь: состояние и перспективы : Междунар. науч. конф., Минск, 1– 2 окт. 2020 г. : сб. докл. / ред. Т. Г. Зорина. – Минск : Беларус. навука, 2020. – С. 18–33.

4. Государственная программа «Энергосбережение» на 2016–2020 годы [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 28 мар. 2016 г., № 248 // Департамент по энергоэффективности. – Режим доступа : http://energoeffekt.gov.by/programs/govporgram20162020/2016-2020. – Дата доступа : 21.04.2022.

5. Программа создания государственной зарядной сети для зарядки электромобилей [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 10 окт. 2018 г., № 731 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. – Режим доступа : https://pravo.by/upload/docs/op/C21800731_1539637200.pdf. – Дата доступа : 21.04.2022.

6. О стимулировании использования электромобилей [Электронный ресурс] : Указ Президента Респ. Беларусь, 12 мар. 2020 г., № 92 // Офиц. интернет-портал Президента Респ. Беларусь. – Режим доступа : https://president.gov.by/bucket/assets/uploads/documents/2020/92uk.pdf. – Дата доступа : 21.04.2022.

7. Комплексная программа развития электротранспорта на 2021–2025 годы [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 9 апр. 2021 г., № 213 // Нац. правовой интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа : https://pravo.by/upload/docs/op/C22100213_1618347600.pdf. – Дата доступа : 21.04.2022.

8. Государственная программа «Наукоемкие технологии и техника» на 2016–2020 годы [Электронный ресурс] // Программы М-ва сельского хозяйства и продовольствия Респ. Беларусь. – Режим доступа : https://mshp.gov.by/programms/c2c003177dc2a374.html. – Дата доступа : 21.04.2022.

9. О возмещении расходов на электроснабжение эксплуатируемого жилищного фонда [Электронный ресурс] : Указ Президента Респ. Беларусь, 14 апр. 2020 г., № 127 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. – Режим доступа : https://pravo.by/upload/docs/op/P32000127_1586984400.pdf. – Дата доступа : 21.04.2022.

10. Об установлении тарифов на жилищно-коммунальные услуги для населения на 2019 год [Электронный ресурс] : Указ Президента Респ. Беларусь, 22 дек. 2018 г., № 492 // Нац. правовой

интернет-портал Респ. Беларусь. – Режим доступа : https://pravo.by/upload/docs/op/P31800492_1545944400.pdf. – Дата доступа : 21.04.2022.

11. Государственная программа «Строительство жилья» на 2021–2025 годы [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 28 янв. 2021 г., № 51 // Нац. правовой интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа : https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100051. – Дата доступа : 21.04.2022.

References

1. OON i Ustojchivoe Razvitie [Electronic resource] // Organizaciya Ob"edinennyh Nacij. – Mode of access : https://www.un.org/ru/development/%20sustainable/energy.shtml. – Date of access : 21.04.2022.

2. Zorina, T. G. Formirovanie strategii ustojchivogo energeticheskogo razvitiya / T. G. Zorina. – Minsk : Misanta, 2016. – 332 s.

3. Zorina, T. G. Ustojchivoe energeticheskoe razvitie Respubliki Belarus': analiz dinamiki razvitiya v 1995–2018 gg. / T. G. Zorina // Ustojchivoe razvitie energetiki Respubliki Belarus': sostoyanie i perspektivy : Mezhdunar. nauch. konf., Minsk, 1–2 okt. 2020 g. : sb. dokl. / red. T. G. Zorina. – Minsk : Belarus. navuka, 2020. – S. 18–33.

4. Gosudarstvennaya programma «Energosberezhenie» na 2016–2020 gody [Electronic resource] : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', 28 mar. 2016 g., № 248 // Departament po energoeffektivnosti. – Mode of access : http://energoeffekt.gov.by/programs/govporgram20162020/2016-2020. – Date of access : 21.04.2022.

5. Programma sozdaniya gosudarstvennoj zaryadnoj seti dlya zaryadki elektromobilej [Electronic resource] : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', 10 okt. 2018 g., № 731 // Nacional'nyj pravovoj internet-portal Resp. Belarus'. – Mode of access : https://pravo.by/upload/docs/op/C21800731_1539637200.pdf. – Date of access : 21.04.2022.

6. O stimulirovanii ispol'zovaniya elektromobilej [Electronic resource] : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus', 12 mar. 2020 g., № 92 // Oficial'nyj internet-portal Prezidenta Resp. Belarus'. – Mode of access : https://president.gov.by/bucket/assets/uploads/documents/2020/92uk.pdf. – Date of access : 21.04.2022.

7. Kompleksnaya programma razvitiya elektrotransporta na 2021–2025 gody [Electronic resource] : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', 9 apr. 2021 g., № 213 // Nacional'nyj pravovoj internet-portal Resp. Belarus'. – Mode of access : https://pravo.by/upload/docs/op/C22100213_1618347600.pdf. – Date of access : 21.04.2022.

8. Gosudarstvennaya programma «Naukoemkie tekhnologii i tekhnika» na 2016–2020 gody [Electronic resource] // Programmy / Ministerstva sel'skogo hozyajstva i prodovol'stviya Resp. Belarus'. – Mode of access : https://mshp.gov.by/programms/c2c003177dc2a374.html. – Date of access : 21.04.2022.

9. O vozmeshchenii raskhodov na elektrosnabzhenie ekspluatiruemogo zhilishchnogo fonda [Electronic resource] : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus', 14 apr. 2020 g., № 127 // Nacional'nyj pravovoj internet-portal Resp. Belarus'. – Mode of access : https://pravo.by/upload/docs/op/P32000127_1586984400.pdf. – Date of access : 21.04.2022.

10. Ob ustanovlenii tarifov na zhilishchno-kommunal'nye uslugi dlya naseleniya na 2019 god [Electronic resource] : Ukaz Prezidenta Resp. Belarus', 22 dek. 2018 g., № 492 // Nacional'nyj pravovoj internet-portal Resp. Belarus'. – Mode of access : https://pravo.by/upload/docs/op/P31800492_1545944400.pdf. – Date of access : 21.04.2022.

11. Gosudarstvennaya programma «Stroitel'stvo zhil'ya» na 2021–2025 gody [Electronic resource] : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', ot 28 yanv. 2021 g., № 51 // Nacional'nyj pravovoj internet-portal Resp. Belarus'. – Mode of access : https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100051. – Date of access : 21.04.2022.

УДК 620.9

О. В. Кудрявцева[1], Е. Ю. Яковлева[2]

НИЗКОУГЛЕРОДНОЕ РАЗВИТИЕ В НЕПРОСТЫЕ ВРЕМЕНА: ЭНЕРГЕТИКА И ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

[1]Доктор экономических наук, профессор, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
[2]Кандидат экономических наук, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена основным вопросам низкоуглеродного развития в условиях обострившихся геополитических, экономических, экологических вызовов. Проведен межотраслевой анализ выбросов парниковых газов в экономике России, показаны пути снижения ее углеродоемкости.

Ключевые слова: низкоуглеродное развитие, устойчивое развитие, энергетика, промышленность, риски, парниковые газы.

O. V. Kudryavtseva[1], E. Yu. Yakovleva[2]

LOW-CARBON DEVELOPMENT IN CHALLENGING TIMES: ENERGY AND INDUSTRY

[1]Doctor of Economics, Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
[2]Ph. D. in Economics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation. The work is devoted to the main issues of low-carbon development in the context of exacerbated geopolitical, economic, and environmental challenges. An intersectoral analysis of greenhouse gas emissions in the Russian economy has been carried out. Ways to reduce the carbon intensity of the economy have been shown.

Keywords: low-carbon development, sustainable development, energy, industry, risks, greenhouse gases.

Введение. Несмотря на всевозможные геополитические, биологические, экономические вызовы и риски, с которыми сталкивается в последнее время человечество, не теряют своей актуальности и становятся еще более острыми риски, вызываемые изменением климата на планете. Они усиливают все обозначенные выше вызовы. Если вспомнить доклад Всемирного экологического форума 2021 г., посвященный глобальным рискам [2], то можно увидеть, что неисполнение мер по предотвращению изменений климата находилось на втором месте после инфекционных заболеваний (а это было время, когда в мире активно распространялись предыдущие волны пандемии Covid-19). Государства прилагают усилия по сокращению выбросов парниковых газов, по внедрению энергосберегающих технологий, переключению на неуглеродные источники энергии. Здесь можно упомянуть углеродный механизм Европейского Союза (Carbon Border Adjustment Mechanism – CBAM), другие меры.

Россия находится среди стран, имеющих наибольшую интенсивность выбросов CO_2 в процессе производства продукции [1]. Низкоуглеродные технологии в энергетике и промышленности закладывают фундамент для устойчивого конкурентоспособного развития экономики на перспективу.

Результаты и их обсуждение. Мы оценили общие выбросы парниковых газов (ПГ) для российской промышленности и показали некоторые пути их снижения. Использовалась симметричная матрица «затраты – выпуск» за 2016 г., рассчитанная Росстатом и опубликованная 30 января 2020 г. На ее основе была рассчитана матрица коэффициентов прямых затрат. Для оценки потоков выбросов ПГ использовались данные ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля» («ИГКЭ»), базы данных по объемам выбросов, разбитых по видам деятельности. Данные по парниковым газам, используемые в анализе, включали массу выбросов углекислого газа (CO_2), метана (CH_4), оксида азота (N_2O), гидрофторгулеродов (HFCs), перфторхимикатов (PFCs), гексафторида серы (SF_6) и трифторида азота (NF_3), измеренных в тыс. тонн CO_2-эквивалента. Суммирование выбросов различных ПГ произведено не на основе их физического объема, а на основе их парниковой активности. Последняя выражается в так называемом «потенциале глобального потепления» – специальном коэффициенте, отражающем способность молекул данного газа задерживать солнечную радиацию. Для углекислого газа данная величина принята за единицу, для метана она составляет 25, для оксида азота – 298, для гексафторида серы – 22 800. Примеры таких коэффициентов можно найти в материалах портала ecometrica.com.

Полный выброс (прямой и косвенный) меньше реального (приведенного в статистике) в энергетике и транспорте. Обрабатывающее производство в целом является потребителем экологически «грязной» продукции (полное загрязнение больше реального), но отрасль производства минерального сырья имеет реальный выброс больше полного, т. е. довольно много ПГ производится самой отраслью, больше, чем при производстве ресурсов, используемых в данной отрасли. Объем ПГ, связанных с потреблением ресурсов и выбрасываемых отраслями металлургии и сельским хозяйством, сопоставимы. Остальные отрасли обрабатывающего производства и прочие сектора экономики – типичные потребители экологически «грязной» продукции. В химической промышленности подавляющее большинство косвенных выбросов приходится на энергетику, на втором месте – транспорт.

Валовые показатели демонстрируют вклад сектора в общий объем выбросов ПГ, но не отражают загрязнение, приходящее на единицу добавленной стоимости в секторе. То, что валовый и удельный показатель по выбросам ПГ в энергетике максимален (88 т полного выброса ПГ на 1 млн рублей добавленной стоимости), не вызывает удивления. Однако на втором месте по массе ПГ в расчете на единицу выпуска идет отрасль производства минерального сырья (50 т), при этом химическая (49 т) и металлургическая (46 т) отрасли отстают незначи-

тельно. Полный удельный выброс ПГ в сельском хозяйстве выше, чем в транспорте (31 т против 27,5 т). В зависимости от величины прямых и косвенных выбросов могут быть выбраны разные меры для их сокращения в отраслях.

Строительство атомных электростанций перспективно с точки зрения сокращения выбросов парниковых газов при производстве продукции. Однако отсутствие выбросов парниковых газов в процессе эксплуатации станций не означает их полное отсутствие, поскольку при строительстве станций используются материалы, при производстве которых были задействованы технологии с высокими углеродными выбросами. Тем не менее, если принимать во внимание удельные выбросы, произведенные атомной станцией на протяжении ее жизненного цикла, они, согласно оценкам Всемирной ядерной ассоциации (World Nuclear Association, WNA), примерно равны выбросам от ветряных электростанций и в три раза меньше, чем от солнечных.

Заключение. В связи с этим можно также приветствовать международное сотрудничество в области перспективных энергетических технологий, низкоуглеродной энергетики, в частности, сотрудничество России с Беларусью по вопросам Белорусской атомной электростанции, что будет стимулировать инновации в различных сферах, в том числе способствовать внедрению электрического транспорта. Также перспективным является взаимодействие в области развития водородной энергетики.

Список использованных источников

1. Kudryavtseva, O. V. Low-carbon development: challenges for Russia / O. V. Kudryavtseva, A. V. Baraboshkina // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – 2021. – Vol. 21, № 5.1. – P. 301–306.

2. Carbon Dioxide Emissions from Electricity [Electronic resource] // World Nuclear Association (WNA). – Mode of access : https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity.aspx. – Date of access : 15.06.2021.

References

1. Kudryavtseva, O. V. Low-carbon development: challenges for Russia / O. V. Kudryavtseva, A. V. Baraboshkina // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – 2021. – Vol. 21, № 5.1. – P. 301–306.

2. Carbon Dioxide Emissions from Electricity [Electronic resource] // World Nuclear Association (WNA). – Mode of access : https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity.aspx. – Date of access : 15.06.2021.

УДК 004.8: (620.9 +504.05)

Л. В. Массель[1], А. Г. Массель[2]

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЯМ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

[1]Доктор технических наук, профессор, Институт систем энергетики им. Л. А Мелентьева СО РАН, Иркутск, Российская Федерация
[2]Кандидат технических наук, доцент, Институт систем энергетики им. Л. А Мелентьева СО РАН, Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается применение разработанных ранее авторами и под их руководством подходов, методов и инструментальных средств в новой предметной области – для исследований устойчивости (в смысле «Resilience») энергетических и экологических систем. Выполнено сравнение технологий семантического моделирования, приведен алгоритм интеграции онтологического, когнитивного и математического моделирования в исследованиях устойчивости энергетических систем и рассмотрены результаты реинжиниринга поддерживающего этот алгоритм ПК ИНТЭК для проведения численных расчетов. Приведены примеры онтологий, когнитивная карта, пример интерфейса многоагентного ПК ИНТЭК-А. Для исследований устойчивости экологических систем предлагается использование разработанной под руководством авторов Web-ориентированной информационно-вычислительной системы (ИВС WICS) для оценки влияния объектов энергетики на загрязнение окружающей среды, приведены архитектура этой системы и пример интерфейса.

Ключевые слова: исследования устойчивости энергетических и экологических систем, методы ситуационного управления и семантического моделирования, многоагентный ПК ИНТЭК-А, онтологическое и когнитивное моделирование, Web-ориентированной информационно-вычислительной системы (ИВС WICS).

L. V. Massel[1], A. G. Massel[2]

METHODOLOGICAL APPROACH TO RESEARCH OF ENERGY SYSTEMS RESILIENCE BASED ON THE CONCEPT OF SITUATIONAL MANAGEMENT

[1]Doctor of Engineering Science, Institute of Energy Systems L. A. Melentieva SB RAS, Irkutsk, Russian Federation
[2]Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Institute of Energy Systems L. A. Melentieva SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Annotation. The article discusses the application of approaches, methods and tools, developed earlier by the authors and under their guidance, in a new subject area – for researching the resilience of energy and ecological systems. A comparison of semantic modeling technologies is made, an algorithm for integrating ontological, cognitive and mathematical modeling in studies of the energy systems resilience is presented, and the results of reengineering of the INTEC software supporting this algorithm for numerical calculations are considered. Examples of ontologies, a cognitive map, an example of an interface for a multi-agent PS INTEC-A are given. To study the resilience of ecological systems, it is proposed to use the Web-based information and computing system (WICS) developed under the guidance of the authors to assess the impact of energy facilities on environmental pollution, the architecture of this system and an example of an interface are given.

Keywords: research of energy and ecological systems resilience, methods of situational management and semantic modeling, multi-agent PS INTEC-A, ontological and cognitive modeling, Web-based information and computing system (WICS).

Введение. В предлагаемой статье устойчивость рассматривается в качестве “Resilience” – термин, который переводится на русский язык как «устойчивость» или «упругость». Это направление в последнее время вызывает большой интерес за рубежом. В России исследования в этой области ведутся в основном в области технической устойчивости, в то время как в Западной Европе рассматривают это направление шире и включают в анализ также экологическую, психологическую, социальную и экономическую устойчивость. С другой стороны, факторы, определяющие социальную устойчивость в зарубежных работах, перекликаются с факторами, используемыми при оценке качества жизни в российских исследованиях. При рассмотрении вопросов устойчивости часто возникают вопросы, связанные с концепцией устойчивого развития, разрабатываемой под руководством академика Коптюга в конце 90-х годов прошлого века – начале 2000-х этого столетия, в статье кратко проанализирована эта концепция.

При исследовании устойчивости технических систем необходимо оценивать риски как природных, так и техногенных угроз. В работах Института систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН эти угрозы до последнего времени рассматривались как угрозы энергетической безопасности. Участившиеся природные катаклизмы требуют повышенного внимания к оценке рисков их возникновения и выработке мер по их предотвращению. Особое значение имеет то, что они могут стать причиной чрезвычайных ситуаций, усугубляющихся вероятностью возникновения множественных аварий, в том числе каскадного характера, в энергетике, которая, в свою очередь, является одной из критических инфраструктур, напрямую влияющих на качество жизни населения.

Необходимо учитывать цели энергетического перехода, которые предусматривают широкомасштабное внедрение возобновляемых источников энергии, а также процесс децентрализации энергосистемы, при этом возникают дополнительные задачи по обеспечению надежности. Кроме того, весьма актуальны недостаточно изученные вопросы использования возобновляемых энергетических ресурсов на охраняемых природных территориях, одной из которых в России является центральная экологическая зона Байкальской природной территории, и исследование устойчивости этой территории с экологической точки зрения. Совместное изучение этих вопросов приводит к необходимости привлечения такого показателя, как качество жизни населения.

Постановка задачи интеграции исследований устойчивости энергетических и социо-экологических систем на основе методов искусственного интеллекта была выполнена совместно с коллегами из Международного института прикладного системного анализа (Австрия) [1, 2]. Актуальность проекта определяется необходимостью выполнения междисциплинарного исследования, базирующегося

на системном анализе факторов как природного, так и техногенного характера, влияющих на устойчивость энергетических и экологических систем и их способность для адаптации к существующим и возникающим угрозам.

Результаты исследования и их обсуждение. В настоящей статье рассматриваются результаты проекта, выполняемого при поддержке Российского научного фонда № 22-21-00841: «Адаптация и развитие методов и инструментальных средств ситуационного управления и искусственного интеллекта для исследований устойчивости энергетических и экологических систем». Для выполнения системного анализа в рамках этого проекта требуются разработка, адаптация и интеграция соответствующих методов и применение современных информационных технологий, которыми могут быть, например, интеллектуальные информационные технологии (в частности, когнитивное моделирование и вероятностное: моделирование (на основе Байесовских сетей доверия)), разрабатываемые и используемые в нашем научном коллективе ИСЭМ СО РАН (отдел «Системы искусственного интеллекта в энергетике»).

1. Концепция устойчивого развития и исследования устойчивости. Концепция устойчивого развития возникла в процессе осмысления причин глобального экологического кризиса и выработки мер по его разрешению и развивалась под эгидой ООН и международных неправительственных организаций (первоначально Римского клуба), сейчас продолжается ее развитие под эгидой ООН [3].

Значимый вклад в исследование вопросов, связанных с конкретизацией концепции устойчивого развития и ее осуществлением на практике в социальной жизни как на международном уровне, так и особенно в России, внес академик В. А. Коптюг (1931–1997), который с 1980-х гг. возглавлял Сибирское отделение АН СССР (впоследствии – Российской академии наук) и в качестве приоритетных задач ставил задачи исследования и развития методологии, направленной на решение экологических проблем, существующих в сибирских регионах, в частности, исследований и мер защиты уникальной экосистемы озера Байкал. Девизом этих исследований было его утверждение, что концепция устойчивого развития должна быть направлена на то, чтобы «жить самим и давать жить нашим детям».

Сама постановка задачи разработки концепции устойчивого развития подвергалась серьезной критике со стороны ученых, которые полагали, что устойчивое развитие невозможно в принципе. Так, академик Н. Н. Моисеев высказывал мнение, что русский перевод английского выражения «sustainable development» является некорректным, ведь если осмыслить значение этой фразы в русском переводе, то устойчивое развитие невозможно в принципе, поскольку само понятие «развитие» означает дестабилизацию как объекта развития, так и условий его развития.

Во время перестройки, отказавшись войти в рабочую группу по разработке концепции перехода России к устойчивому развитию при правительстве Российской Федерации (это произошло из-за неготовности правительства отнес-

тись к этому делу всерьез), В. А. Коптюг тем не менее не мог отказаться, будучи общественным деятелем и Председателем Сибирского Отделения РАН, от участия в экспертной оценке документов, разработанных этой рабочей группой.

В заключении, представленном В. А. Коптюгом, которое было одобрено на заседании Президиума Сибирского Отделения РАН (в феврале 1995 г.), был сделан вывод о том, что в данном проекте концепции говорится только об экологических аспектах устойчивого развития, в то время как социальный и экономический аспекты во внимание приняты не были. Очевидно, это было сделано по идеологическим соображениям: из-за несоответствия между социально-экономическим курсом «перестройки» (т. е. неолиберальной политики) и проблемами, которые мог вызвать переход к устойчивому развитию. Таким образом, проект получил неудовлетворительную оценку и требовал полного пересмотра.

В. А. Коптюг обосновывал свою точку зрения о том, что капитализм по своей сути не совместим с фундаментальными требованиями устойчивого развития, тем, что идеологи капиталистической системы, прокламируя эффективность развитых капиталистических стран, не хотят понять, что эта эффективность является эквивалентом эффекта от эксплуатации развивающихся стран. Академик подчеркивал, что «модель развития, используемая развитыми странами, более неприемлема, в особенности из-за того, что она требует сначала достижения высокого уровня экономического развития и только затем использования накопленного капитала для значительного улучшения отношения к окружающей среде».

Чтобы концепция устойчивого развития закрепилась в научной и общественной жизни России, была способной «пережить» политику «перестройки» и облегчить переход на новый, устойчивый путь развития, В. А. Коптюг инициировал написание коллективной монографии, содержащей в себе всесторонний анализ проблем перехода страны к устойчивому развитию, сделанный на основе его проекта, и организовал в Москве всероссийскую научную конференцию, посвященную этим проблемам. Монография, названная «Новая парадигма развития России в XXI веке. Комплексные исследования проблем устойчивого развития: идеи и результаты», созданная большой группой ведущих авторитетных ученых разных специальностей, была опубликована уже после смерти В. А. Коптюга (2000), но, как было отмечено в книге, он был главным редактором и автором этого исследования [4].

Постановка проблемы исследований устойчивости, рассматриваемая в этой статье, конечно, не так глобальна, как концепция устойчивого развития, но тем не менее багаж, наработанный в свое время, безусловно, полезен и может быть использован для обоснования необходимости интеграции исследований устойчивости энергетических, социо-экологических и социо-экономических систем, выполненной, например, в [2].

В этой статье мы ограничимся рассмотрением проблем устойчивости взаимосвязанных энергетических и экологических систем. Рассмотрим определения устойчивости (Resilience), приведенные в докладе Международного инсти-

тута прикладных системных исследований (МИПСА) (Австрия, Лаксенбург), подготовленном для Центра виртуальных компетенций и тренинга по защите критических энергетических сетей от природных и техногенных катастроф (Virtual Competency and Training Center on the Protection of Critical Energy Networks from Natural and Man-Made Disasters), созданного на базе Организации по Безопасности и Сотрудничеству в Европе (ОБСЕ) (нами был подготовлен раздел в этот доклад, названный «Russian approach to resilience») (2019 г.).

Концепция устойчивости не имеет уникального определения из-за ее широкого использования в разных областях с различными значениями и последствиями, например, [5–8], их анализ выполнен в [9]. Рассмотрим некоторые из них:

устойчивость часто определяется как способность системы возвращаться к равновесию, или скорее способность вернуться к равновесию и развиваться, несмотря на дальнейшие толчки и нарушения;

устойчивость может быть связана со способностью выдерживать стресс и «приходить в норму»;

устойчивость может быть способностью достижения некоторых новых стадий динамического равновесия после шока, готовности к динамическим, межмасштабным взаимодействиям парной системы: человек – окружающая среда.

Одно из самых популярных определений (Davoudi, 2012): «Устойчивость – это способность системы возвращаться к равновесию или устойчивому состоянию после возмущения, такого, как наводнения, землетрясения или другие стихийные бедствия, а также техногенные катастрофы, такие, как банковские кризисы, войны или революции» [10].

Для экологических систем устойчивость – мера постоянства экосистем и их способности адаптироваться к изменениям и нарушениям и по-прежнему поддерживать одни и те же отношения между населением или государством (Holling, 1996) [11].

Таким образом, устойчивость (Resilience) представляет собой способность системы возвращаться к равновесному состоянию после временного нарушения: чем быстрее она возвращается к равновесию и чем меньше теряет, тем более устойчивой она является. Возможно, именно поэтому корень термина «устойчивость» или «упругость» в латинском слове «Resilio», что означает «отскочить назад». В более общем смысле устойчивость означает способность восстанавливаться от (или сопротивляться) после некоторого шока, оскорбления или беспокойства. Уровень устойчивости пропорционален скорости возвращения назад (восстановления).

2. Предлагаемые подходы и методы для исследований устойчивости энергетических систем (ситуационное управление и семантическое моделирование).

Авторами выполнялось развитие современной трактовки концепции ситуационного управления, предложенной в 1980-х гг. Д. А. Поспеловым [12]. В качестве основных методов ситуационного управления предлагались методы ситуационного анализа, ситуационного моделирования, визуальной аналитики

и когнитивной графики. Для реализации этих методов был разработан спектр инструментальных средств семантического моделирования (онтологического, когнитивного, событийного и вероятностного (на основе байесовских сетей доверия) [13, 14]. Подход, основанный на концепции ситуационного управления, применялся коллективом под руководством авторов для исследований проблем энергетической безопасности (ЭБ) и построения интеллектуальной системы поддержки принятия решений для исследований и обеспечения ЭБ [15].

При постановке проблемы исследований устойчивости (Resilience) энергетических систем выполнена адаптация концепции ситуационного управления к этим исследованиям [2]. Предлагается, по аналогии с исследованиями ЭБ, рассматривать и моделировать ситуации в шкале «норма – предкризис – кризис» (НПК) с учетом возмущений и предлагаемых мероприятий по их предотвращению (для критических – предкризисных ситуаций) или ликвидации последствий чрезвычайных кризисных ситуаций. В качестве критериев устойчивости предлагается использовать индикаторы ЭБ, определяющие принадлежность ситуаций к интервалам шкалы НПК [16].

На первом этапе ситуации моделируются с использованием инструментальных средств семантического моделирования: онтологий, описывающих структуру ситуации (концепты и отношения между ними) и когнитивных моделей, описывающих причинно-следственные связи между концептами. Использование семантического моделирования позволяет получить качественную оценку ситуаций и возможностей возвращения системы в устойчивое состояние [17, 18]. Примеры онтологий и когнитивных моделей будут приведены ниже.

На втором этапе для получения количественных оценок формируются сценарии возмущений, которые передаются в программный комплекс для прогнозирования развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) – ПК ИНТЭК-А, реинжиниринг которого выполнен под руководством авторов [19] (его описание приведено в следующем разделе). До последнего времени эта операция выполнялась вручную, сейчас ведется работа по ее автоматизации.

Таким образом, адаптация концепции ситуационного управления к исследованиям устойчивости позволяет использовать весь спектр методов и инструментальных средств, разработанных ранее (рис. 1), и выполнять их развитие, усовершенствование и применение. Рассмотрены предлагаемые подходы и методы для исследований устойчивости энергетических систем (ситуационное управление и семантическое моделирование). В таблице приведено сравнение технологий онтологического, когнитивного и событийного и вероятностного (на основе Байесовских сетей доверия) моделирования.

На рис. 2 приведена архитектура интеллектуальной ИТ-среды, интегрирующей инструментальные средства семантического моделирования и ПК ИНТЭК, который предлагается использовать для исследований устойчивости энергетических систем в составе топливно-энергетического комплекса (ТЭК) (результат его реинжиниринга рассмотрен ниже).

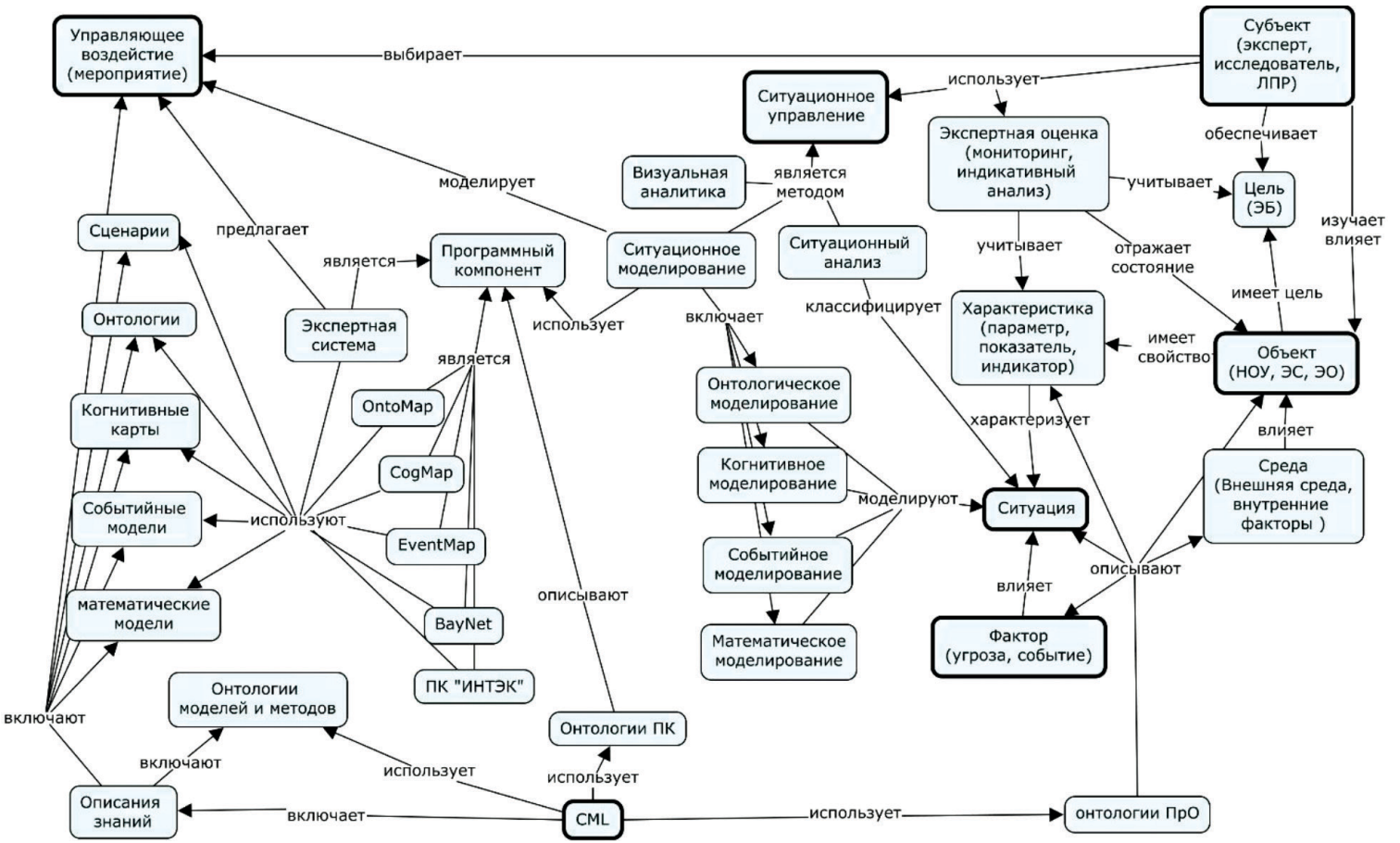


Рис. 1. Метаонтология пространства знаний для ситуационного управления в энергетике

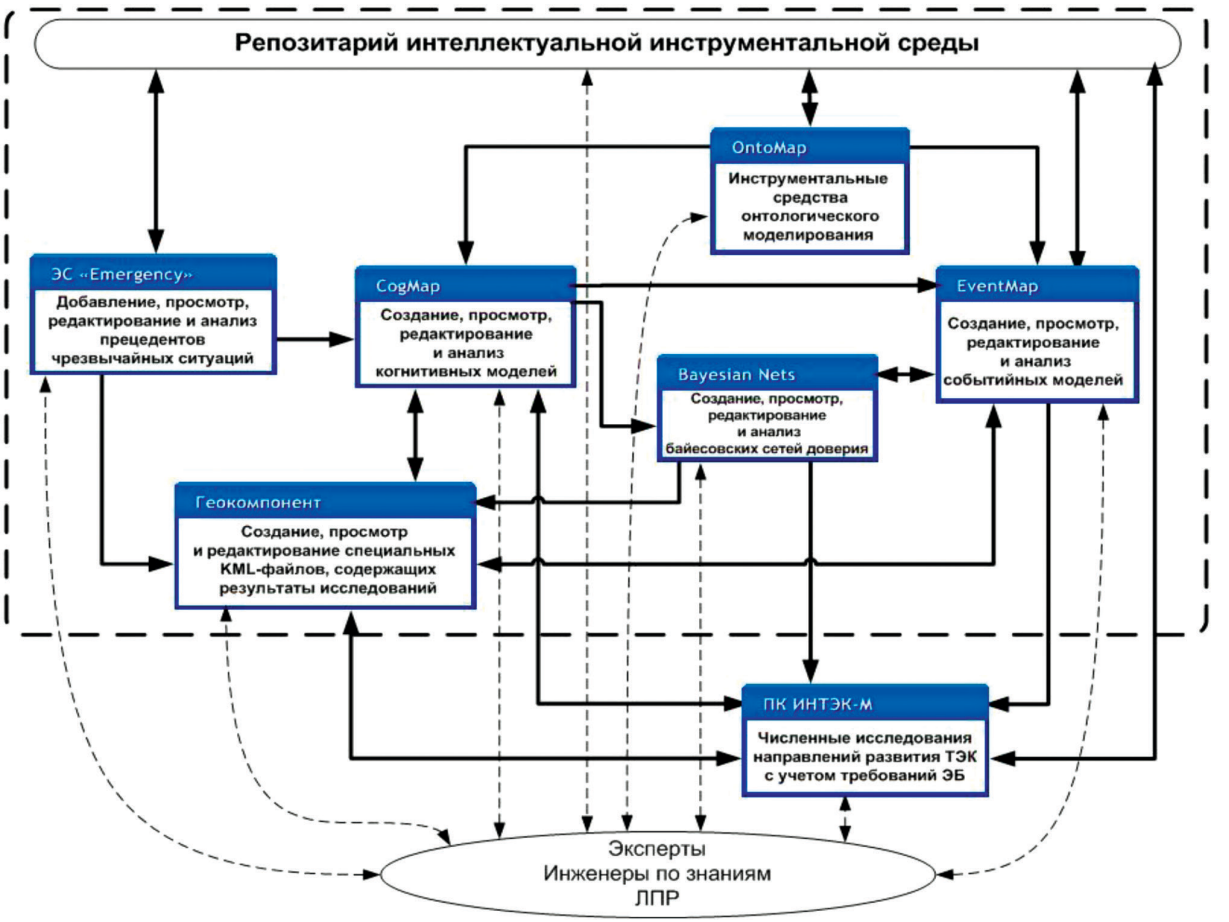


Рис. 2. Архитектура интеллектуальной ИТ-среды, интегрирующей средства семантического и математического моделирования

В качестве критериев устойчивости предлагаются:

для энергетических систем – обеспеченность энергоресурсами требуемого качества и в нужном объеме (количественные – индикаторы энергетической безопасности);

для экологических систем: количественные – значения ПДК, качественные, например, общая и удельная (на человека и ВВП) эмиссия CO_2; тенденция выбросов парниковых газов; эффективность производства и потребления энергии; доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и АЭС и др.;

для социальных систем – основные показатели качества жизни: экология, здоровье, социальные отношения, самореализация (труд, образование), безопасность, эмоциональное и финансовое благополучие; обеспеченность энергетическими ресурсами.

Для описания качественных критериев нами предлагаются средства семантического моделирования, в первую очередь онтологическое, когнитивное и вероятностное, в таблице приводится их сравнение.

Сравнение технологий онтологического, когнитивного и событийного моделирования

Технология	Назначение	Аппарат для формализованного представления	Использование в исследованиях энергетической безопасности
Онтологическое моделирование	Для описания декларативных фрагментов знаний	Онтологии (Специальные языки (OWL, RDF, XML и др.))	Для выявления, классификации и спецификации концептов (основных понятий в исследованиях энергетики)
Когнитивное моделирование	Для выявления причинно-следственных связей концептов	Когнитивные карты (теория графов)	Для анализа угроз ЭБ
Событийное моделирование	Построение поведенческих моделей. Выявление динамики развития ЧС	Событийные карты (Теория Joiner-сетей)	Для анализа развития и последствий ЧС
Байесовские сети доверия	Построение вероятностных моделей. Оценка риска реализации угроз	Аппарат Байесовских сетей доверия	Для оценки рисков возникновения ЧС

3. Инструментальные средства исследований устойчивости энергетических и экологических систем.

Ниже приведен алгоритм интеграции онтологического, когнитивного и математического моделирования топливно-энергетического комплекса (ТЭК) в исследованиях устойчивости энергетических систем.

I. Формирование технико-экономической модели (в ПК ИНТЭК-А).

II. Формирование системы онтологий для технико-экономической модели.

2.1. Определение концептов, соответствующих элементам технико-экономической модели и элементам балансовых таблиц (автоматически).

2.2. Формирование концептов факторов угроз.

2.3. Установление связей между концептами.

III. Формирование когнитивной карты угроз ЭБ района.

3.1. Формирование концептов и связей при помощи онтологий (автоматически).

3.2. Установление значений связей.

IV. Расчет при помощи когнитивной карты:

4.1. Расчет базового варианта ТЭК (автоматически).



Рис. 3. Многоагентная архитектура ПК ИНТЭК-А

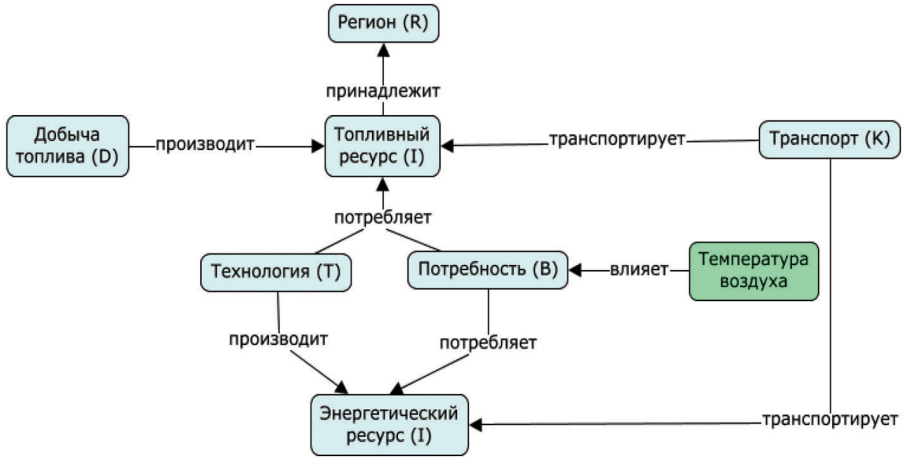


Рис. 4. Онтология технико-экономической модели ТЭК

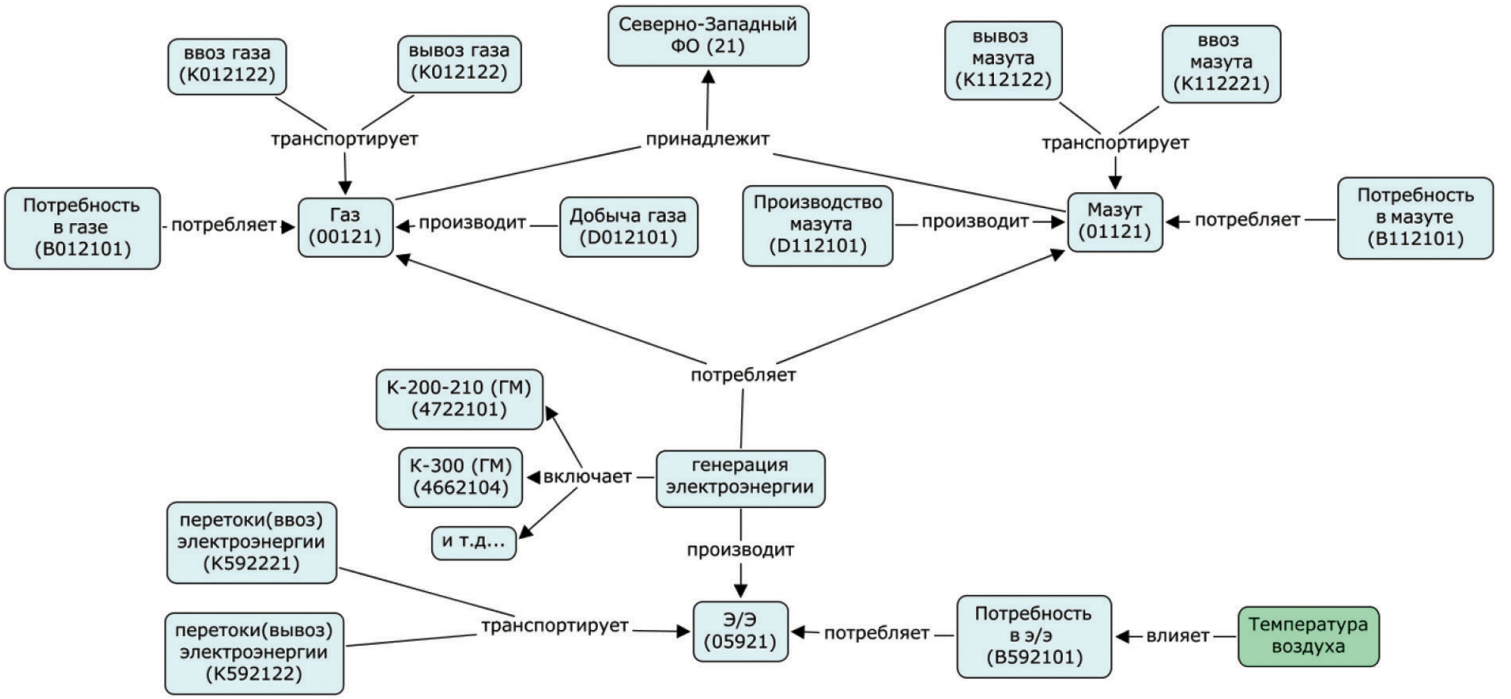


Рис. 5. Фрагмент онтологии, описывающей зависимость потребления энергоресурсов от температуры воздуха

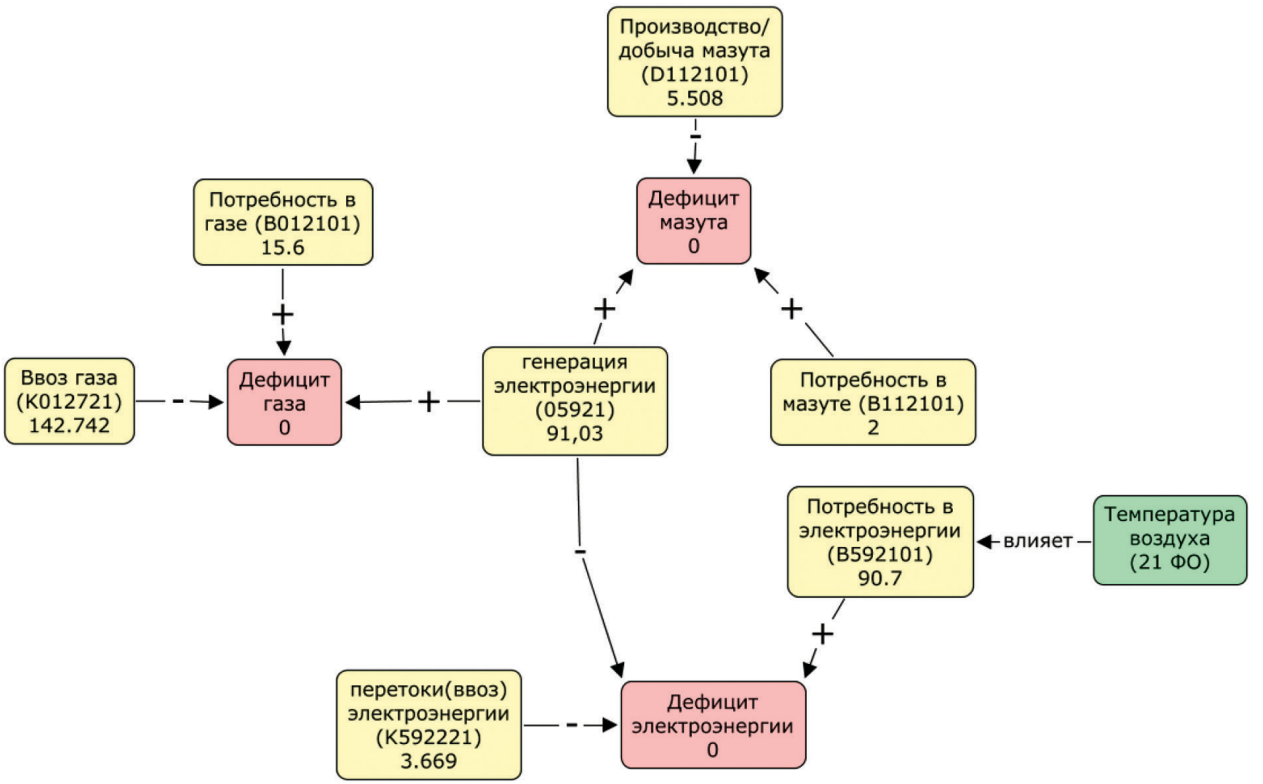


Рис. 6. Когнитивная карта угрозы похолодания, иллюстрирующая зависимость потребления энергоресурсов от температуры воздуха

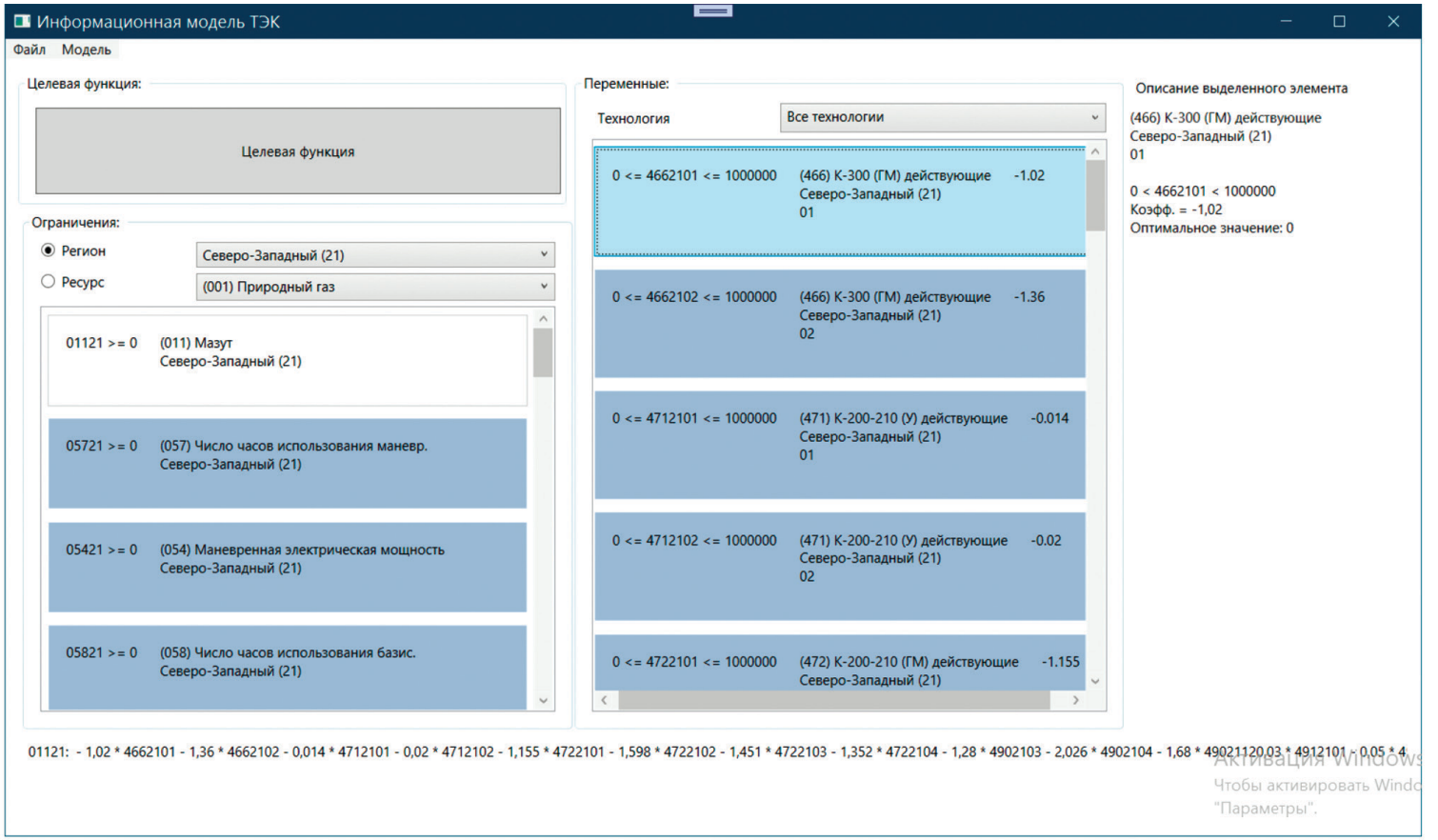


Рис. 7. Пример интерфейса ПК ИНТЭК-А при формировании информационной модели

4.2. Корректировка технико-экономической модели при помощи когнитивной карты.

V. Расчет варианта развития ТЭК (автоматически).

VI. Интерпретация результата (автоматически).

Для реализации этого алгоритма выполнен реинжиниринг ПК ИНТЭК (разработана многоагентная версия ПК ИНТЭК-А) (рис. 3) [19, 20].

С помощью ПК ИНТЭК решается общая задача линейного программирования с использованием технико-экономической модели ТЭК, на рис. 4 приведена онтология этой модели. На рис. 5 показан фрагмент онтологии, описывающей зависимость потребления энергоресурсов от температуры воздуха, на рис. 6 – когнитивная карта угрозы похолодания для этого фрагмента онтологии, на рис. 7 – пример интерфейса ПК ИНТЭК-А.

Для исследований устойчивости экологических систем (с учетом влияния объектов энергетики) на этом этапе предлагается использование разработанной под руководством авторов Web-ориентированной информационно-вычислительной системы (ИВС WICS) для оценки влияния объектов энергетики на загрязнение окружающей среды [21, 22]. На рис. 8 приведена архитектура этой системы, на рис. 9 – пример интерфейса.

Комментарии к архитектуре ИВС WICS (подсистема выполнения расчетов):

- IS PEF – реализует расчеты количественных показателей выбросов ЗВ от объекта энергетики на основании нормативных методик;
- IS EMS – реализует расчеты рассеивания ЗВ на основании нормативных методик с использованием результатов, полученных от подсистемы IS PEF;
- IS SMP – обеспечивает работу пользователя с результатами анализа проб снега;

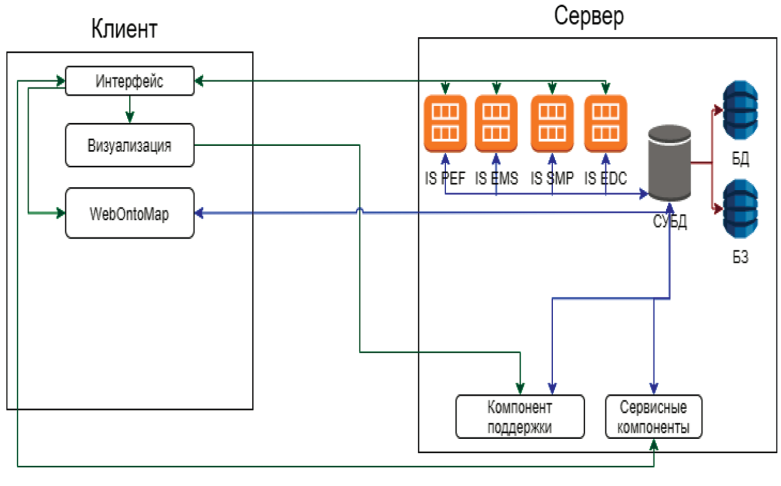


Рис. 8. Архитектура Web-ориентированной информационно-вычислительной системы (ИВС WICS)

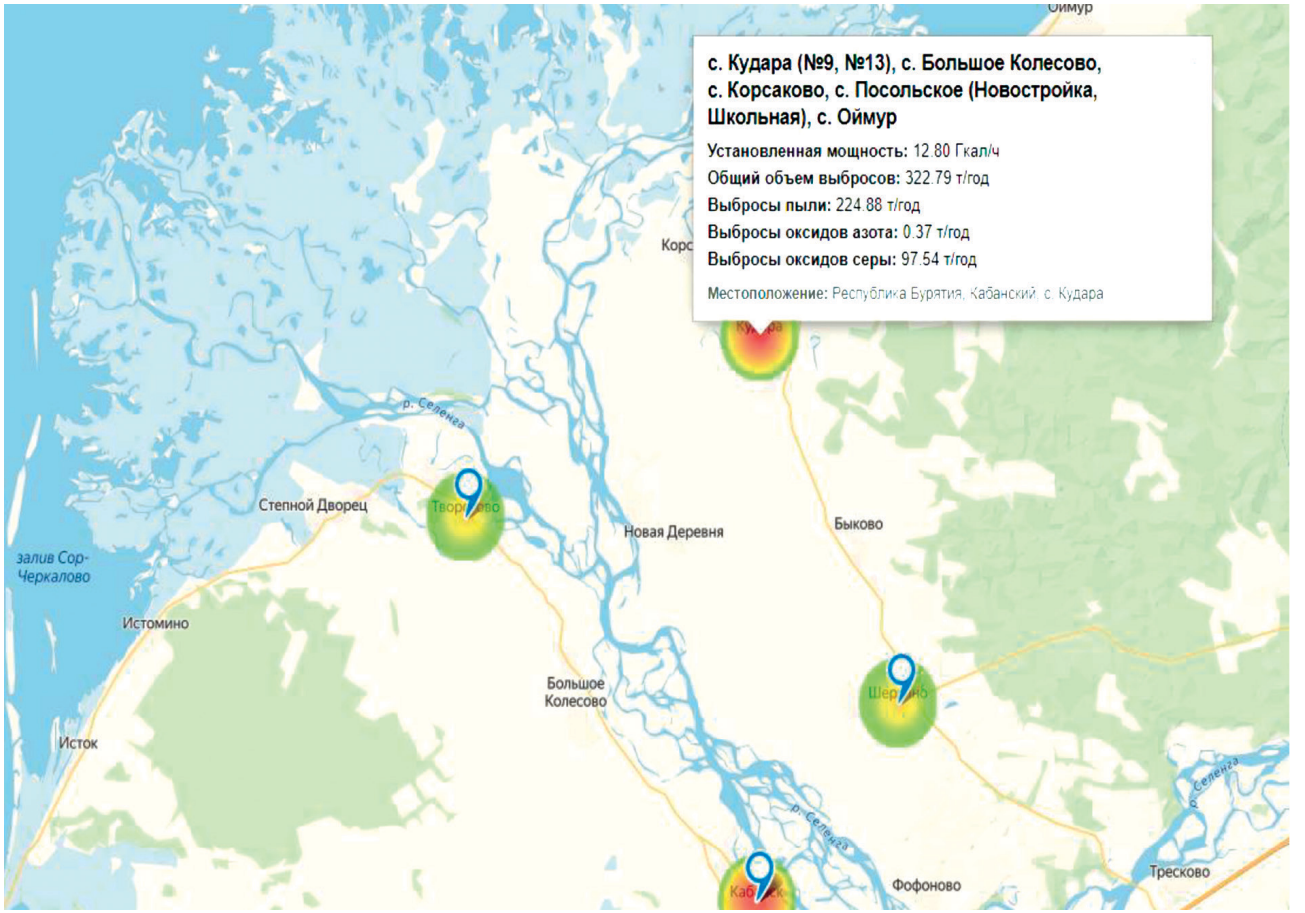


Рис. 9. Пример интерфейса ИВС WICS (геовизуализация результатов расчетов)

▪ IS EDC – обеспечивает работу с расчетами экономических ущербов на основе существующих методик и использует результаты расчетов, полученные от подсистемы IS PEF.

▪ БД – база данных, БЗ – база знаний.

Заключение. В статье рассмотрен предлагаемый методологический подход к исследованиям устойчивости энергетических систем на основе концепции ситуационного управления и интеграции семантического и математического моделирования.

Выполнено сравнение концепции устойчивого развития, разрабатываемой и применяемой в свое время в России под руководством академика В. А. Коптюга (ее развитие продолжается в настоящее время под эгидой ООН), и исследований устойчивости. В рамках постановки рассматриваемой проблемы эта концепция может быть использована для обоснования необходимости интеграции исследований устойчивости энергетических, социо-экологических и социо-экономических систем. Рассмотрены основные понятия устойчивости энергетических и экологических систем в смысле Resilience.

Выполненная авторами адаптация концепции ситуационного управления Д. А. Поспелова к исследованиям устойчивости (Resilience) энергетических и экологических систем позволяет использовать, после некоторой адаптации, весь спектр методов и инструментальных средств, разработанных авторами и под их руководством и примененных ранее для исследований проблемы энергетической безопасности. Рассмотрены предлагаемые подходы и методы для исследований устойчивости энергетических систем (ситуационное управление и семантическое моделирование). Приведены сравнение технологий семантического моделирования и архитектура поддерживающей их интеллектуальной ИТ-среды, а также алгоритм интеграции онтологического, когнитивного и математического моделирования в исследованиях устойчивости энергетических систем и многоагентная архитектура поддерживающего этот алгоритм ПК ИНТЭК-А. Показаны примеры онтологий и когнитивная карта, обрабатываемые с помощью ПК ИНТЭК-А, и пример интерфейса этого ПК.

Для исследований устойчивости экологических систем (с учетом влияния объектов энергетики) предлагается использовать разработанную под руководством авторов Web-ориентированную информационно-вычислительную систему (ИВС WICS) для оценки влияния объектов энергетики на загрязнение окружающей среды, приведены архитектура и пример интерфейса этой системы.

Результаты получены при финансовой поддержке Российского фонда научных исследований, грант № 22-21-00841 (2022–2023 гг.).

Список использованных источников

1. Массель, Л. В. Оценка рисков природных и техногенных угроз устойчивости энергетических, экологических и социальных систем на основе интеллектуальных информационных технологий / Л. В. Массель, Н. П. Комендантова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – № 4 (16). – С. 31–45.

2. Массель, Л. В. Подход к исследованиям устойчивости энергетических и экологических систем на основе интеллектуальных информационных технологий / Л. В. Массель, А. Г. Массель, Н. П. Комендантова // Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь: состояние и перспективы : Междунар. науч. конф., Минск, 1– 2 окт. 2020 г. : сб. докл. / ред. Т. Г. Зорина. – Минск : Беларус. навука, 2020. – С. 33–43.

3. ООН и Устойчивое Развитие [Электронный ресурс] // Организация Объединенных Наций. – Режим доступа : https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals. – Дата доступа : 07.11.2022.

4. Коптюг, В. А. Новая парадигма развития России: комплексные исследования проблем устойчивого развития / В. А. Коптюг, В. М. Матросов, В. К. Левашов. – 2-е изд. – М. : Academia, 2000. – 459 с.

5. Nan, C. Building an integrated metric for quantifying the resilience of interdependent infrastructure systems / C. Nan, G. Sansavini, W. Kroeger // 9th Intern. Conf. on Critical Information Infrastructure Security, Cyprus, oct. 13–15, 2014 / Lecture Notes in Computer Science. – Cyprus, 2014. – Vol. 8985. – P. 159–171.

6. Massoud, A. Challenges in reliability, security, efficiency, and resilience of energy infrastructure: Toward smart self-healing electric power grid / A. Massoud // Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century General Meeting, Pittsburg (USA), July 20–24, 2008. – Pittsburg, 2008. – P. 5.

7. Sadeghi, M. Energy risk management and value at risk modeling / M. Sadeghi, S. Shawalpour // Energy Policy. – 2006. – № 34. – P. 3367–3373.

8. Research on resilience of power systems under natural disasters – A review / W. Yezhou [et al.] // IEEE Trans. Power Syst. – 2016. – Vol. 31, № 2. – P. 1604–1612.

9. Zhonglin, W. Analysis of the definitions of resilience / W. Zhonglin, M. S. Nistor, S. W. Pickl // IFAC 20th World Congress, Toulouse (France), July 9–14, 2017. – P. 11136–11144.

10. Davoudi, S. Resilience: A Bridging Concept or a Dead End / S. Davoudi // Planning Theory and Practice. – 2012. – № 13 (2). – P. 299–307.

11. Holling, C. Engineering Resilience Versus Ecological Resilience / C. Holling // Engineering Within Ecological Constraints / ed. Peter Schultz, National Academy Press, Washington D. C., 1996. – P. 31–43.

12. Поспелов, Д. А. Ситуационное управление. Теория и практика / Д. А. Поспелов. – М. : Наука, 1986. – 284 с.

13. Массель, Л. В. Интеллектуальные вычисления в исследованиях направлений развития энергетики / Л. В. Массель, А. Г. Массель // Изв. Том. политех. ун-та. – 2012. – Т. 321, № 5. – С. 135–141.

14. Massel, A. G. Dynamic cognitive maps for the substantiation of strategic decisions on management of energy sector development / A. G. Massel // Publisher: Scientific Technical Union of Mechanical Engineering «Industry 4.0». – 2018. – Iss. 4. – P. 190–193.

15. Массель, Л. В. Методы и средства ситуационного управления в энергетике на основе семантического моделирования / Л. В. Массель, А. Г. Массель // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2015), Минск, 19–21 февр. 2015 г. : сб. ст. / БГУИР. – Минск, 2015. – С. 199–204.

16. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / Н. И. Пяткова [и др.]. – Новосибирск : Наука, 2011. – 211 с.

17. Ворожцова, Т. Н. Семантическое моделирование в исследованиях устойчивости энергетических и социо-экологических систем / Т. Н. Ворожцова, Д. В. Пестерев, В. Р. Кузьмин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2021. – № 4 (24). – С. 31–43.

18. Массель А. Г. Применение методов когнитивного моделирования для анализа угроз энергетической безопасности / А. Г. Массель, Н. И. Пяткова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2020. – № 4 (20). – С. 24–33.

19. Мамедов, Т. Г. Адаптация методики реинжиниринга унаследованного программного обеспечения / Т. Г. Мамедов, А. Г. Массель // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2021. – № 4 (24). – С. 88–99.

20. Массель, А. Г. Технология вычислительного эксперимента в исследованиях работы энергетических отраслей при реализации угроз энергетической безопасности / А. Г. Массель, Т. Г. Мамедов, Н. И. Пяткова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2021. – № 3 (23). – С. 62–73.

21. Кузьмин, В. Р. Разработка информационной подсистемы для расчета и визуализации вредных выбросов от объектов энергетики / В. Р. Кузьмин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2020. – № 1 (17). – С. 142–154.

22. Кузьмин, В. Р. Оценка влияния выбросов от объектов энергетики на Байкальскую природную территорию / В. Р. Кузьмин, М. С. Зароднюк, Л. В. Массель // iPolitech Journal. – 2022. – Т. 26, № 1. – С. 70–80.

References

1. Massel’, L. V. Ocenka riskov prirodnyh i tekhnogennyh ugroz ustojchivosti energeticheskih, ekologicheskih i social’nyh sistem na osnove intellektual’nyh informacionnyh tekhnologij / L. V. Massel’, N. P. Komendantova // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. – 2019. – № 4 (16). – S. 31–45.

2. Massel’, L. V. Podhod k issledovaniyam ustojchivosti energeticheskih i ekologicheskih sistem na osnove intellektual’nyh informacionnyh tekhnologij / L. V. Massel’, A. G. Massel’, N. P. Komendantova // Ustojchivoe razvitie energetiki Respubliki Belarus’: sostoyanie i perspektivy : Mezhdunar. nauch. konf., Minsk, 1– 2 okt. 2020 g. : sb. dokl. / red. T. G. Zorina. – Minsk : Belarus. navuka, 2020. – S. 33–43.

3. OON i Ustojchivoe Razvitie [Electronic resource] // Organizaciya Ob'edinennyh Nacij. – Mode of access : https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals. – Date of access : 07.11.2022.

4. Koptyug, V. A. Novaya paradigma razvitiya Rossii: kompleksnye issledovaniya problem ustojchivogo razvitiya / V. A. Koptyug, V. M. Matrosov, V. K. Levashov. – 2th ed. – M. : Academia, 2000. – 459 s.

5. Nan, C. Building an integrated metric for quantifying the resilience of interdependent infrastructure systems / C. Nan, G. Sansavini, W. Kroeger // 9th Intern. Conf. on Critical Information Infrastructure Security, Cyprus, oct. 13–15, 2014 / Lecture Notes in Computer Science. – Cyprus, 2014. – Vol. 8985. – P. 159–171.

6. Massoud, A. Challenges in reliability, security, efficiency, and resilience of energy infrastructure: Toward smart self-healing electric power grid / A. Massoud // Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century General Meeting, Pittsburg (USA), July 20–24, 2008. – Pittsburg, 2008. – P. 5.

7. Sadeghi, M. Energy risk management and value at risk modeling / M. Sadeghi., S. Shawalpour // Energy Policy. – 2006. – № 34. – P. 3367–3373.

8. Research on resilience of power systems under natural disasters – A review / W. Yezhou [et al.] // IEEE Trans. Power Syst. – 2016. – Vol. 31, № 2. – P. 1604–1612.

9. Zhonglin, W. Analysis of the definitions of resilience / W. Zhonglin, M. S. Nistor, S. W. Pickl // IFAC 20th World Congress, Toulouse (France), July 9–14, 2017. – P. 11136–11144.

10. Davoudi, S. Resilience: A Bridging Concept or a Dead End / S. Davoudi // Planning Theory and Practice. – 2012. – № 13 (2). – P. 299–307.

11. Holling, C. Engineering Resilience Versus Ecological Resilience / S. Holling // Engineering Within Ecological Constraints / ed.: Peter Schultz, National Academy Press, Washington D. C., 1996. – P. 31–43.

12. Pospelov, D. A. Situacionnoe upravlenie. Teoriya i praktika / D. A. Pospelov. – M. : Nauka, 1986. – 284 s.

13. Massel', L. V. Intellektual'nye vychisleniya v issledovaniyah napravlenij razvitiya energetiki / L. V. Massel', A. G. Massel' // Izv. Tom. politekhn. un-ta. – 2012. – T. 321, № 5. – S. 135–141.

14. Massel, A. G. Dynamic cognitive maps for the substantiation of strategic decisions on management of energy sector development / A. G. Massel // Publisher: Scientific Technical Union of Mechanical Engineering «Industry 4.0». – 2018. – Iss. 4. – P. 190–193.

15. Massel', L. V. Metody i sredstva situacionnogo upravleniya v energetike na osnove semanticheskogo modelirovaniya / L. V. Massel', A. G. Massel' // Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nyh sistem (OSTIS-2015), Minsk, 19–21 fevr. 2015 g. : sb. st. / BGUIR. – Minsk, 2015. – S. 199–204.

16. Energeticheskaya bezopasnost' Rossii: problemy i puti resheniya / N. I. Pyatkova [et al.]. – Novosibirsk : Nauka, 2011. – 211 s.

17. Vorozhcova, T. N. Semanticheskoe modelirovanie v issledovaniyah ustojchivosti energeticheskih i socio-ekologicheskih sistem / T. N. Vorozhcova, D. V. Pesterev, V. R. Kuz'min // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. – 2021. – № 4 (24). – S. 31–43.

18. Massel' A. G. Primenenie metodov kognitivnogo modelirovaniya dlya analiza ugroz energeticheskoj bezopasnosti / A. G. Massel', N. I. Pyatkova // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. – 2020. – № 4 (20). – S. 24–33.

19. Mamedov, T. G. Adaptaciya metodiki reinzhiniringa unasledovannogo programmnogo obespecheniya / T. G. Mamedov, A. G. Massel' // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. – 2021. – № 4 (24). – S. 88–99.

20. Massel', A. G. Tekhnologiya vychislitel'nogo eksperimenta v issledovaniyah raboty energeticheskih otraslej pri realizacii ugroz energeticheskoj bezopasnosti / A. G. Massel', T. G. Mamedov, N. I. Pyatkova // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. – 2021. – № 3 (23). – S. 62–73.

21. Kuz'min, V. R. Razrabotka informacionnoj podsistemy dlya raschyota i vizualizacii vrednyh vybrosov ot ob»ektov energetiki / V. R. Kuz'min // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. – 2020. – № 1 (17). – S. 142–154.

22. Kuz'min, V. R. Ocenka vliyaniya vybrosov ot ob»ektov energetiki na Bajkal'skuyu prirodnuyu territoriyu / V. R. Kuz'min, M. S. Zarodnyuk, L. V. Massel' // iPolitech Journal. – 2022. – T. 26, № 1. – S. 70–80.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИКИ

УДК 504.3

Е. В. Быкова[1], Т. И. Кириллова[2]

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ШАБЛОНОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭМИССИЙ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ПО ПРОТОКОЛУ РПВЗ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ САЙТЕ

[1]Кандидат технических наук, доцент, Институт энергетики, Кишинев, Республика Молдова
[2]Институт энергетики, Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Описаны цели, задачи, методы и разработанные шаблоны расчетных таблиц оценки эмиссий 28 загрязнителей по сектору «Энергетика» для представления на специальном сайте по Протоколу о Регистре выбросов и переносе загрязнителей (РВПЗ) на большие расстояния, описаны трудности в обучении экономических агентов, состояние работ и накопленный опыт.
Ключевые слова: загрязнитель, оценка, эмиссии, предприятие, сайт, шаблон.

E. V. Bicova[1], T. I. Kirillova[2]

EXPERIENCE IN DEVELOPING TEMPLATES FOR ASSESSING POLLUTANT EMISSIONS UNDER THE PRTR PROTOCOL AND PRESENTING THEM ON A SPECIALIZED WEBSITE

[1]Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Institute of Power Engineering, Kishinev, Republic of Moldova
[2]Institute of Power Engineering, Kishinev, Republic of Moldova

Annotation. The goals, objectives, methods and developed templates for calculation tables for assessing 28 pollutant emissions in the Energy sector for presentation on a special website under the Protocol on Pollutant Release and Transfer Registers, difficulties in training economic agents, state of works and experience gained are described.
Keywords: pollutant, assessment, emissions, enterprise, site, template.

Введение. На конференциях министров окружающей среды «Окружающая Среда для Европы» (ОСЕ) – международных форумах стран Европейской экономической комиссии ООН – обсуждаются вопросы охраны окружающей среды и экологические проблемы. Перечень заседаний и их основная тематика приведены в табл. 1.

На четвертой конференции ОСЕ 23–25 июня 1998 г. министры приняли Конвенцию «О доступе к информации, участии общественности в процессе

Таблица 1. **Список конференций Министров окружающей среды «Окружающая среда для Европы», 1991–2016 гг. [1]**

Место проведения	Время проведения	Что обсуждалось и (или) было принято
Добриш, Чехословакия	21–23 июня 1991 г.	На конференции обсуждались пути укрепления сотрудничества в целях защиты и улучшения состояния окружающей среды, долгосрочные стратегии европейской экологической программы. В частности, было озвучено, что каждая страна должна нести ответственность за глобальные экологические проблемы
Люцерна, Швейцария	28–30 апреля 1993 г.	Программа действий по охране окружающей среды для Центральной и Восточной Европы (ПДООС)
София, Болгария	23–25 октября 1995 г.	Панъевропейская стратегия по биологическому и ландшафтному разнообразию (ПЕБЛДС). Руководящие принципы по обеспечению доступа к экологической информации и участию общественности в процессе принятия решений в области охраны окружающей среды
Орхус, Дания	23–25 июня 1998 г.	Конвенция о доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды (Орхусская конвенция)
Киев, Украина	21–23 мая 2003 г.	Принято три Протокола: по регистрам выбросов и переноса загрязнителей к Конвенции о доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды; по стратегической экологической оценке; по гражданской ответственности. Одобрена Экологическая стратегия для стран Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии (ВЕКЦА), намечены основные механизмы развития Водной инициативы Европейского Союза для стран ВЕКЦА
Белград, Сербия	10–12 октября 2007 г.	Результаты оценены и принято решение о необходимости реформы процесса «Окружающая среда для Европы»
Астана, Казахстан	21–23 сентября 2011 г.	Приняты следующие документы: Водная инициатива Астаны по управлению водными ресурсами и связанными с водой экосистемами, Программа партнерства «Зеленый мост»
Батуми, Грузия	8–10 июня 2016 г.	Основные итоги конференции: панъевропейские стратегические рамки по экологизации экономики; батумская инициатива по «зеленой» экономике (BIG-E); батумская акция по более чистому воздуху (BACA); батумское заявление министров по вопросам образования в интересах устойчивого развития; рамочная основа будущей реализации Стратегии образования в интересах устойчивого развития ЕЭК ООН

принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды» (Орхусская конвенция) [2]. В Руководстве по осуществлению Орхусской конвенции отмечено, что «...если в большинстве случаев многосторонние соглашения в области окружающей среды охватывают обязательства, которые Стороны несут друг перед другом, то Орхусская конвенция охватывает обязательства, которые Стороны несут перед общественностью. Она идет дальше, чем любая иная конвенция, в том плане, что она налагает на Стороны и государственные органы четкие обязательства перед общественностью в части обеспечения ей доступа к информации, участия в процессе принятия решений и доступа к правосудию» (конец цитаты).

Протокол по регистрам выбросов и переноса загрязнителей [3] был принят на пятой конференции ОСЕ 21–23 мая 2003 г. Его цель состоит в том, чтобы «...расширить доступ общественности к информации путем создания согласованных общенациональных регистров выбросов и переноса загрязнителей (РВПЗ)». Протокол подписывается странами и требует периодической отчетности перед секретариатом Конвенции.

Республика Молдова ратифицировала Конвенцию «О доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды» Постановлением Парламента № 346 от 7 апреля 1999 г. (вступило в силу 22.04.1999 г.) [4].

Молдова ратифицировала Протокол по регистрам выбросов и переноса загрязнителей к данной Конвенции Законом Парламента № 99 от 26 апреля 2013 г. (вступил в силу 14.06.2013 [5]).

Национальные отчеты Молдовы об осуществлении Протокола для каждого отчетного цикла можно найти через поисковую систему https://prtr.unece.org/national-reports/reports (2014, 2017, 2021 гг.) [6].

Для реализации Протокола было принято Постановление Правительства о Национальном регистре выбросов и переноса загрязнителей № 373, которое вступило в силу 27.04.2018 г. [7].

Этот документ содержит технический концепт автоматизированной информационной системы «Национальный регистр выбросов и переноса загрязнителей», Положение «О Национальном регистре выбросов и переноса загрязнителей», а также 5 приложений:

виды экономической деятельности (9 секторов и 65 видов);

загрязнители (102 загрязнителя, химические формулы и требования к отчетности – конвенция, протокол, директива);

форма для представления данных о выбросах и переносах для экономических агентов;

список методов измерения и расчетов, утвержденный на международном и национальном уровнях для загрязняющих веществ в воздухе и воде;

образец уведомления в отношении невозможности доступа к данным и их передачи в Национальный регистр выбросов и переноса загрязнителей.

Для помощи экономическим агентам разработано и утверждено Руководство по внедрению Национального регистра выбросов и переноса загрязнителей (приказ Министерства сельского хозяйства, регионального развития и окружающей среды № 190 от 07.08.2019 г. [8]).

Материалы и методы исследования. Международный проект по «Внедрению Регистра выбросов и переноса загрязнителей в качестве инструмента для отчетности, распространения и информирования о стойких органических загрязнителях для Беларуси, Камбоджи, Эквадора, Казахстана, Молдовы и Перу» (Global Project on the Implementation of PRTRs as a tool for POPs reporting, dissemination and awareness raising for Belarus, Cambodia, Ecuador, Kazakhstan, Moldova and Peru) продолжался с 2017 по 2019 г. [9].

Цели проекта состояли в разработке специализированного сайта, на котором отражались бы показатели выбросов загрязняющих веществ от конкретных предприятий, которые распределяются по приложению 1 из Регистра РВПЗ. В нем имеются 9 разделов и 65 позиций: энергетика, металлургическая промышленность (черные и цветные металлы), сельское хозяйство и другие по руководству РВПЗ [10].

Учет выбросов загрязняющих веществ осуществляется для перечня загрязнителей, которые регламентированы международными правовыми документами.

В проекте был принят список оцениваемых загрязнителей по номенклатуре NFR конвенции CLRTAP [11] (25 загрязняющих веществ) и конвенции UNFCCC [12] (три парниковых газа), т. е. всего 28 загрязняющих веществ.

Основными задачами являлись разработка расчетных таблиц для всех загрязняющих веществ и для всех категорий, обучение представителей экономических агентов работе с ними, размещение таблиц на специальном сайте, отображение на географической карте.

В результате работы над проектом (с участием авторов) в Республике Молдова было сделано:

описание видов экономической деятельности (Приложение I к Положению о Национальном регистре выбросов и переноса загрязнителей) и отдельные файлы по каждому виду экономической деятельности;

систематизация кодов категорий экономической деятельности по номенклатуре отчетности (NFR) и статистических кодов экономической деятельности в Молдове (CAEM);

перечень загрязнителей (Приложение 2 к Положению о Национальном регистре выбросов и переноса загрязнителей) и таблицы загрязняющих веществ по видам экономической деятельности в разбивке по секторам (Приложение I Руководства по внедрению Национального регистра выбросов и переноса загрязнителей);

excel-шаблоны для оценки выбросов от секторов Energy, Metal Production, Chemical Industry & Other activities и других для онлайновой отчетности.

Соответствие категорий по трем разным конвенциям для одного сектора («Энергетика») приведено в табл. 2.

Таблица 2. **Таблица соответствий категорий по трем конвенциям для сектора «Энергетика»**

PRTR Protocol on Pollutant Release and Transfer Registers to the Convention on Access to Information, Public Participation in Decision-making and Access to Justice in Environmental Matters [10]	EMEP European Monitornig and Evaluation Program (EMEP) under the Convention on long-range transboundary air pollution CLRTAP [11, 13]	IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) under the United Nations Framework Convention on Climate Change UNFCCC [12, 14]
Energy sector:	1_Public Power_	1 Energy:
a) Mineral oil and gas refineries	1A1 Public Electricity and Heat production	1B Fugitive emissions from fuels
b) Gasification and liquefaction	D_Fugitive emissions: 1B2a Fugitive emissions oil: Exploration, production, transport; 1B2 b Fugitive emissions from natural gas (exploration, production, processing, transmission, storage, distribution and other); 1B2 aiv Fugitive emissions oil: Refining / storage; 1B2 av Distribution of oil products;	1B2 Fugitive emissions from oil and natural gas systems (Oil Production and Upgrading 1.B.2.a.ii Oil Transport 1.B.2.a.iii Oil Refining 1.B.2.a.iv Distribution of Oil Products 1.B.2.a.v Gas Exploration 1.B.2.b.i Gas Production and Gathering 1.B.2.b.ii Gas Processing 1.B.2.b.iii Gas Transmission and Storage 1.B.2.b.iv Gas Distribution 1.B.2.b.v)
c) Thermal power stations and other combustion installations	C_Other Stationary Combustion: 1A4a Commercial/institutional: Stationary 1A4b Resdential 1A4c Agriculture/Forestry/Fishing 1A5 Other	1A Fuel Combustion Activities 1A1 Main Activity Electricity and Heat Production 1A2 Manufacturing industries and construction 1A4 Other sectors (Commercial / Institutional; Residential; Agriculture / Forestry / Fishing / Fish farms) 1A5 Non-specified
d) Coke ovens		
e) Coal rolling mills		
f) Manufacture of coal products and solid smokeless fuel		1A1ciManufacture of Solid Fuels 1A1ciiOther Energy Industries
Reference: Guide PRTR-en and: *E-PRTR (The European **P**ollutant **R**elease and **T**ransfer **R**egister)*	*NFR-classification from Guide EMEP-2016 and update versions*	*Guideline IPCC-2006* *and for 1B2-IPCC-2019*

Для заполнения информации на специализированном сайте были разработаны специальные табличные формы для каждой категории классификатора РВПЗ.

Методы расчета. В расчетах эмиссий загрязнителей возможно применение метода Уровня 1 и Уровня 2, которые отличаются степенью детализации первичных данных. Общая формула расчетов включает два сомножителя: данные по деятельности (количество сожженного топлива каждого типа для каждой категории) и коэффициент выбросов для каждой категории, типа топлива и вида загрязнителя. Коэффициенты эмиссий использованы согласно Руководствам EMEP 2013 и 2016 гг. и их обновленным версиям по отдельным категориям, а также IPCC-2006. Ссылки на принятые коэффициенты выбросов эмиссий загрязнителей приведены в комментариях к табличным формам. Далее более подробно описан сектор «Энергетика».

Сектор «Энергетика» для Молдовы включает 4 раздела с категориями, приведенными в табл. 3.

Таблица 3. **Структура сектора «Энергетика» и его категории источников выбросов загрязнителей**

Oil	**Natural gas**
1(a) Distribution of oil products 1(a) Exploration oil 1(a) Storage oil 1(a) Refining oil	1(a) Transport natural gas 1(a) Exploration natural gas
Electricity and heat	**Coal**
1(c) Public electricity and heat production->50 MW 1(c) Small Combustion (1A4a/c; 1A5a)-<50 MW	1(d) Solid fuel transformanion – Coal charging 1(f) Manufacture of solid fuel and other energy industries

Для каждой указанной категории построены отдельные расчетные шаблоны Excel. Рассмотрим более подробно один раздел «Electricity and heat».

Electricity and heat. Требования РВПЗ включают разделение источников по установленной мощности – менее 50 МВт и более 50 МВт. Для категории 1(c) подготовлено два расчетных файла – с пометкой источников как крупных (>50 МВт) и небольших (<50 МВт).

В файле по расчету выбросов загрязнителей для генерирующих установок мощностью более 50 МВт предусмотрены возможности расчета по методу 1 и по методу 2 с учетом разных технологий сжигания, а также включена необходимая дополнительная информация:

description, NCV National; NCV default; EF – CO_2, CO_4, N_2O;

data – Source;

tier 1 – 1A1a (Hard coal, Brown Coal, Gaseous fuels, Heavy fuel oil, Gas oil, Biomass);

tier 2 – dry bottom (Natural Gas);

tier 2 – wet bottom (Hard coal, Brown Coal);

tier 2 – fluid bed boilers (Hard coal, Brown Coal);

tier 2 – gas turbines (Natural Gas, Gas Oil);

tier 2 – reciprocating engines (Natural Gas, Gas Oil).

Таблицы по расчету выбросов загрязнителей для генерирующих установок мощностью менее 50 МВт включают больше вариантов по установленной мощности, в том числе: Tier 1; Tier 2 (1–50 MW); Tier 2 (50 KW – 1 MW); Tier 2 (automatic, less 1MW); Tier 2 (manual, less 1MW); Tier 2 (gas turbines); Tier 2 (reciprocating engines). Заполнение файлов производится для всех категорий аналогично.

Страница «Description, NCV National» содержит общую информацию о вычислительных возможностях файла, его структуре, перечне топлив и др., также приведены национальные низшие теплотворные величины (NCV), которые используются национальным бюро статистики. Кроме того, приведены NCV по умолчанию согласно Руководству IPCC-2006.

Первичные данные могут быть заполнены на основе учета по месяцам или за год на странице «Data – Source». Для первоначальных и пробных расчетов можно использовать расчетную таблицу по методу 1 «Tier 1», но для постоянных ежегодных расчетов целесообразнее использовать расчетные таблицы по методу 2, которые учитывают разные коэффициенты выбросов для разных типов установок сжигания (dry bottom, wet bottom, fluid bed boilers, gas turbines, reciprocating engines).

При разработке шаблонов таблиц возникла необходимость объединения расчетов эмиссий по разным конвенциям в одном массиве.

Для сектора «Энергетика» встретилась трудность, связанная с тем, что для расчета 25 загрязняющих веществ (Guideline EMEP-2016 [13]) достаточно первичной информации по видам топлива: solid, liquid, gaseous, biofuels (TJ). Но по Guideline IPCC-2006 (CO_2, CH_4, N_2O) [14] надо указать топливо более детально – не только по группам, но и по видам: например, solid – антрацит, битуминозный уголь, прочий уголь и т. д. (учитываются национальной статистикой). Расчетные таблицы были построены с учетом такой детализации по видам топлив.

Общая структура таблиц включила следующие части:

название и адрес экономического агента;

название категории, ее код, группы топлив (solid, liquid, gaseous, biofuels);

строку первичных данных в ТДж;

колонку загрязняющих веществ и коэффициенты эмиссий по EMEP (25 загрязняющих веществ), множитель пересчета в требуемые итоговые единицы измерений (kt, t, kg и т. д.);

столбец рассчитанных эмиссий каждого загрязнителя;

строки для расчетов трех парниковых газов CO_2, CH_4, N_2O с учетом отдельных видов топлив;

ссылки на таблицы с коэффициентами выбросов из руководств МГЭИК, EMEP, пример такой таблицы для одной категории – табл. 4.

Таблица 4. **Фрагмент расчетной таблицы по категории 1(c) Public electricity and heat production (Gaseous fuels), Tier 1 (fragment)**

	Facility Name:					
	Address					
	Reporting year:					
	Note:	Data Entry in the yellow cells only			Data Output in the green cells only	
	RELEASES TO AIR					
	Category		1A1a Public electricity and heat production			
	Category Code NFR		1A1a			
	Methodology		Tier 1 emission factors for source category 1.A.1.a using gaseous fuels			
			Fuel Consumption			
			A3			
			Gaseous fuels			
			(GJ)			
Enter fuel consumption in GJ per year (GJ/year)			3386000	enter figure		
	Not estimated (NE): NH3, PCBs, HCB					
Guide	PRTR Pollutant Number	Pollutant	Emission Factor	Unit	Pollutant Emissions	Unit
EMEP			B3		C3	
			Gaseous fuels		C3 = (A3 * B3)	
	8	NOx	89	g/GJ	301354000	g
	2	CO	39	g/GJ	132054000	g
	7	NMVOC	2,6	g/GJ	8803600	g
	11	SOx	0,281	g/GJ	951466	g
	102	TSP	0,89	g/GJ	3013540	g
	86	PM 10	0,89	g/GJ	3013540	g
	100	PM 2,5	0,89	g/GJ	3013540	g
	101	BC	2,5	% of PM 2,5	75339	g
	23	Pb	0,0015	mg/GJ	5079	mg

Расчеты эмиссий всех загрязнителей размещены в строке, выделенной цветом, там же указана единица измерения. Для газа CO_2 дополнительно указан вид топлива (по разновидностям угля и биомассы).

Таблицы с результатами расчетов эмиссий, выполненных экономическими агентами и поданными в органы отчетности, помещаются на сайте в табличной форме и на географической карте (www.retp.gov.md [15]).

Сайт содержит ряд закладок, в том числе (англ.): Home, Search, Emissions (air, water), about RETP (National Pollutant Release and Transfer Register-PRTR), FAQ, Contracts, Downloads, Legal terms, Library, Language (EN, RU, RO), Account (Sign In).

Для получения информации можно использовать «Search» и выбрать год, наименование экономического агента, вид деятельности (по классификатору РВПЗ). После выбора указанных параметров появляется таблица эмиссий и точка объекта на карте (рис. 1).

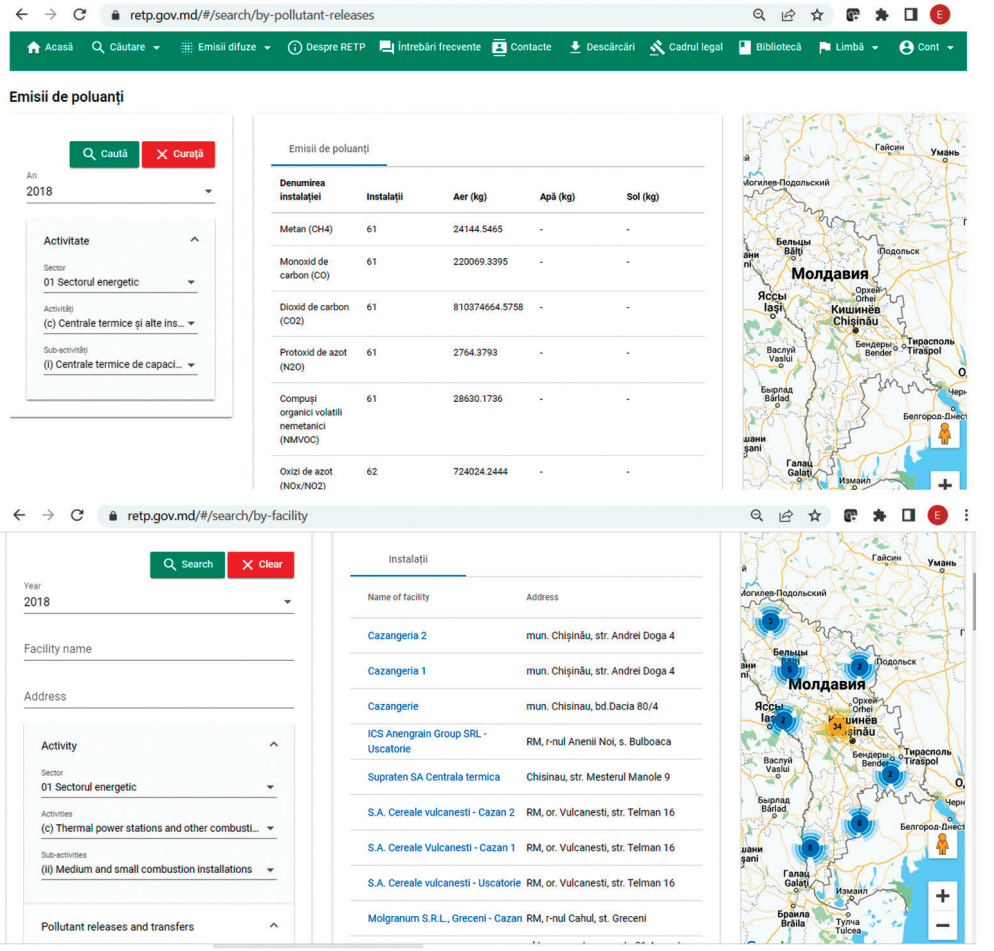


Рис. 1. Примеры страниц молдавского сайта РВПЗ (www.retp.gov.md [15]) по сектору энергетики

По сектору «Энергетика» для обучения экономических агентов удалось привлечь представителей ряда предприятий по производству электро- и теплоэнергии и газового сектора. В большинстве случаев участвовали представители экономических служб, администрации или бухгалтеры. Одним из трудных моментов для экономических агентов является правильный выбор позиций для отражения деятельности предприятия.

Для ориентирования в общей структуре сектора были разработаны схемы на трех языках и страницы «Description». На этих листах сосредоточена основная информация для выбора необходимых расчетных таблиц, представленных внутри файла.

Расчетные таблицы приведены на нескольких листах для учета различных случаев по конкретной категории: по группам топлив, по типу мощностей установок и т. д.

Заполнение исходных данных особенных затруднений не вызвало для экономистов и энергетиков. У бухгалтеров наблюдались трудности, связанные с единицами измерения и их преобразованием, а также с понятием низшей теплотворной способности. Впоследствии каждый представленный отчет был проверен, и по всем случаям ошибок и затруднений была оказана помощь с образцами конкретных расчетов и пояснениями.

Основные трудности, которые имели место в целом по проекту. Заполнение расчетных форм по оценке эмиссий экономическими агентами, которые прошли обучение, осуществлялось в течение 2017–2019 гг. Отражение их отчетов на сайте осуществлялось в период 2017–2019 гг., однако позже работа приостановилась. Именно эта причина вызвала необходимость написания данной статьи для сохранения наработанного материала по расчетным файлам, структурам секторов, опыту обучения представителей предприятий, опыту использования разработанного сайта и в целом результатов деятельности по проекту.

Охват экономических агентов по всем видам экономической деятельности не получился полным, и многие предприятия еще не начали деятельность по такой отчетности.

В период действия проекта был также разработан ряд документов:

гид по работе с сайтом;

гид по секторам «Энергетика», «Металлургия» и другим;

презентации для проведения лекций;

официальные законодательные документы для перехода по отчетности предприятий на данный формат вместо ранее практиковавшихся;

отчетность по проекту перед донорами.

Часть документов приведена на сайте в разделе «Библиотека».

Результаты и обсуждение. В данном проекте участвовали 6 стран: Молдова, Беларусь, Казахстан, Перу, Камбоджа, Эквадор. В каждой стране была сделана попытка разработки своей собственной системы учета выброса загрязнителей

и специализированного сайта, на котором были отражены эмиссии по каждому экономическому агенту в стране. Далее кратко описаны достигнутые результаты, которые отражены на сайтах РПВЗ стран, приведено описание сайтов.

Камбоджа. Страна не подписала и не ратифицировала протокол РВПЗ [28]. В стране создан сайт [16], на котором представлены правовые документы, руководства по расчету выбросов, видеотренинги, формы онлайн-отчетности, дополнительные материалы. Базы данных по объектам и диффузным источникам находятся в процессе разработки и заполнения. На сайте не имеется карт и графиков (рис. 2).

Казахстан. Страна является Стороной Протокола по РВПЗ, [28]. На сайте Министерства экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан [17] имеется Единый экологический интернет-ресурс. Он включает страницу Государственного Регистра выбросов и переноса загрязнителей. Но сайт не содержит систематизированной информации по экономическим агентам, значений выбросов загрязнителей, нет графиков и карт с эмиссиями. Представлены только отчеты некоторых предприятий I категорий в формате pdf; jpg – 1131 предприятие (из 2648) (2019) и 1127 предприятий (2020) [18] (рис. 3).

Перу. Страна не подписала и не ратифицировала Протокол о Регистрах выбросов и переноса загрязнителей [28]. Отчет по Регистру выбросов и переноса загрязнителей представлен в виде pdf- файла, в котором содержится информация о выбросах от предприятий и диаграммы [19] (рис. 4).

Эквадор. Страна не является Стороной Протокола РВПЗ [28]. На сайте Министерства окружающей среды, водных ресурсов и экономического перехода Эквадора есть подробное описание Регистра выбросов и переноса загрязнителей, но все ссылки неактивны. В отчете (2018) еще не были представлены результаты работы по этому проекту [20] (рис. 5).

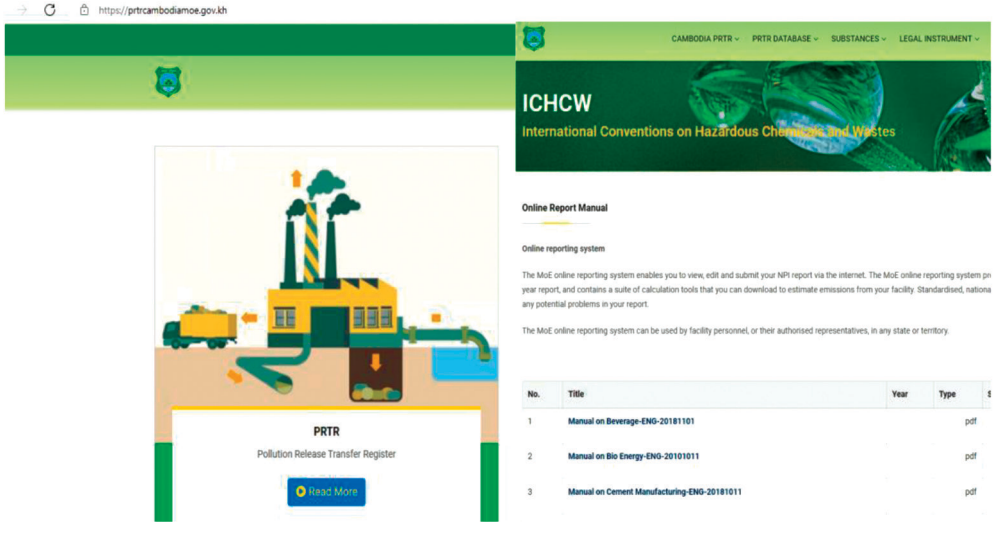


Рис. 2. Образец страницы сайта РВПЗ – отчетности Камбоджи

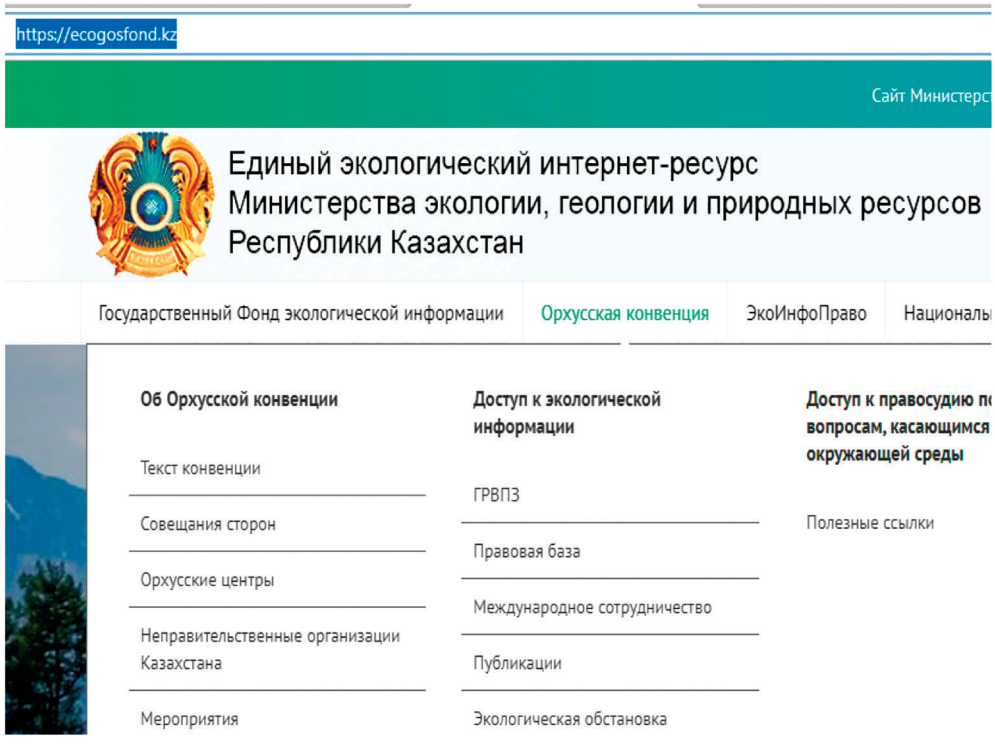


Рис. 3. Экологический интернет-ресурс Казахстана

Беларусь. Страна не подписала и не ратифицировала протокол по Регистрам выбросов и переноса загрязнителей [28]. На сайте Орхусского центра Республики Беларусь размещена информация о Регистре выбросов и переноса загрязнителей, имеется перечень объектов – источников загрязнений, приведен список показателей, включенных в Национальный регистр выбросов и переноса загрязнителей, и их пороговые значения (рис. 6). Имеется также ссылка на базу данных в Access, но ее таблицы не заполнены [21].

Первая версия Национального РВПЗ Республики Беларусь была разработана в рамках проекта «Повышение потенциала для разработки национальных регистров выбросов и переноса загрязнителей в двух странах с переходной экономикой: Республике Беларусь и Республике Таджикистан» в рамках Конвенции о доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам окружающей среды. В частности, были разработаны база данных и веб-сайт для доступа к информации по Национальному регистру выбросов и переноса загрязнителей (рис. 7).

Также был проведен обзор и оценка Национального реестра выбросов и переноса загрязнителей Республики Беларусь в рамках пилотного проекта по Гродненской области [22]. К сожалению, на текущий момент нет доступа к созданным сайтам.

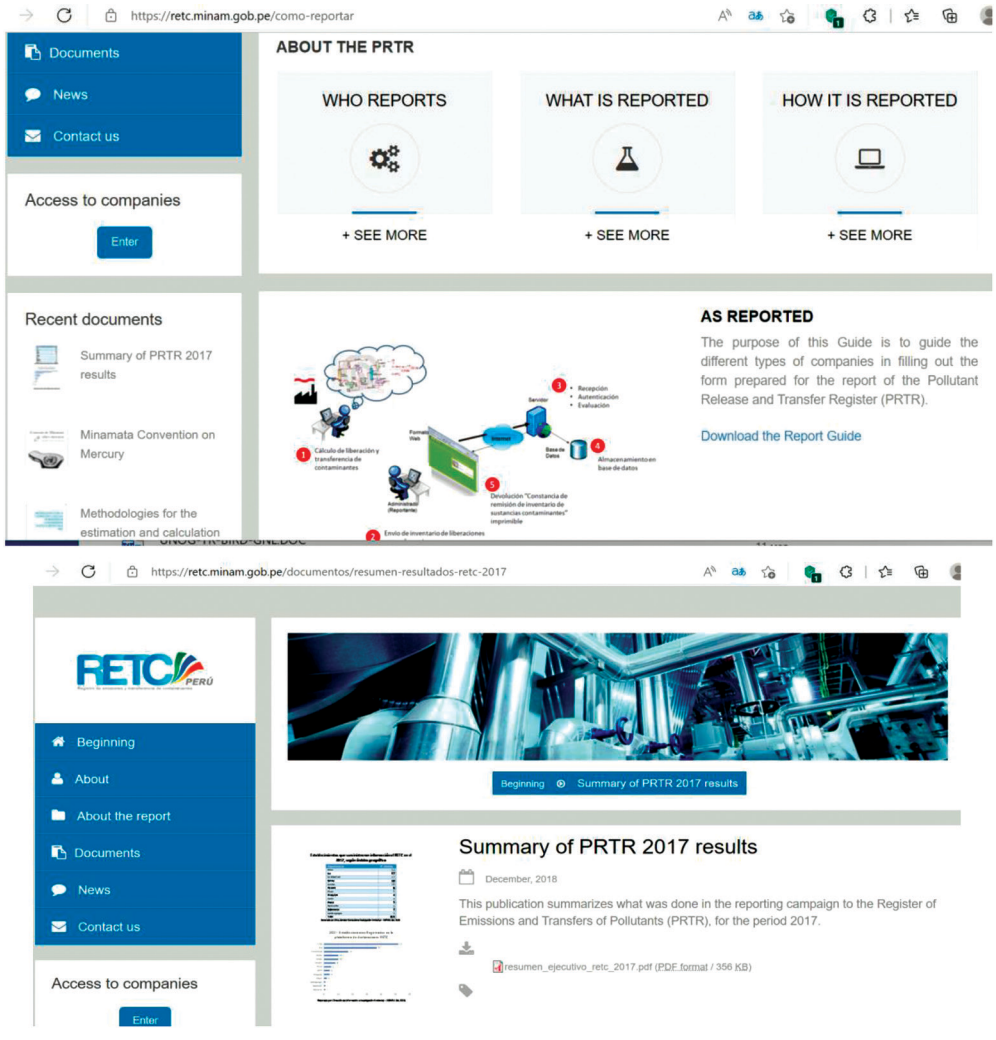


Рис. 4. Страницы сайта по Регистру выбросов и переноса загрязнителей в Перу

Опыт других стран. Опыт Шотландии, Германии, Испании, Австралии, Хорватии и других стран также может быть полезен, и самые лучшие идеи могут быть применены для национальных решений в дальнейшем. Они отражены на аналогичных сайтах [23–27].

Основные перспективы. Общая идея проекта была хорошей, реализация – плодотворной, разработанный сайт – удовлетворительным для начала работ в такой постановке в стране, результаты – полезны и для экономических агентов, и для широкой общественности. Разработанные законодательные документы обеспечивают правовые основы для выполнения Протокола, а обученные исполнители на предприятиях имеют потенциал для осуществления деятельности. Эти факторы создают предпосылки для продолжения и развития работ,

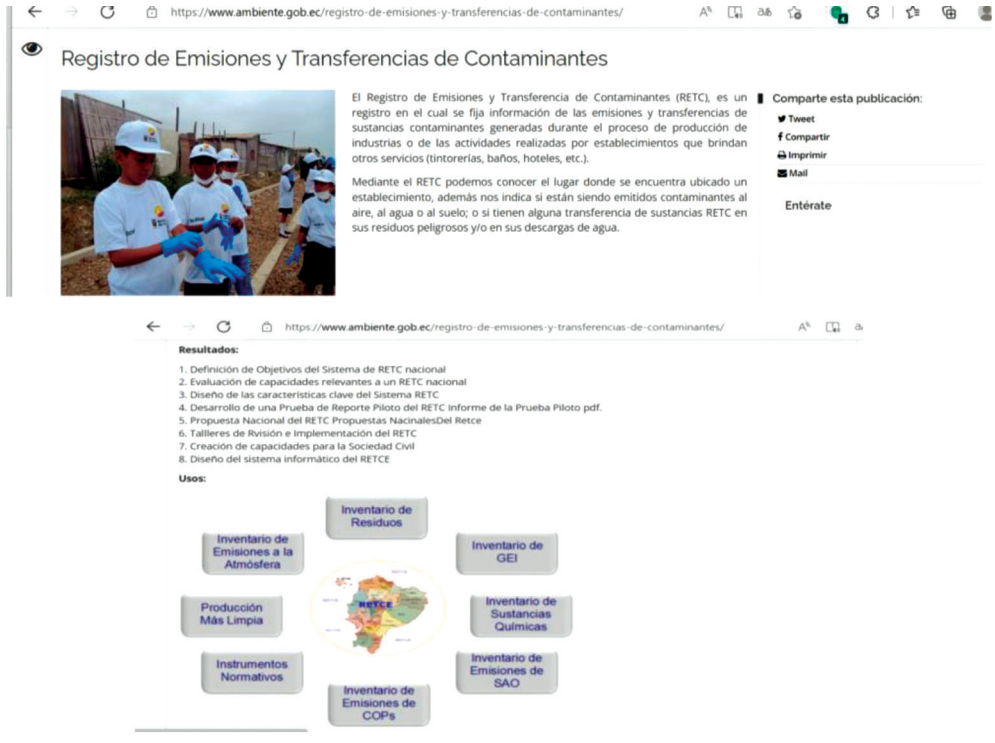


Рис. 5. Страницы сайта по Регистру выбросов и переноса загрязнителей Эквадора

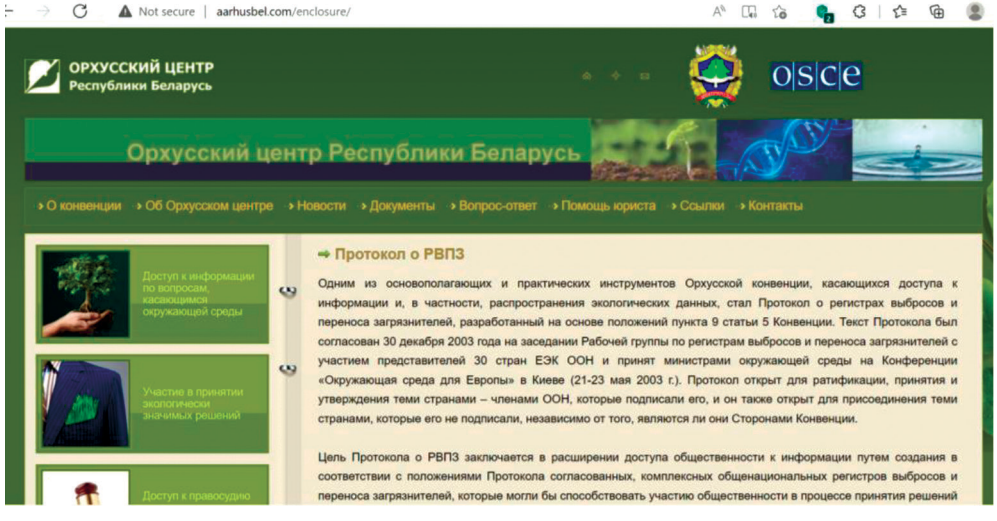
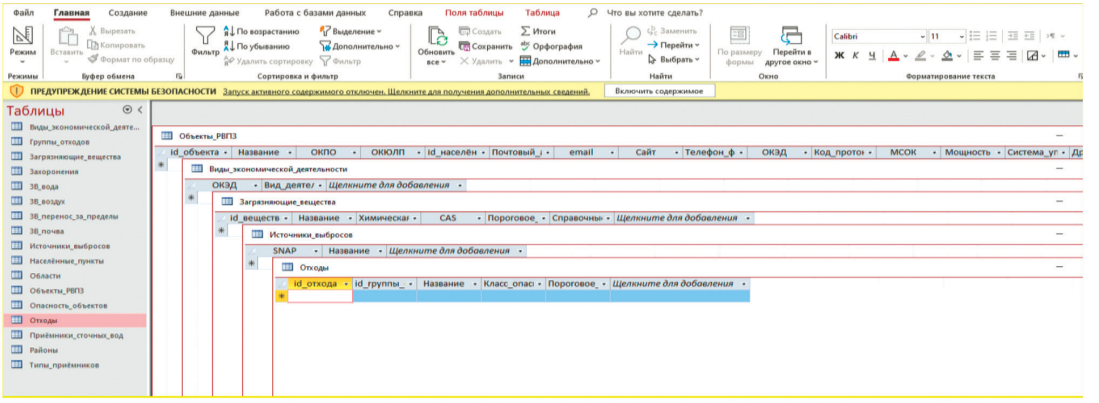
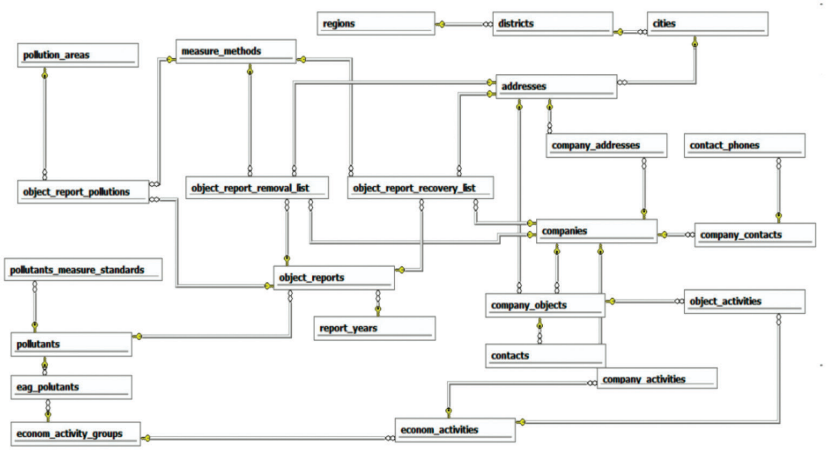


Рис. 6. Страница сайта Орхусского центра с информацией по Регистру выбросов и переноса загрязнителей Беларуси





Scheme 1. The structure of PRTR Database

Рис. 7. Структура базы данных РВПЗ в Беларуси

которое может быть связано с расширением охвата предприятий, улучшения отражения эмиссий на сайте, улучшения самого сайта, расширения списка загрязнителей и др.

Заключение. В исследовании описаны разработки расчетных таблиц-шаблонов по сектору энергетики для оценки выбросов 28 загрязнителей для реализации Протокола по выбросам и переноса загрязнителей в Молдове. Представление количества эмиссий загрязнителей экономическими агентами в табличной форме на специальном сайте расширяет доступ населения к информации о состоянии окружающей среды и качестве воздуха и отражает цели Орхусской конвенции. Проведенные работы позволили сравнить состояние работ в стране с подобными работами в других странах и наметить дальнейшие перспективы. Описание накопленного опыта, имевшихся трудностей, принятых решений может быть полезно для продолжения работ в стране, а также для исследователей в других странах.

Список использованных источников

1. Перечень конференций ОСЕ [Электронный ресурс] // ЮНЕСКО, Центр всемирного наследия. – Режим доступа : https://unece.org/environment-policy/environment-europe. – Дата доступа : 23.05.2022.

2. Орхусская конвенция [Электронный ресурс] // ЮНЕСКО, Центр всемирного наследия. – Режим доступа : https://unece.org/environment-policy/public-participation/aarhus-convention/introduction. – Дата доступа : 25.05.2022.

3. Протокол по регистрам выброса и переноса загрязнителей Конвенции о доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды [Электронный ресурс] / ЮНЕСКО, Центр всемирного наследия. – Режим доступа : https://unece.org/env/pp/protocol-on-prtrs-introduction. – Дата доступа : 21.05.2022.

4. О ратификации Конвенции о доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды [Электронный ресурс] : постановление Парламента Респ. Молдова, 7 апр. 1999 г. / М-во юстиции. – Режим доступа : https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=59140&lang=ro. – Дата доступа : 18.05.2022.

5. О ратификации Протокола по регистрам выбросов и переноса загрязнителей к Конвенции о доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды [Электронный ресурс] : Закон Парламента Респ. Молдова, 26 апр. 2013 г., № 99 [вступил в силу 14.06.2013] // М-во юстиции. – Режим доступа : https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=22250&lang=ro. – Дата доступа : 07.04.2022.

6. Об осуществлении Протокола регистрам выбросов и переноса загрязнителей к Конвенции о доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды [Электронный ресурс] : нац. отчеты Респ. Молдовы (2014, 2017, 2021 гг.). – Режим доступа : https://prtr.unece.org/national-reports/reports. – Дата доступа : 09.05.2022.

7. О Национальном регистре выбросов и переноса загрязнителей [Электронный ресурс]: постановление Парламента Респ. Молдова, 27 апр. 2018г., № 373 / М-во юстиции. – Режим доступа : https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=103021&lang=ro. – Дата доступа : 14.05.2022.

8. О руководстве по внедрению Национального регистра выбросов и переноса загрязнителей [Электронный ресурс] : приказ М-ва сельского хозяйства, регионального развития и окру-

жающей среды Респ. Молдова, 7 авг. 2019 г., № 190 / М-во юстиции. – Режим доступа : https://www.legis.md/cautare/ getResults?doc_id=119306&lang=ro. – Дата доступа : 05.03.2022.

9. Global Project on the Implementation of PRTRs as a tool for POPs reporting, dissemination and awareness raising for Belarus, Cambodia, Ecuador, Kazakhstan, Moldova and Peru, 2017–2019 [Electronic resource]. – Mode of access : https://UNECE Protocol on PRTRs 23 05 2022 | PRTR. – Date of access : 23.05.2022.

10. Guidance on Implementation of the Protocol on Pollutant Release and Transfer [Electronic resource]. – Mode of access : https://ec.europa.eu/environment/industry/stationary/e-prtr/implementation.htm, https://unece.org/fileadmin/DAM/env/pp/prtr/guidance/PRTR_guidance_web_version.pdf., https://unece.org/key-guidance-material-0. – Date of access : 29.05.2022.

11. Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP Convention) [Electronic resource] : [entry into force 16 March 1983] / European Environment Agency. – Mode of access : https://www.eea.europa.eu/themes/air/links/institutions/the-unece-convention-on-long. – Date of access : 17.05.2022.

12. United Nations Framework Convention on Climate Change [Electronic resource] : [entered into force on 21 March 1994] // United Nations Climate Change. – Mode of access : https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change. – Date of access : 15.05.2022.

13. Guideline EMEP/EEA-2019 [Electronic resource] : EEA technical report // European Environment Agency. – Mode of access : http://www.eea.europa.eu/ru/publications/emep-eea. – Date of access : 12.04.2022.

14. Guideline IPCC-2006 [Electronic resource] : the 2006 IPCC Guidelines for National greenhouse gas inventories // Intergovernmental commission on climate change. – Mode of access : https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl. – Date of access : 12.04.2022.

15. Регистр выбросов и переноса загрязнителей в Молдове [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.retp.gov.md. – Дата доступа : 11.03.2022.

16. Pollutant Emission Transfer Register [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https:// prtrcambodiamoe.gov.kh. – Дата доступа : 12.04.2022.

17. Единый экологический интернет-ресурс Министерства экологии, геологии и природных ресурсов Республики Казахстан [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ecogosfond.kz. – Дата доступа : 13.04.2022.

18. Протокол о регистрах выбросов и переноса загрязнителей к Конвенции о доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды [Электронный ресурс]. – Режим доступа : UNECE Protocol on PRTRs 23 05 2022 | PRTR. – Дата доступа : 13.04.2022.

19. Регистр выбросов и переноса загрязнителей в Перу [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://retc.minam.gob.pe. – Дата доступа : 16.04.2022.

20. Министерство окружающей среды, водных ресурсов и экономического перехода Эквадора [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.ambiente.gob.ec/noticias/page/2. – Дата доступа : 15.05.2022.

21. Орхусский центр Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://aarhusbel.com/ и http://www.ecoinfo.by/content. – Дата доступа : 15.05.2022.

22. Национальный реестр выбросов и переноса загрязнителей Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://zoinet.org/product/hrodna-prtr-video. – Дата доступа : 16.05.2022.

23. Scottish Pollutant Release Register [Electronic resource]. – Mode of access : Scottish PRTR. – Date of access : 18.05.2022.

24. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection [Electronic resource]. – Mode of access : German PRTR-. – Date of access : 18.05.2022.

25. PRTR Spain Ministerstvo ecological period [Electronic resource]. – Mode of access : Spanish PRTR. – Date of access : 18.05.2022.

26. Department of Climate Change, Energy, Environment and Water Australian [Electronic resource]. – Mode of access : Australian PRTR. – Date of access : 17.05.2022.

27. Macedonian Environmental Information Center MEIC [Electronic resource]. – Mode of access : http://ripz.moepp.gov.mk. – Date of access : 17.05.2022.

28. PRTRs Protocol – Status of ratification [Electronic resource]. – Mode of access : https://unece.org/environment-policy/public-participation/prtrs-status-ratification. – Date of access : 27.05.2022.

References

1. Perechen' konferencij OSE [Electronic resource] / YUNESKO, Centr vsemirnogo naslediya. – Mode of access : https://unece.org/environment-policy/environment-europe. – Date of access : 23.05.2022.

2. Orhusskaya konvenciya [Electronic resource] / YUNESKO, Centr vsemirnogo naslediya. – Mode of access : https://unece.org/environment-policy/public-participation/aarhus-convention/introduction. – Date of access : 25.05.2022.

3. Protokol po registram vybrosa i perenosa zagryaznitelej Konvencii o dostupe k informacii, uchastii obshchestvennosti v processe prinyatiya reshenij i dostupe k pravosudiyu po voprosam, kasayushchimsya okruzhayushchej sredy [Electronic resource] / YUNESKO, Centr vsemirnogo naslediya. – Mode of access : https://unece.org/env/pp/protocol-on-prtrs-introduction. – Date of access : 21.05.2022.

4. O ratifikacii Konvencii o dostupe k informacii, uchastii obshchestvennosti v processe prinyatiya reshenij i dostupe k pravosudiyu po voprosam, kasayushchimsya okruzhayushchej sredy [Electronic resource] : postanovlenie Parlamenta Resp. Moldova, 7 apr. 1999 g. / M-vo yusticii. – Mode of access : https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=59140&lang=ro. – Date of access : 18.05.2022.

5. O ratifikacii Protokola po registram vybrosov i perenosa zagryaznitelej k Konvencii o dostupe k informacii, uchastii obshchestvennosti v processe prinyatiya reshenij i dostupe k pravosudiyu po voprosam, kasayushchimsya okruzhayushchej sredy [Electronic resource] : Zakon Parlamenta Resp. Moldova, 26 apr. 2013 g., № 99 [vstupil v silu 14.06.2013] / M-vo yusticii. – Mode of access : https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=22250&lang=ro. – Date of access : 07.04.2022.

6. Ob osushchestvlenii Protokola registram vybrosov i perenosa zagryaznitelej k Konvencii o dostupe k informacii, uchastii obshchestvennosti v processe prinyatiya reshenij i dostupe k pravosudiyu po voprosam, kasayushchimsya okruzhayushchej sredy [Electronic resource] : nac. otchety Resp. Moldovy (2014 g., 2017 g., 2021 g.). – Mode of access : https://prtr.unece.org/national-reports/reports. – Date of access : 09.05.2022.

7. O Nacional'nom registre vybrosov i perenosa zagryaznitelej [Electronic resource]: postanovlenie Parlamenta Resp. Moldova, 27 apr. 2018g., № 373 / M-vo yusticii. – Mode of access : https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=103021&lang=ro. – Date of access : 14.05.2022.

8. O rukovodstve po vnedreniyu Nacional'nogo registra vybrosov i perenosa zagryaznitelej [Electronic resource] : prikaz M-va sel'skogo hozyajstva, regional'nogo razvitiya i okruzhayushchej sredy Resp. Moldova, 7 avg. 2019 g., № 190 // M-vo yusticii. – Mode of access : https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=119306&lang=ro. – Date of access : 05.03.2022.

9. Global Project on the Implementation of PRTRs as a tool for POPs reporting, dissemination and awareness raising for Belarus, Cambodia, Ecuador, Kazakhstan, Moldova and Peru, 2017–2019 [Electronic resource]. – Mode of access : https://UNECE Protocol on PRTRs 23 05 2022 | PRTR. – Date of access : 23.05.2022.

10. Guidance on Implementation of the Protocol on Pollutant Release and Transfer [Electronic resource]. – Mode of access : https://ec.europa.eu/environment/industry/stationary/e-prtr/implementation.htm, https://unece.org/fileadmin/DAM/env/pp/prtr/guidance/PRTR_guidance_web_version.pdf., https://unece.org/key-guidance-material-0. – Date of access : 29.05.2022.

11. Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP Convention) [Electronic resource] : [entry into force 16 March 1983] / European Environment Agency. – Mode of access : https://www.eea.europa.eu/themes/air/links/institutions/the-unece-convention-on-long. – Date of access : 17.05.2022.

12. United Nations Framework Convention on Climate Change [Electronic resource] : [entered into force on 21 March 1994] // United Nations Climate Change . – Mode of access : https://unfccc.int/

process-and-meetings/the-convention/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change. – Date of access : 15.05.2022.

13. Guideline EMEP/EEA-2019 [Electronic resource] : EEA technical report // European Environment Agency. – Mode of access : http://www.eea.europa.eu/ru/publications/emep-eea/#. – Date of access : 12.04.2022.

14. Guideline IPCC-2006 [Electronic resource] : the 2006 IPCC Guidelines for National greenhouse gas inventories // Intergovernmental commission on climate change. – Mode of access : https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl. – Date of access : 12.04.2022.

15. Registr vybrosov i perenosa zagryaznitelej v Moldove [Electronic resource]. – Mode of access : www.retp.gov.md. – Date of access : 11.03.2022.

16. Pollutant Emission Transfer Register [Electronic resource]. – Mode of access : https://prtrcambodiamoe.gov.kh. – Date of access : 12.04.2022.

17. Edinyj ekologicheskij internet-resurs Ministerstva ekologii, geologii i prirodnyh resursov Respubliki Kazahstan [Electronic resource]. – Mode of access : https://ecogosfond.kz. – Date of access : 13.04.2022.

18. Protokol o registrah vybrosov i perenosa zagryaznitelej k Konvencii o dostupe k informacii, uchastii obshchestvennosti v processe prinyatiya reshenij i dostupe k pravosudiyu po voprosam, kasayushchimsya okruzhayushchej sredy [Electronic resource]. – Mode of access : UNECE Protocol on PRTRs 23 05 2022 | PRTR. – Date of access : 13.04.2022.

19. Registr vybrosov i perenosa zagryaznitelej v Peru [Electronic resource]. – Mode of access : https://retc.minam.gob.pe. – Date of access : 16.04.2022.

20. Ministerstvo okruzhayushchej sredy, vodnyh resursov i ekonomicheskogo perekhoda Ekvadora [Electronic resource]. – Mode of access : https://www.ambiente.gob.ec/noticias/page/2. – Date of access : 15.05.2022.

21. Orhusskij centr Respubliki Belarus' [Electronic resource]. – Mode of access : http://aarhusbel.com i http://www.ecoinfo.by/content. – Date of access : 15.05.2022.

22. Nacional'nyj reestr vybrosov i perenosa zagryaznitelej Respubliki Belarus' [Electronic resource]. – Mode of access : https://zoinet.org/product/hrodna-prtr-video. – Date of access : 16.05.2022.

23. Scottish Pollutant Release Register [Electronic resource]. – Mode of access : Scottish PRTR. – Date of access : 18.05.2022.

24. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection [Electronic resource]. – Mode of access : German PRTR-. – Date of access : 18.05.2022.

25. PRTR Spain Ministerstvo ecological period [Electronic resource]. – Mode of access : Spanish PRTR. – Date of access : 18.05.2022.

26. Department of Climate Change, Energy, Environment and Water Australian [Electronic resource]. – Mode of access : Australian PRTR. – Date of access : 17.05.2022.

27. Macedonian Environmental Information Center MEIC [Electronic resource]. – Mode of access : http://ripz.moepp.gov.mk. – Date of access : 17.05.2022.

28. PRTRs Protocol - Status of ratification [Electronic resource]. – Mode of access : https://unece.org/environment-policy/public-participation/prtrs-status-ratification. – Date of access : 27.05.2022.

УДК 004.82

Т. Н. Ворожцова

ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ НА СОЦИО-ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ

Кандидат технических наук, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Предлагается онтологический подход к исследованию факторов влияния объектов энергетики на окружающую среду и человека. Использование онтологий, представленных в графическом виде, показывает структуру необходимых знаний и возможности их интеграции, основываясь на анализе базовых понятий и их взаимосвязей.

Ключевые слова: онтологический подход, социо-экологическая система, энергетика, экология.

T. N. Vorozhtsova

ONTOLOGICAL ANALYSIS OF THE FACTORS OF ENERGY FACILITIES INFLUENCE TO THE SOCIO-ECOLOGICAL SYSTEM

Ph. D. in Engineering Science, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Annotation. An ontological approach to the study of the factors of energy facilities impact on the environment is proposed. The use of ontologies presented graphically shows the structure of the necessary knowledge and the possibilities of their integration, based on the basic concepts and their interrelations analysis.

Keywords: ontological approach, socio-ecological system, energy, ecology.

Введение. Энергетика – важнейшая отрасль, которая обеспечивает функционирование социальной инфраструктуры, но, с другой стороны, является одним из серьезных факторов техногенного или антропогенного воздействия на природу и человека. Необходимость интеграции исследований энергетических и социо-экологических систем обусловлена их взаимным влиянием и тесными взаимосвязями. Междисциплинарные исследования в этих областях предполагают выявление значимых факторов влияния энергетики на социальную и экологическую системы [9]. Энергетические системы разных уровней являются крупнейшей сферой экономики и фактором социального развития, поскольку их создание и функционирование приносит эффект не только в энергетической, но и в социальной, производственной сферах [6]. Актуальность выполняемых исследований определяется также тем, что в настоящее время устойчивость энергетических систем рассматривается в соответствии с глобальными целями в области устойчивого развития и не только включает технические аспекты, но и в большой степени учитывает экологическую и социальную составляющие устойчивости энергетических объектов [5, 12]. Экологические аспекты означают, что устойчивое развитие должно обеспечивать целостность

биологических природных систем. Социальная составляющая рассматривает человека как элемент социальной системы, который должен участвовать в формировании сферы своей жизнедеятельности.

В рамках выполнения проекта «Методы построения онтологического пространства знаний для интеллектуальной поддержки принятия решений в энергетике и экологии с учетом качества жизни», поддержанного Российским фондом фундаментальных исследований № 20-07-00195, в Институте систем энергетики им. Л. А. Мелентьева разрабатывается система онтологий, обеспечивающая представление и интеграцию знаний изучаемых предметных областей.

Материалы и методы исследования. Анализ факторов влияния объектов энергетики на социо-экологическую систему предполагает использование системного подхода к интеграционным исследованиям энергетической и социо-экологической систем. В основе методологии системного подхода лежит рассмотрение исследуемого объекта как сложной системы множества элементов и связей между ними. Системная методология подразумевает определение состава и взаимосвязей реальных систем. Суть системного подхода в исследованиях энергетики, а также актуальность системного анализа и моделирования в современных условиях отмечена А. А. Макаровым на VII Мелентьевских чтениях [7].

Для выполнения исследований предлагается использование онтологического подхода к описанию взаимосвязей между рассматриваемыми системами. Реализация такого подхода заключается в выполнении онтологического инжиниринга предметной области выполняемых исследований. Понятие онтологического инжиниринга относится к инженерии знаний – разделу инженерной деятельности, направленной на использование знаний в компьютерных системах для решения сложных задач [3]. Возможности и цели онтологического инжиниринга рассматриваются в работах российских [4, 8] и зарубежных [13, 15] исследователей. Онтологический инжиниринг, как процесс проектирования и разработки онтологий, объединяет технологии объектно-ориентированного и структурного анализа. Целями онтологического инжиниринга являются возможность совместной обработки знаний на основе единого семантического описания и повышение уровня интеграции необходимой информации.

Онтология, как способ представления знаний в виде концептуальной схемы, является способом систематизации сущностей предметной области и обеспечивает возможность определения и согласования понятий, описания отношений между понятиями, структурирования знаний и работы со смыслом информации. Для выявления факторов влияния объектов энергетики на социо-экологическую систему рассмотрены базовые понятия исследуемых предметных областей. Такими базовыми понятиями выполняемых исследований являются «социо-экологическая система», «энергетическая система», «энергетический объект», «антропогенный фактор».

Определение социо-экологической системы зависит от направления исследований. Аналитический обзор различных определений социо-экологической

системы рассмотрен в работе [11]. В частности, предлагается использовать следующее наиболее универсальное определение, предложенное нобелевским лауреатом Э. Остром [12]. *Социо-экологическая система* – это экологическая система, неразрывно связанная и зависящая от одной или нескольких социальных систем. Социо-экологическая система состоит их тесно связанных и взаимозависимых экологической и социальной систем. Большая Российская энциклопедия предлагает определение экологической системы или экосистемы как совокупности совместно обитающих организмов и условий их существования, находящихся в закономерной взаимосвязи друг с другом и образующих систему взаимообусловленных биотических и абиотических явлений и процессов.

Основными элементами социальной системы являются люди, их взаимоотношения и связи. *Социальная система* – это множество элементов (индивидов, групп, общностей), а также совокупность социальных явлений и процессов, которые находятся в отношениях и связи между собой и образуют некоторый социальный объект [1]. По определению Н. Ф. Реймерса, сформулированному в словаре-справочнике «Природопользование», экологическая система – это любое сообщество живых существ и его среда обитания, объединенные в единое функциональное целое, возникающее на основе взаимозависимости и причинно-следственных связей, существующих между отдельными экологическими компонентами [10].

Понятие энергетической системы сформулировано в [2]. Энергетическая система – это открытая человеко-машинная производственная система, предназначенная для добычи (производства, получения), переработки (преобразования), транспортирования, хранения и распределения энергоресурсов и снабжения потребителей этой продукцией. Там же дано определение объекта энергетики. *Энергетический объект* – совокупность энергетических установок и вспомогательных устройств, объединенных территориально и технологически и предназначенных для совместного выполнения производственно-технических задач.

Рассматриваемые факторы влияния объектов энергетики на социо-экологическую систему – *антропогенные факторы*. Антропогенный фактор – это результат воздействия человека на окружающую среду в процессе хозяйственной или другой деятельности.

Для наглядного представления взаимосвязей между рассматриваемым системами предлагается совокупность онтологий в графическом виде, представляющих собой семантическую сеть, вершинами которой являются объекты или понятия (концепты) взаимосвязанных предметных областей, а дугами – отношения между этими концептами.

Результаты исследования и их обсуждение. Воздействие энергетики на окружающую среду, биосферу и человека проявляется на всех стадиях производства энергии – добычи и транспортировки ресурсов, производства, транспортировки и потребления тепловой и электрической энергии. Объекты энергетики неблагоприятно влияют на атмосферу, гидросферу и литосферу. С другой

стороны, функционирование таких объектов – это основа развития базовых отраслей промышленности и социального прогресса.

Существуют разные классификации антропогенных факторов – по периодичности (непрерывный, периодический, спорадический фактор), по способности к миграции (с потоками воды, со средствами производства, самостоятельно мигрирующий, не мигрирующий), по устойчивости изменений в природе (временные обратимые, относительно необратимые, абсолютно необратимые изменения, антропогенный стресс экосистем). Например, различают физические, химические, биологические и социальные факторы. Физические, химические и биологические факторы, как правило, оказывают отрицательное вредное воздействие на человека и природу. Социальные факторы связаны с жизнью общества, поведением человека и взаимоотношениями между людьми. Именно социальные факторы могут компенсировать отрицательное воздействие как на экологическую, так и на социальную составляющую социо-экологической системы.

Факторы влияния объектов энергетики зависят от типа объекта, используемого ресурса и производственного процесса. На рис. 1 представлена метаонтология базовых понятий, отражающая антропогенное влияние объектов энергетики. Каждое из представленных в метаонтологии понятий детализируется на следующих уровнях. Это показано на примере онтологии понятия «производственный процесс» (рис. 2).

Отрицательные факторы влияния энергетики на окружающую среду включают изъятие земельных ресурсов, в том числе на стадиях добычи и обработки сырья, изменение свойств почвы, влияние на ландшафт, акустическое воздействие, электромагнитное излучение, нагрев воздуха, изменение влажности, направления ветров, воздействие на климат, опасность аварийных ситуаций. Тепловая энергетика оказывает наибольшее отрицательное воздействие и включает изъятие земельных ресурсов, выбросы в атмосферу (газовые и твердых частиц), тепловое воздействие, загрязнение твердыми отходами.

Основное положительное влияние функционирования объектов энергетики на соответствующую социо-экологическую систему состоит в производстве электрической и тепловой энергии. Критерием оценки деятельности производителей энергоресурсов являются цены для конечных потребителей. Доступность, наличие и приемлемость энергии являются основными целями в энергетической сфере. Для их достижения концепция Мирового энергетического совета предлагает комплекс приоритетных задач, решение которых обеспечит устойчивое развитие энергетики в будущем. К ним относятся: участие государства в контроле за энергетическими рынками; обеспечение повышения энергоэффективности и создание льготных условий для инвестиций в энергетику; обеспечение энергией по цене, доступной для бедных; управление энергетикой на принципах открытости и с обеспечением общественного контроля.

Для структурирования взаимосвязей энергетических и социо-экологических систем рассмотрены индикаторы устойчивого развития этих систем, включающие три группы показателей – экономические, экологические и социальные.

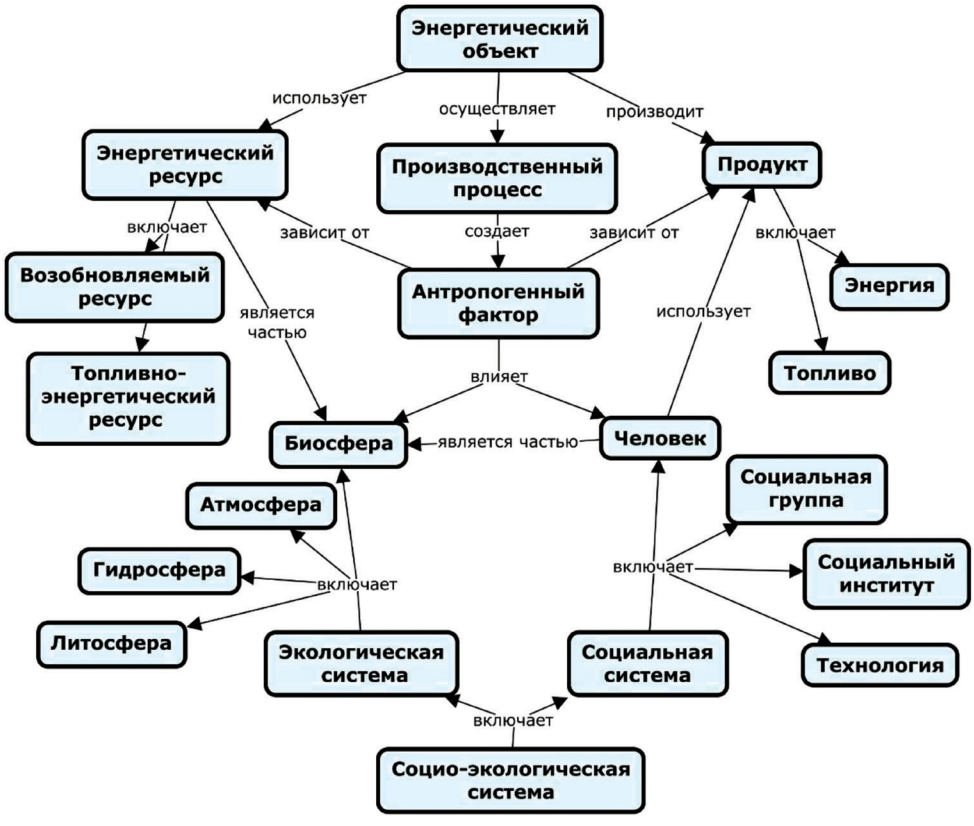


Рис. 1. Метаонтология влияния объектов энергетики

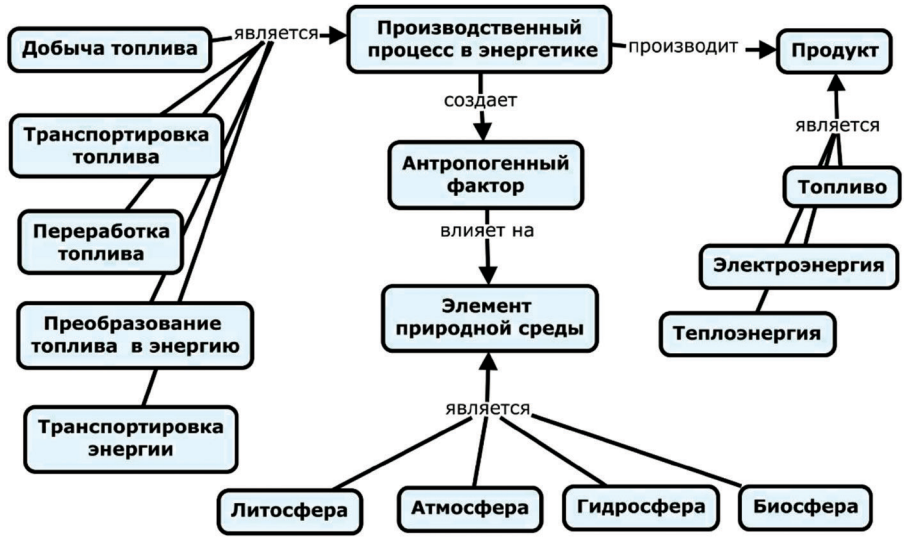


Рис. 2. Онтология производственного процесса в энергетике

Понятие устойчивого функционирования как энергетических, так и социо-экологических систем подразумевает совместное рассмотрение и учет этих показателей. Управление энергетическими объектами должно соответствовать мировым принципам устойчивого развития, ESG-принципам, сформулированным и предложенным в качестве модели устойчивого развития с участием бизнеса. E (Environmental) означает ответственное отношение к окружающей среде, уменьшение загрязнения и сбережение природных ресурсов. S (Social) – это социальная ответственность, забота о персонале, его правах и охране труда. G (Governance) – объективные критерии, высокое качество и эффективность руководителей, управления и аудита.

В качестве интегрального индикатора, отражающего разные аспекты жизнедеятельности человека с учетом удовлетворения его материальных, духовных и социальных потребностей и обеспечения безопасности жизни, рассматривается понятие «качество жизни». Этот индикатор включает следующие группы показателей, характеризующих социальную систему, – демография, уровень благосостояния, социальная сфера, здоровье и природные условия. Функционирование объектов энергетики на любой территории безусловно влияет на все эти показатели качества жизни, т. е. на социо-экологическую систему.

Заключение. Рассмотрены базовые понятия выполняемых исследований, такие как «энергетическая система», «социальная система», «социо-экологическая система» и другие. Изучены взаимосвязи, отражающие как отрицательное, так и положительное влияние функционирования объектов энергетики на соответствующую социо-экологическую систему. Основные факторы влияния объектов энергетики на социальную сферу и окружающую среду представлены в виде онтологий, взаимосвязанных на основе фрактального подхода. В работе используются графические онтологии, представляющие собой семантическую сеть, вершинами которой являются объекты или понятия (концепты) взаимосвязанных предметных областей, а дугами – отношения между этими концептами. Это обеспечивает доступность и восприятие больших объемов сложно структурированной информации, а также интеграцию знаний разных предметных областей. Рассматривается понятие «качество жизни» как интегральный индикатор, отражающий разные аспекты жизнедеятельности человека с учетом удовлетворения его материальных, духовных и социальных потребностей и обеспечения безопасности жизни.

Работа выполняется в рамках проекта «Методы построения онтологического пространства знаний для интеллектуальной поддержки принятия решений в энергетике и экологии с учетом качества жизни», поддержанного грантом РФФИ № 20-07-00195.

Список использованных источников

1. Андрамонова, В. В. Социальная система общества: структура и функционирование / В. В. Андрамонова // Политика, экономика и социальная сфера: проблемы взаимодействия. – 2015. – № 1. – С. 108–111.

2. Воропай, Н. И. Энергетическая безопасность. Термины и определения / Н. И. Воропай. – М. : ИАЦ Энергия, 2005. – 60 с.

3. Гаврилова, Т. А. Инженерия знаний. Модели и методы : учеб. / Т. А. Гаврилова, Д. В. Кудрявцев, Д. И. Муромцев. – СПб. : Лань, 2016. – 324 с.

4. Гаврилова, Т. А. Онтологический инжиниринг [Электронный ресурс] / Т. А. Гаврилова // Технологии менеджмента знаний. – Режим доступа : http://www.kmtec.ru/publications/library/authors/ontolog_engeneering.shtml. – Дата доступа : 04.04.2022.

5. Индикаторы экологически устойчивого развития: региональное измерение / С. Н. Бобылев [и др.] // Вестн. Москов. ун-та. Сер. 6, Экономика. – 2018. – № 2. – С. 21–33.

6. Макаров, А. А. Мировая энергетика и Евразийское энергетическое пространство / А. А. Макаров. – М. : Энергоатомиздат. – 1998. – 280 с.

7. Макаров, А. А. Системные исследования энергетики: 50-летие надежд и 20 лет в тени / А. А. Макаров // Седьмые Мелентьевские чтения : сб. науч. тр. / под ред. А. А. Макарова. – М. : ИНЭИ РАНб, 2013. – 214 с.

8. Массель, Л. В. Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике / Л. В. Массель, Т. Н. Ворожцова, Н. И. Пяткова // Онтология проектирования. – 2017. – Т. 7, № 1 (23). – С. 66–76. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76.

9. Онтологические аспекты исследования взаимовлияния энергетики и геоэкологии / Л. В. Массель [и др.] // Онтология проектирования. – 2018. – Т. 8, № 4(30). – С. 550–561. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-550-561.

10. Реймерс, Н. Ф. Природопользование : слов.-справ. / Н. Ф. Реймерс. – М. : Мысль, 1990. – 637 с.

11. Стрекалова, А. С. Социально-экологическая система как объект экологического маркетинга территорий: анализ и синтез определений / А. С. Стрекалова, Д. П. Фролов // Вестн. Волгогр. гос. ун-та. Сер. 3, Экономика. Экология. – 2015. – № 4 (33).

12. Anderies, J. M. A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective [Electronic resource] / J. M. Anderies, M. A. Janssen, E. Ostrom // Ecology and Society. – 2004. – № 9 (1): 18. – Mode of access : http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss1/art18. – Date of access : 27.05.2022.

13. De Leenheer, P. Context dependency management in ontology engineering: A formal approach / P. De Leenheer, A. de Moor, R. Meersman // J. Data Semantics (8). − 2007. − P. 26–56.

14. Jesse, Bernhard-Johannes. Adapting the theory of resilience to energy systems: a review and outlook / Bernhard-Johannes Jesse, Heidi Ursula Heinrichs, Wilhelm Kuckshinrichs [Electronic resource] // Energy, Sustainability and Society. – 2019. – № 9:27. – Mode of access : https://energsustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-019-0210-7. – Date of access : 28.05.2022.

15. Ontology engineering in a networked world / M. C. Suarez-Figueroa [et al.]. – Berlin : Springer Science & Business Media, 2012. – P. 456.

References

1. Andramonova, V. V. Social'naya sistema obshchestva: struktura i funkcionirovanie / V. V. Andramonova / V. V. Andramonova // Politika, ekonomika i social'naya sfera: problemy vzaimodejstviya. – 2015. – № 1. – S. 108–111.

2. Voropaj, N. I. Energeticheskaya bezopasnost'. Terminy i opredeleniya / N. I. Voropaj. – M. : IAC Energiya, 2005. – 60 s.

3. Gavrilova, T. A. Inzheneriya znanij. Modeli i metody : uchebnik / T. A. Gavrilova, D. V. Kudryavcev, D. I. Muromcev. – SPb. : Lan', 2016. – 324 s.

4. Gavrilova, T. A. Ontologicheskij inzhiniring [Electronic resource] / T. A. Gavrilova // Tekhnologii menedzhmenta znanij. – Mode of access : http://www.kmtec.ru/publications/library/authors/ontolog_engeneering.shtml. – Date of access : 04.04.2022.

5. Indikatory ekologicheski ustojchivogo razvitiya: regional'noe izmerenie / S. N. Bobylev [et al.] // Vestn. Moskov. un-ta. Ser. 6, Ekonomika. – 2018. – № 2. – S. 21–33.

6. Makarov, A. A. Mirovaya energetika i Evrazijskoe energeticheskoe prostranstvo / A. A. Makarov. – M. : Energoatomizdat, 1998. – 280 s.

7. Makarov, A. A. Sistemnye issledovaniya energetiki: 50-letie nadezhd i 20 let v teni / A. A. Makarov // Sed'mye Melent'evskie chteniya : sb. nauch. tr. / pod red. A. A. Makarova. – M. : INEI RANb, 2013. – 214 s.

8. Massel', L. V. Ontologicheskij inzhiniring dlya podderzhki prinyatiya strategicheskih reshenij v energetike / L. V. Massel', T. N. Vorozhcova, N. I. Pyatkova // Ontologiya proektirovaniya. – 2017. – T. 7, № 1 (23). – S. 66–76. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-1-66-76.

9. Ontologicheskie aspekty issledovaniya vzaimovliyaniya energetiki i geoekologii / L. V. Massel' [et al.] // Ontologiya proektirovaniya. – 2018. – T. 8, № 4 (30). – S. 550–561. DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-4-550-561.

10. Rejmers, N. F. Prirodopol'zovanie: slovar'-spravochnik / N. F. Rejmers. – M. : Mysl', 1990. – 637 s.

11. Strekalova, A. S. Social'no-ekologicheskaya sistema kak ob"ekt ekologicheskogo marketinga territorij: analiz i sintez opredelenij / A. S. Strekalova, D. P. Frolov // Vestn. Volgogr. gos. un-ta. Ser. 3, Ekonomika. Ekologiya – 2015. – № 4 (33).

12. Anderies, J. M. A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective [Electronic resource] / J. M. Anderies, M. A. Janssen, E. Ostrom // Ecology and Society. – 2004. – № 9 (1): 18. – Mode of access : http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss1/art18. – Date of access : 27.05.2022.

13. De Leenheer, P. Context dependency management in ontology engineering: A formal approach / P. De Leenheer, A. de Moor, R. Meersman // J. Data Semantics (8). – 2007. – R. 26–56.

14. Jesse, Bernhard-Johannes. Adapting the theory of resilience to energy systems: a review and outlook / Bernhard-Johannes Jesse, Heidi Ursula Heinrichs, Wilhelm Kuckshinrichs [Electronic resource] // Energy, Sustainability and Society. – 2019. – № 9:27. – Mode of access : https://energsustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-019-0210-7. – Date of access : 28.05.2022.

15. Ontology engineering in a networked world / M. C. Suarez-Figueroa [et al.]. – Berlin : Springer Science & Business Media, 2012. – P. 456.

УДК 631.42:621.315.211.2

Е. В. Гапанович[1], О. Г. Савич-Шемет[2], И. И. Гавриленко[3]

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С БУМАЖНОЙ МАСЛОПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ (БМПИ)

[1]Кандидат технических наук, Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
[2]Кандидат географических наук, Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
[3]Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Оценено воздействие силовых кабелей с БМПИ длительного срока эксплуатации на почвы и подстилающие грунты на основе результатов геохимических исследований почв на содержание нефтепродуктов, свинца, полициклических ароматических углеводородов на участках заложения кабелей.

Ключевые слова: силовые кабели с бумажной маслопропитанной изоляцией, почвы и подстилающие грунты, загрязнение, нефтепродукты, свинец, ПАУ.

E. V. Gapanovich[1], O. G. Savich-Shemet[2], I. I. Gavrilenko[3]

GEOECOLOGICAL ASPECTS OF LONG-TERM OPERATION OF POWER CABLES WITH INSULATING LAYER OF OIL-IMPREGNATED PAPER

[1]Ph. D. in Engineering Science, Institute of Nature Management of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
[2]Ph. D. in Geography, Institute of Nature Management of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
[3]Institute of Nature Management of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The impact of power cables with insulating layer of oil-impregnated paper on soils and underlying soils was assessments on the soil geochemical analysis results for oil products, lead, polycyclic aromatic hydrocarbons in cable landing points.

Keywords: power cable with insulating layer of oil-impregnated paper, soils and underlying soils, pollution, oil products, lead, PAHs.

Введение. Современный этап развития энергетической промышленности отличается все возрастающей степенью техногенного «давления» на окружающую среду, что влечет за собой повышение экологического риска, обусловленного загрязнением основных компонентов окружающей среды. Это касается всех отраслей энергетической промышленности, в том числе кабельной отрасли, обеспечивающей доставку энергетических ресурсов до потребителя посредством силовых кабелей.

Известно, что при производстве кабельной продукции на территории постсоветского пространства использовался и используется широкий спектр материалов, в состав которых входит большое количество потенциально опасных химических веществ с точки зрения воздействия на основные компоненты окружающей среды и человека.

В течение всего времени эксплуатации кабелей в условиях геологической среды в результате влияния разнообразных внешних природных и техногенных, а также внутренних факторов происходят процессы изменения физико-химических свойств материалов кабеля, т. е. процессы его старения [1, 2].

Процессы старения кабелей в той или иной мере затрагивают все типы кабелей.

К внешним факторам, обуславливающим старение материалов кабеля, можно отнести следующие природные факторы: температурно-влажностной режим почв на участке размещения силовой кабельной линии, тепловую инерцию, кислотно-щелочные условия, наличие микроорганизмов и др., а также техногенные факторы, обусловленные возможностью электрохимического поражения металлических компонентов конструкции кабельной линии в результате влияния блуждающих токов, стекающих с токоведущих проводов электрических установок в окружающий грунт, преимущественно в населенных пунктах вблизи железнодорожных или трамвайных путей [3, 4].

К внутренним можно отнести следующие факторы: вероятность наличия технологических или эксплуатационных дефектов полимерной оболочки изоляции кабеля, повышение температуры кабеля при электрических нагрузках выше допустимых значений, воздействие электрического поля на материал изоляции [5].

Все вышеперечисленное означает, что в процессе длительной эксплуатации кабелей в результате развития процессов деградации материалов кабеля возможно поступление в геологическую среду, подземные и поверхностные воды потенциально опасных химических веществ.

Вместе с тем изученность проблемы загрязнения окружающей среды химическими веществами, входящими в состав конструкционных элементов силовых кабелей, весьма низкая.

В связи с этим проведение исследований с целью определения воздействия на почвы и подстилающие грунты силовых кабелей с бумажной масло-пропитанной изоляцией (БМПИ), оценки условий формирования потенциального очага загрязнения на участках заложения и длительного функционирования этих кабелей является важной и актуальной задачей.

Анализ литературных источников, освещающих спектр материалов, используемых при производстве конструкционных компонентов силовых кабелей с БМПИ, показал, что с позиции потенциального влияния на почвы и подстилающие грунты опасность представляют химические вещества неорганической природы в составе оболочки кабелей: свинец, химические вещества органического происхождения в составе наружного покрова, подушки, поясной изоляции кабелей [6–8].

Материалы и методы исследования. С целью идентификации химических веществ, присутствующих в материалах конструкционных элементов кабелей, проведены физико-химические исследования методом инфракрасной спектроскопии (ИК-спектроскопии) различных образцов кабеля. В качестве показательных выбраны марки кабеля АСБ 3×95, АСБ 3×150 с длительным сроком эксплуатации, образцы которых были получены в процессе проведения полевых исследований в различных регионах республики, на участках коридора силовых кабелей, в местах повреждения линии.

На рис. 1 представлены фото образца кабеля с БМПИ в свинцовой оболочке.

По результатам физико-химических исследований органических материалов конструктивных элементов кабеля с БМПИ было определено следующее:

органическое вещество пропитки наружного покрова кабеля схоже с битумом, представлено высокомолекулярными соединениями (предельными углеводородами, асфальтенами, парафинами), установлено наличие полиароматических углеводородов;

состав вязкопластичной составляющей подушки кабеля представлен веществом, схожим с битумом, пластифицированным эфирами фталевой кислоты, выступающими в качестве модифицирующей добавки, определяющей пластифицирующее действие на дисперсную структуру битума;



а *б*

Рис. 1. Фото образцов кабеля с БМПИ в свинцовой оболочке марки АСБ 3×95.
Место прокладки: *а* – г. Минск, ул. Широкая; *б* – г. Солигорск, ул. Наруцкого

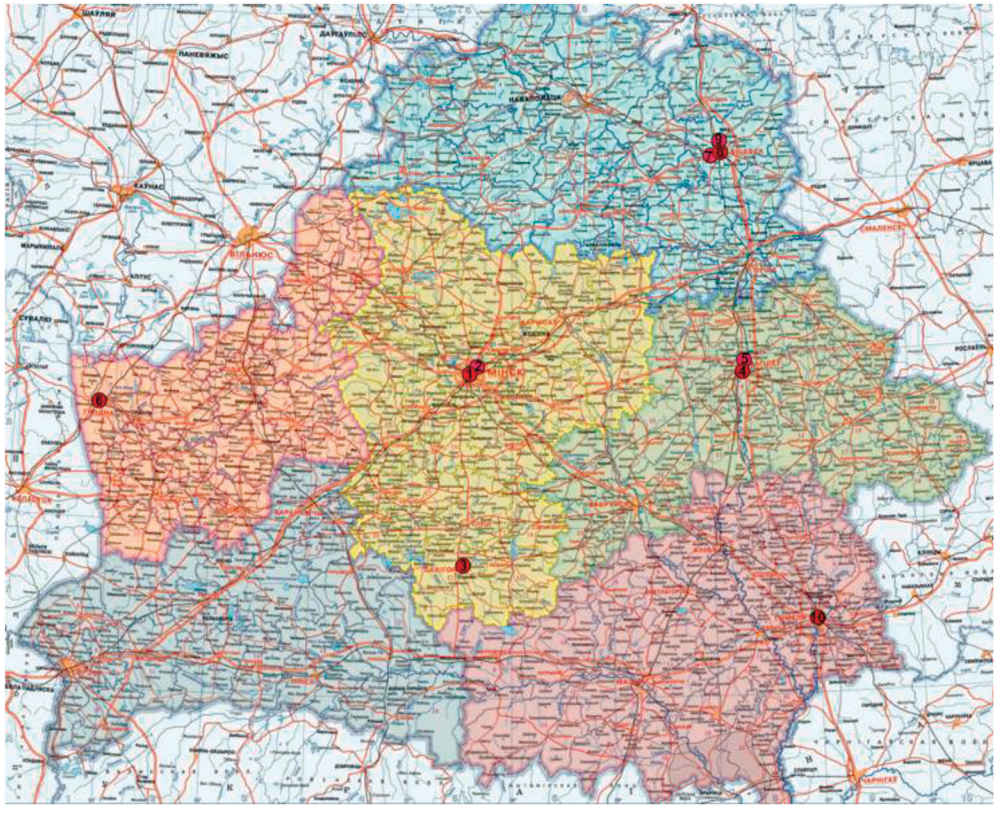


Рис. 2. Схема точек отбора проб почв и подстилающих грунтов по территории Республики Беларусь (Минск, Витебск, Могилев, Солигорск, Гомель, Гродно)

в составе образцов кабелей с БМПИ также определены полимерные материалы на основе полиэфиров, поливинилхлорида, пластифицированного эфирами фталевой кислоты, содержащих в составе минеральной части карбонат кальция. Итак, в составе органических и неорганических структурных компонентов силового кабеля с БМПИ определены химические вещества, относящиеся к категории опасных, чрезвычайно опасных, проявляющие токсичные свойства по отношению к основным компонентам окружающей среды и человеку: полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), свинец (Pb).

Полученные выводы легли в основу дальнейших геохимических исследований в части оценки возможного воздействия силовых кабелей с БМПИ на почвы и подстилающие грунты.

Объектами геохимических исследований являлись пробы почв и подстилающих грунтов, отобранные на пробных площадках, приуроченных к участкам прокладки кабелей с БМПИ в свинцовой оболочке.

Схема точек отбора проб почв и подстилающих грунтов по территории Республики Беларусь (города Минск, Витебск. Могилев, Солигорск, Гомель, Гродно) приведена на рис. 2.

Результаты и их обсуждение. Результаты химико-аналитических исследований проб почв и подстилающих грунтов показывают, что практически во всех пробах, отобранных на участках со свободным поступлением атмосферных осадков (преимущественно в виде дождя) на поверхность земли и далее их инфильтрации в зону размещения кабельной линии, содержание нефтепродуктов, ПАУ и свинца превышает нормированные значения предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных для почв и подстилающих грунтов в населенных пунктах (табл. 1).

В качестве показателя уровня загрязнения почв и подстилающих грунтов использовался коэффициент концентрации химического вещества относительно ПДК/ОДК Z_i (далее – Z_i), который определяется отношением фактического содержания химического вещества в образце почвогрунта (далее – C_i) в мг/кг (абсолютно сухом) к его гигиеническому нормативу (ПДК/ОДК):

$$Z_i = C_i / \text{ПДК}.$$

При содержании химического вещества в почвах и подстилающих грунтах, превышающем ПДК (ОДК), или $Z_i > 1$, принималось, что имеет место формирование потенциального очага загрязнения от силовой кабельной линии.

Анализ данных табл. 1 показывает, что практически во всех пробах, отобранных на участках со свободным поступлением атмосферных осадков, и на отдельных участках, экранированных твердым водонепроницаемым покрытием, фиксируется наличие химических веществ (нефтепродуктов, свинца), содержание которых превышает нормированные значения, установленные для почв и подстилающих грунтов в населенных пунктах.

Максимальные значения показателя уровня загрязнения по нефтепродуктам ($Z_{\text{н/п}}$), по свинцу (Z_{Pb}) по городам составили:

Таблица 1. **Содержание свинца и нефтепродуктов в образцах почв и подстилающих грунтов, отобранных в местах прокладки силовых кабелей с БМПИ**

Место локации пробной площадки	Нефтепродукты		Свинец	
	содержание (C_i), мг/кг	показатель уровня загрязнения (Z_i)	содержание (C_i), мг/кг	показатель уровня загрязнения (Z_i)
г. Могилев, ул. Космонавтов	171	1,71	22,9	0,72
г. Могилев, ул. Белинского	191	1,91	18,1	0,57
г. Витебск, ПС «Новая»	120	1,20	39,3	1,23
г. Витебск, ул. Терешковой	191	1,91	46,8	1,50
г. Витебск, ул. Правды	10	0,10	35,2	1,10
г. Гомель, ул. Комиссарова	129	1,29	33,4	1,04
ПДК/ОДК*	100		32	

* В соотвествии с гигиеническим нормативом «Показатели безопасности и безвредности почвы», утвержденным Постановлением Совета Минстров Республики Беларусь от 25 января 2021 г., № 37.

в г. Витебске, ул. Терешковой – значение $Z_{н/п}$ – 1,91, Z_{Pb} – 1,5;

в г. Гомеле, ул. Комиссарова – значение $Z_{н/п}$ – 1,29, Z_{Pb} – 1,10;

в г. Могилеве, ул. Белинского, значение $Z_{н/п}$ – 1,91.

Значения показателя уровня загрязнения почв и подстилающих грунтов Z_i на перечисленных выше исследуемых участках заложения силовых кабелей с БМПИ в свинцовой оболочке длительного срока эксплуатации может свидетельствовать о формировании локальных очагов загрязнения нефтепродуктами и свинцом.

Следует отметить, что при изменении водного режима почв и подстилающих грунтов (влагонасыщенности) на отдельных участках прокладки кабеля, даже при небольшом содержании загрязняющих веществ, возможно увеличение ареалов их распространения, в том числе с потоком грунтовых вод.

Результаты химико-аналитических исследований образцов почв и подстилающих грунтов в местах прокладки силовых кабелей с БМПИ в свинцовой оболочке на определение уровня загрязнения ПАУ приведены в табл. 2.

Максимальные значения показателя уровня загрязнения по индивидуальным ПАУ (Z_i) по пробным площадкам составляют:

в г. Витебске, ПС «Новая» – значение Z_i по нафталину – 13, фенантрену – 25, антрацену – 1,2, флуорантену – 10, хризену – 7, бензо(а)пирену – 1,5;

в г. Витебске, ул. Терешковой – значение Z_i по нафталину – 36, фенантрену – 411, антрацену – 27, флуорантену – 813, бензо(а)антрацену – 251, хризену – 379, бензо(а)пирену – 211, бензо(ghi)перилену – 138, индено(1,2,3-cd)пирену – 93;

Таблица 2. **Значение показателя уровня загрязнения почв и подстилающих грунтов ПАУ в местах прокладки силовых кабелей с БМПИ**

Место локации пробной площадки	Значение показателя уровня загрязнения ПАУ (*Zi*)													
	Нафталин	Аценафтен	Флуорен	Фенантрен	Антрацен	Флуорантен	Пирен	Бензо(а)-антрацен	Хризен	Бензо(в)-флуорантен	Бензо(к)-флуорантен	Бензо(а)-пирен	Дибензо(ah)-антрацен	Бензо(ghi)-перилен	Индено (1,2,3-cd)-пирен
г. Минск, ул. Широкая	0,67	–	–	10	0,4	4	–	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	–	0,5	0,4
г. Минск, ул. Мясникова	3,3	–	–	1	0,2	0,67	–	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	–	0,5	0,4
г. Солигорск, ул. Наруцкого	2,7	–	–	3	0,2	0,67	–	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	–	0,5	0,4
г. Могилев, ул. Космонавтов	0,67	–	–	2	0,2	0,67	–	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	–	0,5	0,4
г. Могилев, ул. Белинского	0,67	–	–	1	0,2	0,67	–	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	–	0,5	0,4
г. Гродно, БЛК	0,67	–	–	1	0,2	0,67	–	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	–	0,5	0,4
г. Витебск, ПС «Новая»	13	–	–	25	1,2	10	–	0,5	7	0,4	0,4	1,5	–	1,5	1,2
г. Витебск, ул. Терешковой	36	–	–	411	27	813	–	251	379	128	82	211	–	138	93
г. Витебск, ул. Правды	0,67	–	–	1	0,2	0,67	–	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	–	0,5	0,4
г. Гомель, ул. Комиссарова	1,3	–	–	5	0,2	3,3	–	1	2,5	0,02	0,4	2	–	2	1,6

в г. Гомеле, ул. Комиссарова – значение Z_i по нафталину – 1,3, фенантрену – 5, флуорантену – 5, бензо(а)антрацену – 1,5, хризену – 2,5, бензо(а)пирену – 2, бензо(ghi)перилену – 2, индено(1,2,3-cd)пирену – 1,6;

в г. Минске, ул. Широкая – значение Z_i по фенантрену – 10, флуорантену – 4;

в г. Минске, ул. Мясникова – значение Z_i по нафталину – 3,3;

в г. Солигорске, ул. Наруцкого – значение Z_i по нафталину – 2,7, фенантрену – 3.

Анализ данных геохимических исследований проб почв и подстилающих грунтов на участках заложения силовых кабелей с БМПИ длительного срока эксплуатации показал, что содержание ПАУ в пробах хорошо коррелирует с содержанием на этих территориях в пробах почв и подстилающих грунтов нефтепродуктов и свинца. Превышение нормированного содержания (ПДК) нефтепродуктов в почвогрунтах населенных пунктов на двух пробных площадках в городах Витебск и Гомель имеет взаимосвязь со значительным превышением ПДК на этих площадках индивидуальных ПАУ. Степень деградации земель на территории этих пробных площадок оценивается как «высокая» и «очень высокая».

Заключение. Таким образом, по результатам проведенных исследований в части возможного воздействия силовых кабелей с БМПИ длительного срока эксплуатации на почвы и подстилающие грунты на участках их прокладки сделан вывод, что силовые кабели с БМПИ могут являться источниками загрязнения геологической среды в результате развития возможных процессов старения и разрушения свинцовой оболочки, защитных покровов кабеля (нефтяных битумных составов), деградации составляющих его материалов.

С целью предупреждения и минимизирования возможных последствий пролонгированного воздействия на окружающую среду необходимо ставить и решать вопрос ограничения (исключения) применения кабелей с БМПИ в свинцовой оболочке.

Список использованных источников

1. Говердовский, Р. Г. Техническое состояние кабельных линий 6–10 кВ АПК / Р. Г. Говердовский // Инновационная наука. – 2017. – № 02–1. – С. 34–38.

2. Дубяго, М. Н. Разработка модели старения и определение остаточного ресурса изоляции силовых кабелей / М. Н. Дубяго // Изв. ЮФУ. Техн. науки. – 2014. – № 4 (153). – С. 107–114.

3. Fault analysis in underground cables / I. Paprotny [et al.]. – Sacramento : California Energy Commission. – 2011. – 107 p.

4. Underground power cables maintainability – the biodeterioration of external polymeric jackets and its influence on insulation ageing / L. Lingvay [et al.] // Journal of sustainable energy. – 2014. – Vol. 5, № 2. – P. 1–6.

5. Москвитин, Е. С. Сложность применения неразрушающих методов испытания бумажно-масляной изоляции кабелей при диагностике их состояния / Е. С. Москвитин // Информационные технологии: наука, техника, технология, здоровье : материалы XVII Междунар. науч.-практ. конф., Харьков, 22–26 мая 2009 г. – Харьков, 2009. – Ч. I. – С. 542.

6. Ларина, Э. Т. Силовые кабели и кабельные линии / Э. Т. Ларина. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 368 с.

7. Белоруссов, Н. И. Электрические кабели, провода и шнуры : справ. / Н. И. Белоруссов, А. Е. Саакян, А. И. Яковлева ; под ред. Н. И. Белоруссова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 536 с.

8. Harriman, E. Environmental Challenges and Materials Restrictions in Coated Wire and Cable [Electronic resource] / E. Harriman, T. Greiner, V. Veleva // NFPA Research Symposium. – 2003. – Mode of access : https://www.turi.org/content/download/3796/46342/file/nfpapaper03.pdf. – Date of access : 20.04.2022.

References

1. Goverdovskij, R. G. Tekhnicheskoe sostoyanie kabel'nyh linij 6–10 kV APK / R. G. Goverdovskij // Innovacionnaya nauka. – 2017. – № 02–1. – S. 34–38.

2. Dubyago, M. N. Razrabotka modeli stareniya i opredelenie ostatochnogo resursa izolyacii silovyh kabelej / M. N. Dubyago // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. – 2014. – № 4 (153). – S. 107–114.

3. Fault analysis in underground cables / I. Paprotny [et al.]. – Sacramento: California Energy Commission. – 2011. – 107 p.

4. Underground power cables maintainability – the biodeterioration of external polymeric jackets and its influence on insulation ageing / L. Lingvay [et al.] // Journal of sustainable energy. – 2014. – Vol. 5, № 2. – P. 1–6.

5. Moskvitin, E. S. Slozhnost' primeneniya nerazrushayushchih metodov ispytaniya bumazhno-maslyannoj izolyacii kabelej pri diagnostike ih sostoyaniya / E. S. Moskvitin // Informacionnye tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnologiya, zdorov'e: materialy XVII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Har'kov, 22–26 maya 2009 g. – Har'kov, 2009. – Ch. I. – S. 542.

6. Larina, E. T. Silovye kabeli i kabel'nye linii / E. T. Larina. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 368 s.

7. Belorussov, N. I. Elektricheskie kabeli, provoda i shnury : sprav. / N. I. Belorussov, A. E. Saakyan, A. I. Yakovleva ; pod red. N. I. Belorussova. – 5 izd., pererab. i dop. – M. : Energoatomizdat, 1987. – 536 s.

8. Harriman, E. Environmental Challenges and Materials Restrictions in Coated Wire and Cable [Electronic resource] / E. Harriman, T. Greiner, V. Veleva // NFPA Research Symposium. – 2003. – Mode of access : https://www.turi.org/content/download/3796/46342/file/nfpapaper03.pdf. – Date of access : 20.04.2022.

УДК 004.9: (504.03 + 620.9)

В. Р. Кузьмин[1], Л. В. Массель[2]

ОЦЕНКА УЩЕРБОВ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ОБЪЕКТАМИ ЭНЕРГЕТИКИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

[1]Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия
[2]Доктор технических наук, профессор, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Поставлена задача оценки ущербов от загрязнения окружающей среды объектами энергетики в исследованиях устойчивости энергетических и экологических систем. Показана связь исследований устойчивости энергетических и экологических систем и возможность рассмотрения загрязнений окружающей среды объектами энергетики как одной из при-

родных угроз энергетической безопасности. Рассмотрена информационно-вычислительная система для оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики и поддержки принятия решений по снижению их вредного воздействия.

Ключевые слова: экология, экологический ущерб, окружающая среда, объекты энергетики, информационно-вычислительная система.

V. R. Kuzmin[1], L. V. Massel[2]

DAMAGE ASSESSMENT OF ENERGY OBJECTS' ENVIRONMENTAL POLLUTION IN RESEARCH OF RESILIENCE OF ENERGY AND ECOLOGICAL SYSTEMS

[1]Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation
[2]Doctor of Engineering Science, professor, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Annotation. The task of assessing the damage from environmental pollution by energy facilities in studies of the sustainability of energy and ecological systems has been set. The connection between studies of the sustainability of energy and ecological systems and the possibility of considering environmental pollution by energy facilities as one of the natural threats to energy security are shown. An informational and computing system for assessing environmental pollution by energy facilities and supporting decision-making to reduce their harmful effects is considered.

Keywords: ecology, environmental damage, environment, energy objects, informational computational system.

Введение. В коллективе, представляемом авторами, выполняется работа по интеграции исследований устойчивости энергетических, экологических и социальных систем, причем исследования устойчивости рассматриваются в смысле «Resilience», что часто переводится на русский язык как «упругая устойчивость». Устойчивость в смысле «Resilience» определяется как способность системы возвращаться к равновесию или скорее способность вернуться к равновесию и развиваться, несмотря на дальнейшие толчки и нарушения [14]. Наиболее близко к этому понятие «живучесть», исследованиями в этой области в ИСЭМ СО РАН занимались в 90-х годов прошлого столетия [1] и продолжаются в настоящее время [2]. Следует отметить, что если в России исследования в этой области ведутся в основном в области технической устойчивости, то, например, в Западной Европе рассматривают это направление шире и включают в исследование также экологическую, психологическую, социальную и экономическую устойчивость. Сравнение этих подходов, развиваемых в ИСЭМ СО РАН и Международном институте прикладного системного анализа (Австрия), было выполнено с участием авторов в [4].

Настоящая статья посвящена преимущественно проблемам экологической устойчивости. Согласно экологическому подходу, устойчивость – мера постоянства экосистем и их способности адаптироваться к изменениям и нарушениям и по-прежнему поддерживать одни и те же отношения между населением или государством [18, 19]. Понятия постоянства, изменения и непредсказуемости в этом

определении отличаются от эффективности, постоянства и предсказуемости в технической устойчивости. Под устойчивостью экосистемы понимается способность поглощать возмущающие факторы и реорганизовываться, пока система претерпевает изменения.

Исследования устойчивости энергетических систем базируются на исследованиях энергетической безопасности [9, 11], в которых природные угрозы являются одной из стратегических угроз. Загрязнение окружающей среды может стать одной из природных угроз ЭБ, поскольку требования к снижению уровня загрязнений могут повлиять на работу энергетических объектов (требования к очистке, снижению мощности и т. п.) и, соответственно, на их устойчивость.

Поскольку показатели устойчивости экологических систем определяются преимущественно значениями предельно допустимых концентраций (ПДК), в рамках исследований экологической устойчивости авторами выполнена работа по оценке загрязнения окружающей среды объектами энергетики. При этом важно не только оценить количественные показатели загрязненности окружающей среды и соответствие их ПДК, но и получить оценки экологических ущербов, наносимых выбросами от объектов энергетики. Необходимость проведения подобных исследований обусловливается в том числе «Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 года» [12] и «Стратегией социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года» [10]. В рамках обеих стратегий предусматривается переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, рациональное природопользование [13, 16].

В статье рассматривается информационно-вычислительная система WICS (ИВС WICS), предназначенная для оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики и поддержки принятия решений по снижению их вредного воздействия. ИВС позволяет выполнять расчеты количественных показателей выбросов загрязняющих веществ от объектов энергетики, рассчитать рассеивание этих веществ в воздухе, а также выполнить оценку экономических ущербов на основании полученных показателей. Приведены используемые нормативные методики. Также показаны результаты вычислительного эксперимента, проведенного с использованием сведений об объектах энергетики, расположенных на территории г. Иркутска.

Материалы и методы исследования. Рассмотрим методики, использованные в работе для выполнения оценок ущербов.

Для проведения количественных расчетов показателей выбросов используются нормативные методики [5] и [6]. Они позволяют выполнить расчет таких загрязняющих веществ (ЗВ), как твердые вещества, оксиды серы, оксиды азота и ряд других. Применение двух методик связано с ограничением области их применения. Методика [6] применяется для объектов энергетики производительностью до 30 Гкал/ч, методика [5] – для объектов энергетики производительностью свыше 30 Гкал/ч.

Для расчета рассеивания ЗВ в атмосферном воздухе в работе используется нормативная методика МРР-2017 [8]. Методика обеспечивает расчет переноса ЗВ на расстоянии до 100 километров от источника выброса. В методику включены методы, позволяющие оценить как максимальные разовые концентрации, так и долгопериодные концентрации ЗВ в атмосферном воздухе. В методику также включена возможность учета рельефа в расчетах и территориальные коэффициенты для различных территорий Российской Федерации, которые позволяют выполнять расчеты с большей точностью.

Для оценки экономических ущербов применяются две нормативные методики: «Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды» [3] и «Методика исчисления размера вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды» [7]. Эти методики различаются набором входных параметров для определения экономических ущербов, однако главное их отличие заключается в применимости по времени. Методика [7] отменяет действие [3], но может применяться только начиная с 28 января 2021 года, поэтому для выполнения оценок экономических ущербов до этой даты используется старая методика.

Авторский методический подход к оценке загрязнения окружающей среды объектами энергетики был рассмотрен в [20].

Для выполнения оценок загрязнения окружающей среды объектами энергетики и поддержки принятия решений по снижению их вредного воздействия была разработан научный прототип ИВС «WICS», архитектура которой представлена на рис. 1.

WICS реализована в виде клиент-серверного приложения с применением агентно-сервисной архитектуры. Серверная часть интегрирует основные компоненты для выполнения расчетов, ряд сервисных компонентов (например, для получения и обработки погодных данных), базу данных и базу знаний, а также компонент поддержки принятия решений. Клиентская часть включает

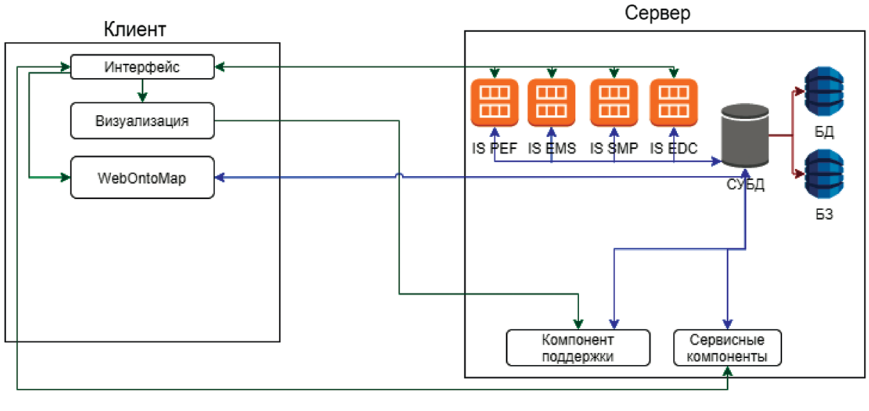


Рис. 1. Архитектура информационно-вычислительной системы WICS

в себя пользовательский интерфейс, средства визуализации полученных результатов и компонент для построения онтологий, связанный с базой знаний.

ИВС позволяет проводить исследования по оценке текущей ситуации с загрязнением окружающей среды, планировать и оценивать эффективность мероприятий, направленных на снижение выбросов загрязняющих веществ, а также планировать размещение новых объектов энергетики и оценивать их влияние.

Для апробации разработанного научного прототипа ИВС был проведен вычислительный эксперимент с использованием данных об объектах энергетики, расположенных в городе Иркутске. Список объектов включает в себя сведения о девятнадцати котельных, использующих в качестве топлива бурый и каменный угли. Погодные данные обновлялись с периодичностью в 12 часов. Эксперимент проведен с использованием данных за 2020 год.

Результаты исследования и их обсуждение. В результате апробации ИВС были получены следующие результаты. В табл. 1 представлены результаты количественных оценок выбросов от рассматриваемых объектов энергетики.

Таблица 1. **Агрегированные результаты количественных оценок выбросов от объектов энергетики**

Объект	Выбросы всего, т/год	Твердые вещества, т/год	SO, т/год	NO_X, т/год	Очистка, %	Установленная мощность, Гкал/ч
Котельная на Баррикад, 145	501	349	151	0,8	0	4,1
Котельная на 4-й Советской, 1	125	87,2	37,8	0,2	0	2,2
Котельная на Воровского, 18	159	111,2	48,2	0,2	0	3,2
Итого	23004	16051,4	6915,4	37,3	–	309,4

На рис. 2 показано геовизуальное представление результатов количественной оценки выбросов твердых веществ.

Синим цветом на рисунке обозначены объекты энергетики, рассматриваемые в рамках вычислительного эксперимента. При помощи тепловой карты показаны объемы выбросов от конкретного объекта с градацией от зеленого к красному. Чем выше объем выбросов ЗВ от объекта, тем краснее тепловая карта в точке.

На основании результатов количественной оценки выбросов ЗВ от объектов энергетики была выполнена оценка экономического ущерба, наносимого окружающей среде. Результаты приведены в табл. 2.

С использованием результатов количественной оценки выбросов ЗВ также был проведен расчет рассеивания ЗВ в атмосферном воздухе. В табл. 3 приведены агрегированные результаты расчета рассеивания твердых веществ.

На рис. 3 показана геовизуализация полученных результатов расчета рассеивания.

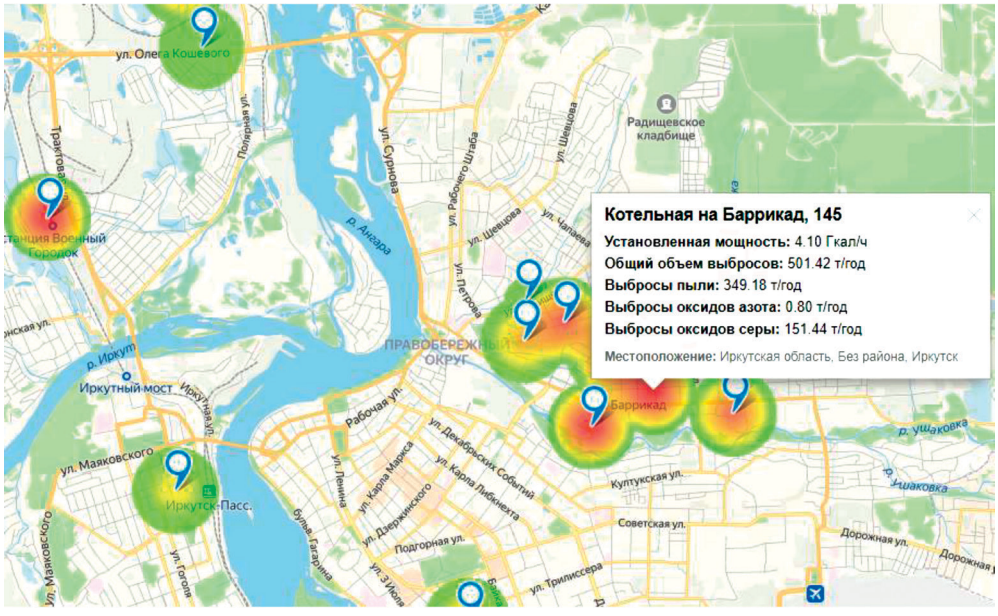


Рис. 2. Геовизуализация количественной оценки выбросов твердых веществ от объектов энергетики

Таблица 2. **Результаты оценки экономического ущерба**

Объект	Ущерб от твердых веществ, руб.	Ущерб от SO, руб.	Ущерб от NO_X, руб.	Общий ущерб, руб.
Котельная на Баррикад, 145	3205841	1390343	9203	4605389
Котельная на 4-й Советской, 1	800840	347317	2295	1150453
Котельная на Воровского, 18	2671672	1158679	7677	3838029

Таблица 3. **Агрегированные результаты расчета рассеивания ЗВ**

Объект	Минимальное расстояние, м	Максимальное расстояние, м	Среднее расстояние, м	Минимальная разовая концепция, мг/м^3	Максимальная разовая концепция, мг/м^3	Средняя разовая концепция, мг/м^3
Котельная на Московской, 1а	528	1654,1	1255,3	529,3	4586,5	1460,9
Котельная на Баррикад, 159	59,4	218,8	92,5	2,9	18,5	11,6

Синим цветом на рисунке показаны объекты энергетики, рассматриваемые в рамках вычислительного эксперимента. При помощи тепловой карты показаны концентрации выбросов с градацией от зеленого к красному. Чем выше объем концентрация ЗВ в точке, тем краснее тепловая карта в точке.

Также были загружены результаты анализа проб снега. Геовизуализация результатов анализа на содержание SO_4 приведена на рис. 4.

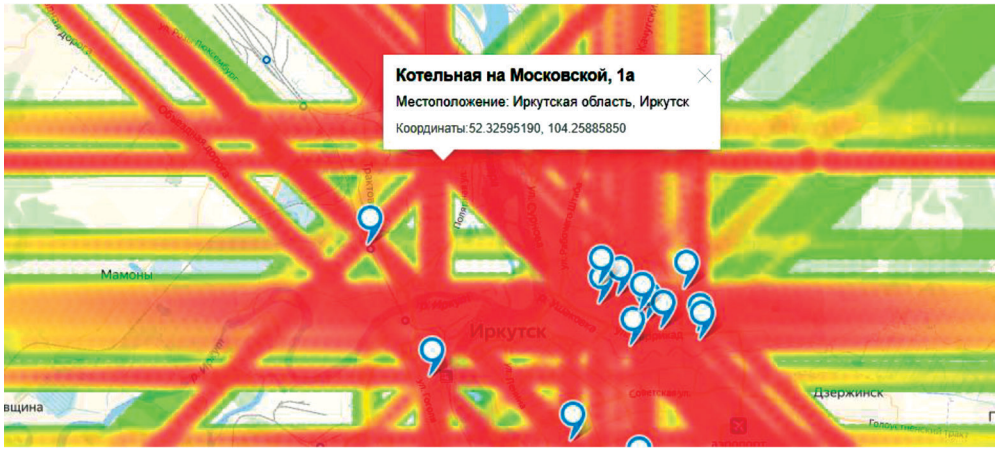


Рис. 3. Геовизуализация результатов расчета рассеивания твердых веществ

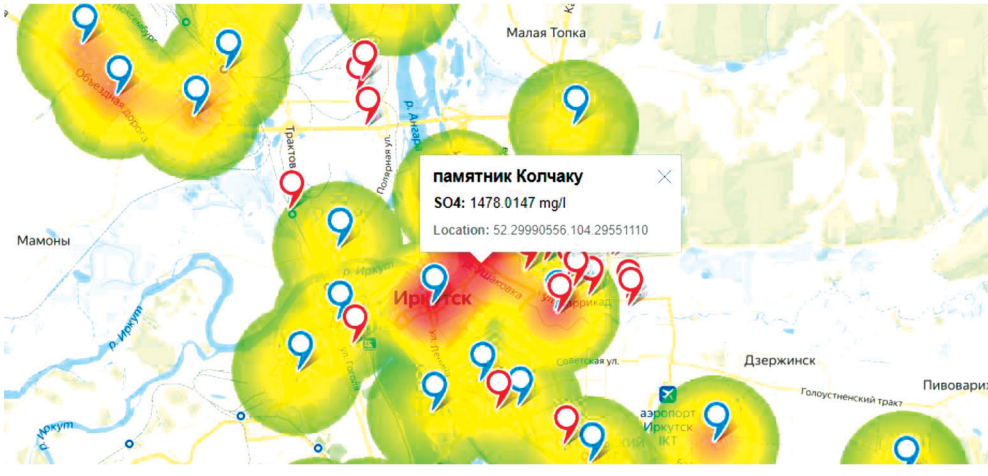


Рис. 4. Геовизуализация результатов анализа проб снега на содержание SO_4

Синими маркерами на карте обозначены места взятия проб снега, красными – объекты энергетики, рассматриваемые в рамках вычислительного эксперимента. Чем краснее тепловая карта, тем выше концентрация загрязняющего вещества в точке замера.

С использованием эмпирического байесовского кригинга [15, 17] была выполнена интерполяция результатов анализа проб снега. Геовизуализация результатов представлена на рис. 5.

На основании результатов вычислительного эксперимента можно сделать следующие выводы:

годовой объем выбросов загрязняющих веществ составил около 23 тыс. т;

наибольший вклад в загрязнение окружающей среды вносят твердые вещества. Их объем составил 70 % от всех выбросов (или 16 тыс. т);

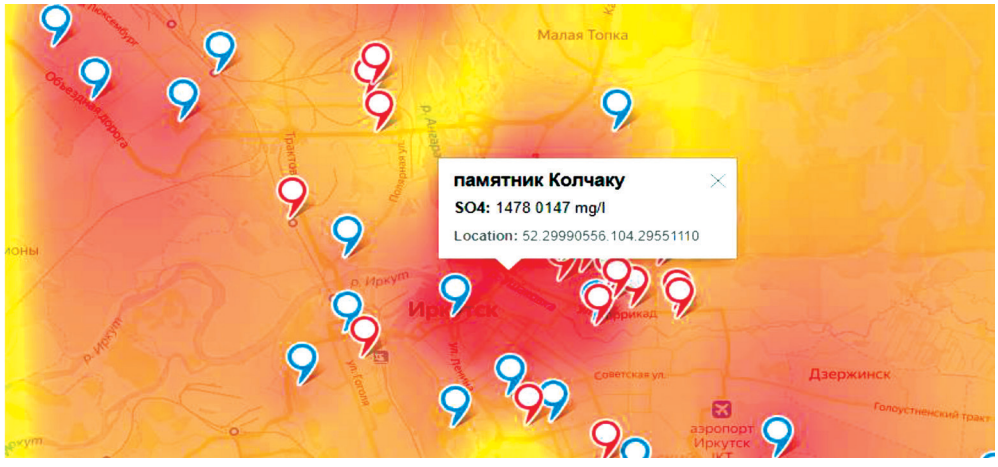


Рис. 5. Геовизуализация интерполяции результатов анализа проб снега на содержание SO_4

в качестве основных источников загрязнения выступают объекты энергетики, расположенные на улицах Розы Люксембург 216, Зверева 35, Баррикад 145;

сравнение результатов расчетов рассеивания загрязняющих веществ и результатов анализа проб снега показывает их сопоставимость и, следовательно, корректность применяемых моделей.

Заключение. В статье была рассмотрена постановка задачи оценки ущербов от загрязнения окружающей среды объектами энергетики в исследованиях устойчивости энергетических и экологических систем. Показана связь исследований устойчивости энергетических и экологических систем и возможность рассмотрения загрязнений окружающей среды объектами энергетики как одной из природных угроз энергетической безопасности. Рассмотрен подход к оценке загрязнения окружающей среды объектами энергетики и поддержке принятия решений по снижению их вредного воздействия с использованием авторской информационно-вычислительной системы WICS (ИВС WICS). Описана методологическая основа построения этой системы (используемые в Российской Федерации нормативные методики). Приведены результаты исследования (апробация WICS на данных по г. Иркутску).

Благодарности. Данное исследование было выполнено при частичной финансовой поддержке проекта РНФ № 22-21-00841.

Список использованных источников

1. Массель, Л. В. Оценка рисков природных и техногенных угроз устойчивости энергетических, экологических и социальных систем на основе интеллектуальных информационных технологий / Л. В. Массель, Н. П. Комендантова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – № 4 (16). – С. 31–45.

2. Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС : РД 34.02.305-98 : введ. 21.01.1998. – М. : ПМБ ВТИ, 1998. – 36 с.

3. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час : введ. 09.07.1999. – М. : Гос. ком. по охране окружающей среды Рос. Федерации, 1999. – 53 с.

4. Об утверждении методики исчисления размера вреда, причиненного атмосферному воздуху как компоненту природной среды [Электронный ресурс]: приказ Минприроды России, 28 янв 2021., № 59 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – Режим доступа : https://docs.cntd.ru/document/573536168. – Дата доступа : 05.06.2022

5. Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе [Электронный ресурс]: приказ Минприроды России от 6 июня 2017 г., № 273 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – Режим доступа : https://docs.cntd.ru/document/456074826. – Дата доступа : 06.06.2022

6. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года [Электронный ресурс]: распоряжение Правительства Рос. Федерации, 29 окт. 2021 г., № 3052-р // Правительство России : офиц. сайт. – Режим доступа : http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf. – Дата доступа : 30.05.2022.

7. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года [Электронный ресурс]: распоряжение Правительства Рос. Федерации, 9 июня 2020 г., № 1523-р // Правительство России : офиц. сайт. – Режим доступа : http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf. – Дата доступа : 30.05.2022.

8. A critical review of Russia's energy strategy in the period until 2035 / A. N. Alekseev [et al.] // International Journal of Energy Economics and Policy. – 2019. – Vol. 9, № 6. – P. 95–102.

9. Davoudi, S. Resilience: A Bridging Concept or a Dead End / S. Davoudi // Planning Theory and Practice. – 2012. – Vol. 13 (2). – P. 299–307.

10. Diggle, Peter. J. Model-based Geostatistics / Peter J. Diggle, Paulo J. Ribeiro. – New York : Springer-Verlag New York, 2007. Ser. Springer Series in Statistics – 230 p.

11. Egorchenkov, A. V. Social aspects of environmental issues in the context of the national project «Ecology» / A. V. Egorchenkov, D. A. Egorchenkov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Moscow, 2020. – 5 p.

12. Gribov, A. Empirical Bayesian kriging implementation and usage / A. Gribov, K. Krivoruchko // Science of The Total Environment. – 2020. – Vol. 722, 137290. – 20 p.

13. Holling, C. Engineering Resilience Versus Ecological Resilience / C. Holling // Engineering Within Ecological Constraints / ed. Peter Schultz. – Washington : National Academy Press, 1996. – P. 31–43.

14. Holling, C. Resilience and Stability in Ecological Systems / C. Holling // Annual Review of Ecology and Systematics. – 1973. – Vol. 4. – P. 1–23.

15. Kuzmin, V. R. Methodical Approach for Impact Assessment of Energy Facilities on Environment / V. R. Kuzmin, L. V. Massel // Communications in Computer and Information Science. – 2022. – Vol. 1539 CCIS. – P. 265–276.

References

1. Massel', L. V. Ocenka riskov prirodnyh i tekhnogennyh ugroz ustojchivosti energeticheskih, ekologicheskih i social'nyh sistem na osnove intellektual'nyh informacionnyh tekhnologij / L. V. Massel', N. P. Komendantova // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. – 2019. – № 4 (16). – S. 31–45.

2. Metodika opredeleniya valovyh vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv v atmosferu ot kotel'nyh ustanovok TES : RD 34.02.305-98 : vved. 21.01.1998. – M. : PMB VTI, 1998. – 36 s.

3. Metodika opredeleniya vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv v atmosferu pri szhiganii topliva v kotlah proizvoditel'nost'yu menee 30 tonn para v chas ili menee 20 Gkal v chas : vved. 09.07.1999. – M. : Gos. kom. po ohrane okruzhayushchej sredy Ros. Federacii, 1999. – 53 s.

4. Ob utverzhdenii metodiki ischisleniya razmera vreda, prichinennogo atmosfernomu vozduhu kak komponentu prirodnoj sredy [Electronic resource]: prikaz Minprirody Rossii, 28 yanv 2021, № 59 //

Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tekhnicheskih dokumentov. – Mode of access : https://docs.cntd.ru/document/573536168. – Date of access : 05.06.2022

5. Ob utverzhdenii metodov raschetov rasseivaniya vybrosov vrednyh (zagryaznyayushchih) veshchestv v atmosfernom vozduhe [Electronic resource]: prikaz Minprirody Rossii, 6 iyunya 2017, № 273 // Elektronnyj fond pravovyh i normativno-tekhnicheskih dokumentov. – Mode of access : https://docs.cntd.ru/document/456074826. – Date of access : 06.06.2022

6. Strategiya social'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii s nizkim urovnem vybrosov parnikovyh gazov do 2050 goda [Electronic resource]: rasporyazhenie Pravitel'stva Ros. Federacii, 29 okt. 2021 g., № 3052-r // Pravitel'stvo Rossii : oficial'nyj sajt. – Mode of access : http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf. – Date of access : 30.05.2022.

7. Energeticheskaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2035 goda [Electronic resource]: rasporyazhenie Pravitel'stva Ros. Federacii, 9 iyunya 2020 g., № 1523-r // Pravitel'stvo Rossii : ofic. sajt. – Mode of access : http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf. – Date of access : 30.05.2022.

8. A critical review of Russia's energy strategy in the period until 2035 / A. N. Alekseev [et al.] // International Journal of Energy Economics and Policy. – 2019. – Vol. 9, № 6. – P. 95–102.

9. Davoudi, S. Resilience: A Bridging Concept or a Dead End / S. Davoudi // Planning Theory and Practice. – 2012. – Vol. 13 (2). – P. 299–307.

10. Diggle, Peter. J. Model-based Geostatistics / Peter J. Diggle, Paulo J. Ribeiro. – New York : Springer-Verlag New York, 2007. Ser. Springer Series in Statistics – 230 p.

11. Egorchenkov, A. V. Social aspects of environmental issues in the context of the national project «Ecology» / A. V. Egorchenkov, D. A. Egorchenkov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Moscow, 2020. – 5 p.

12. Gribov, A. Empirical Bayesian kriging implementation and usage / A. Gribov, K. Krivoruchko // Science of The Total Environment. – 2020. – Vol. 722, 137290. – 20 p.

13. Holling, C. Engineering Resilience Versus Ecological Resilience / C. Holling // Engineering Within Ecological Constraints / ed. Peter Schultz. – Washington : National Academy Press, 1996. – P. 31–43.

14. Holling, C. Resilience and Stability in Ecological Systems / C. Holling // Annual Review of Ecology and Systematics. – 1973. – Vol. 4. – P. 1–23.

15. Kuzmin, V. R. Methodical Approach for Impact Assessment of Energy Facilities on Environment / V. R. Kuzmin, L. V. Massel // Communications in Computer and Information Science. – 2022. – Vol. 1539 CCIS. – P. 265–276.

УДК 330.3

О. А. Любчик

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УГРОЗ И РИСКОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В ОТДЕЛЬНЫХ СТРАНАХ – ЭКСПОРТЕРАХ И СТРАНАХ – ИМПОРТЕРАХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассматриваются основные тенденции в оценке энергетической безопасности страны с учетом рисков и угроз. На примере ряда стран выявляются наиболее важные риски и угрозы энергетической безопасности, характерные для стран, экспортирующих энергоресурсы, и стран, их импортирующих.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, риски и угрозы, импортеры и экспортеры энергоресурсов, национальная безопасность.

O. A. Liubchyk

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF ENERGY SECURITY THREATS AND RISKS IN SEVERAL ENERGY RESOURCES EXPORTING AND IMPORTING COUNTRIES

Institute of Power Engineering of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The article discusses the main trends in country's energy security assessment, taking into account risks and threats. On the example of a number of countries, the most important risks and threats to energy security are identified, which are typical for countries exporting energy resources and countries importing them.

Keywords: energy security, risks and threats, importers and exporters of energy resources, national security.

Введение. Энергетическая безопасность занимает важное место в национальной безопасности. Оценка уровня энергобезопасности может осуществляться по ряду параметров, которые отражают структуру рисков и угроз.

Оценка уровня энергетической безопасности страны является достаточно сложной задачей, так как требуется рассмотрение различных сторон жизни страны. Современные подходы к оценке уровня энергетической безопасности основаны на комплексном подходе к выбору факторов, влияющих на энергетическую безопасность и динамику процессов в этой области, и рассмотрении энергетической безопасности как объекта управления: целостной системы, элементов и связей, функций, процессов и материала системы. Такие модели способны учитывать динамику технологических, политических, экономических и других факторов, действующих в стране и в мире, и основываются на рисках и угрозах энергетической безопасности страны.

Материалы и методы исследования. Риски и угрозы энергетической безопасности могут исходить от стран, относиться к конкретным видам топлива, ресурсам или секторам. Угрозы и риски разделяют на внешние, внутренние и трансграничные по источнику влияния на энергетическую безопасность страны.

Имеется ряд угроз, которые являются общими для всех стран, например, такие, как снижение инвестиций в топливно-энергетический комплекс, неэффективность и износ оборудования, терроризм и экстремистские действия, техногенные аварии и пожары, стихийные бедствия, ошибки в принятии решений. Однако в зависимости от уровня экономического развития страны, обеспеченности ее собственными энергоресурсами, ее географического положения, объема потребления энергоресурсов могут возникать специфические угрозы, которые характерны для группы стран или отдельной страны.

В странах с высоким уровнем развития оценка уровня энергетической безопасности может ограничиваться только экономическими вопросами, вопросами физической доступности первичных энергоресурсов, надежности и эффективности оборудования энергоисточников и энергетических систем. Международное энергетическое агентство (МЭА), подчеркивая необходимость постоянной

доступности источников энергии, особо выделяет такие отдельные параметры, как физическая доступность ресурсов, их бесперебойное снабжение и экономическая доступность. В то же время такое обозначение границ определения уровня энергетической безопасности достаточно специфично и приемлемо в основном для стран с высоким уровнем развития рыночной экономики и только при стабильной ситуации на энергетических рынках [1, 2].

Результаты и их обсуждение. Анализ, проведенный для Республики Беларусь стран Балтии, показывает наличие как минимум двух основных рисков энергетической безопасности недопустимой интенсивности для стран этого региона: зависимость от одного поставщика энергоресурсов и неправильный (с точки зрения прозрачности, компетентности и знаний) процесс принятия решений. Акцентируется внимание, что нейтрализация этих двух рисков или смягчение вызванных ими негативных последствий должно стать приоритетами энергетической безопасности Литвы, Латвии и Эстонии [3].

Также на сильную зависимость страны от импорта энергоресурсов сделан акцент в Стратегии национальной безопасности Венгрии, принятой в 2012 г. [4] в Украине.

Китайские ученые выделяют более широкий набор рисков и угроз, характерный в основном для стран – импортеров энергоресурсов:

наличие зависимости страны-импортера от стран-экспортеров энергетических ресурсов;

возникновение киберугрозы или кибератаки на предприятия энергетической отрасли и энергетические системы и сети;

экстремизм, террористические атаки;

последствия негативного воздействия на окружающую среду, в том числе глобального потепления;

срыв или задержка снабжения энергоресурсами по причине бойкота, политической нестабильности или локальных конфликтов;

манипулирование в принятии решений, касающихся энергетической отрасли, через ответственных лиц.

Однако для стран-экспортеров перечень рисков и угроз может быть иным. Так, в [5] отмечается, что на мировом энергетическом рынке имеется тенденция к принятию политизированных решений, к примеру, стремление ряда стран к минимизации энергетических отношений с Россией, даже в ущерб собственным экономическим интересам. Снижение цен на ископаемое топливо ведет к снижению инвестиций в области добычи и транспорта энергоресурсов, что приводит к сокращению предложения энергетических ресурсов на рынке.

Дефицит предложений на рынке энергоресурсов оказывает влияние уже на страны-импортеры. Например, ограниченное предложение ископаемых топлив на рынке, которое наблюдалось на протяжении всего 2021 г., привело к вынужденному отказу Японии, почти на 90 процентов зависящей от импортного топлива, от выполнения целей, поставленных на 26-й конференции сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата [5].

В исследовании [6] выделяются следующие риски и угрозы для России как для страны-экспортера энергоресурсов:

смена мировой энергетической парадигмы (интенсивное развитие возобновляемой энергетики);

тенденции к глобальному снижению цен на углеводороды;

отставание от зарубежных инновационных разработок в сфере энергетики при невысокой инновационной активности в стране;

политизация мирового энергетического рынка, которая сопровождается дискриминацией российских энергетических компаний и применением экономических санкций;

замедление потребления топливно-энергетических ресурсов в сравнении с экономическим ростом;

снижение доли российских энергетических компаний на мировом энергетическом рынке [6].

Ранее для Российской Федерации был предложен следующий набор и следующая структура существующих и потенциальных угроз энергетической безопасности. Все угрозы были классифицированы в пять групп:

экономические (дефицит инвестиционных ресурсов, энергорасточительность экономики, высокие цены на ТЭР, слабая диверсифицированность энергоснабжения и т. д.);

социально-политические (трудовые конфликты, диверсии, терроризм, экстремистские действия общественных движений антиэнергетической направленности);

техногенные (аварии, взрывы, пожары антропогенно-техногенного происхождения на объектах ТЭК, те же события на объектах других отраслей экономики, связанных с объектами ТЭК);

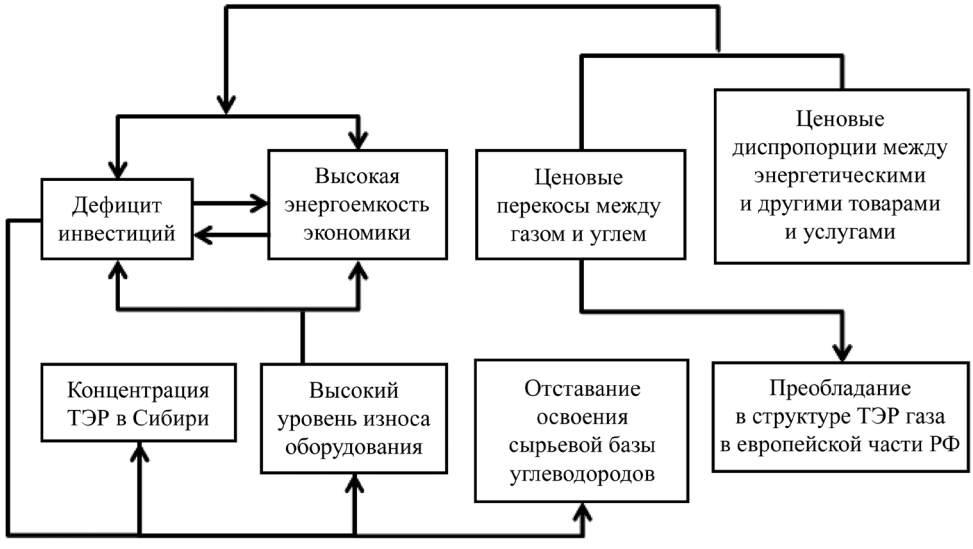
природные (стихийные бедствия, суровые зимы с превышениями нормативных температурных условий, учитываемых при проектировании систем отопления; длительные маловодья на реках с ГЭС);

управленческо-правовые (ошибки в экономической политике государства, неполнота проработки решений по перспективному развитию энергетики; неэффективность энергосберегающей политики государства и прочие).

Среди большого числа угроз были выделены основные [5]. Перечень этих угроз и их взаимосвязи представлены на рисунке [7].

Как показано на рисунке, низкая энергоэффективность экономики напрямую взаимосвязана с дефицитом инвестиций, который оказывает влияние на снижение темпа обновления оборудования в отраслях топливно-энергетического комплекса, объема разведанных запасов ископаемых энергоресурсов и темпов освоения новых месторождений по причине экономических рисков. В то же время низкий темп обновления оборудования ведет к энергетической неэффективности экономики и дефициту инвестиций, образуя замкнутый круг.

Недостаточные темпы ликвидации ценовых дисбалансов между природным газом и углем также приводит к снижению инвестиций в энергетический



Основные стратегические угрозы энергетической безопасности России

комплекс, к нему же ведут и низкие темпы преодоления ценовых перекосов между энергетическими и другими товарами и услугами. Кроме того, ценовой дисбаланс между природным газом и углем, а также сосредоточение запасов ископаемых энергоресурсов приводит к тому, что доля природного газа в топливно-энергетическом балансе западной части страны остается крайне высокой.

Позже в Доктрине энергетической безопасности Российской Федерации до 2030 года были подробно сформулированы вызовы, угрозы и риски в области энергетической безопасности. Они объединены в три группы: внешние, внутренние и трансграничные вызовы и угрозы. Первая включает в себя подгруппы внешнеэкономических, внешнеполитических и военно-политических вызовов и/или угроз.

К внешнеэкономическим вызовам энергетической безопасности относят: перемещение центра мирового экономического роста в Азиатско-Тихоокеанский регион; замедление роста мирового спроса на энергоресурсы и изменение его структуры; усиление конкуренции экспортеров энергоресурсов; изменение международного нормативно-правового регулирования; рост производства сжиженного природного газа и увеличение доли возобновляемых источников энергии. Как внешнеполитические вызовы отмечено стремление перехода к «зеленой» экономике и проведение политики, препятствующей изменениям климата и направленной на охрану окружающей среды. Трансграничным вызовом энергетической безопасности является развитие и распространение прорывных технологий в сфере энергетики, например, добычи углеводородного сырья из трудно извлекаемых запасов или развития цифровых и интеллектуальных технологий.

Новая редакция Стратегии национальной безопасности Украины, утвержденная в 2012 году, также отмечает, что обеспечение энергетической безопасно-

сти в стране является результатом проведения эффективной как внешней, так и внутренней политики. Угрозы, определенные в Стратегии, включают в себя:

недостаточное использование собственного энергетического потенциала;

низкую эффективность использования топливно-энергетических ресурсов;

относительно медленные темпы внедрения новых технологий;

недостаточную реализацию энерготранзитного потенциала и интеграцию Украины в европейский энергетический рынок;

отсутствие сводного энергетического баланса страны [3].

В исследовании [8] обращается внимание на то, что обеспечение надежного и адекватного энергоснабжения на местном, национальном и глобальном уровнях требует рассмотрения широкого круга вопросов, которые могут усугубить неопределенность и привести к затратам, иными словами – угроз энергетической безопасности. Среди них:

геополитическая напряженность в богатых энергоносителями поясах, способная помешать энергоснабжению;

неопределенность спроса на энергию, обусловленную макроэкономическими факторами;

волатильность цен на энергию;

постоянная энергетическая бедность (или отсутствие доступа к чистой энергии), что может поставить под угрозу развитие и привести к конфликту;

угрозы реализации определенных энергетических стратегий для других секторов – например, возможная связь разработки биотоплива на основе кукурузы со стремительным ростом цен на кукурузу и последствиями для продовольственной безопасности;

неопределенность регулирования, как и в случае регулирования климата, которая имеет прямые последствия для некоторых видов топлива с побочными эффектами для других конкурирующих энергетических ресурсов.

Заключение. Результаты угроз энергетической безопасности, проявляющиеся главным образом в неопределенности спроса, предложения и цен, будут различаться в разных странах и сообществах в зависимости от их местоположения, размера потребления энергии, зависимости от импорта или экспорта и структуры энергопотребления. В то же время способность справляться с этими угрозами во многом определяется социально-экономическими, политическими и институциональными условиями в странах [9]. Выявление и систематизация рисков и угроз должна включать в себя не только мировой опыт в изучении энергетической безопасности, но и характерные особенности отдельной страны.

Список использованных источников

1. The Systemic Approach for Estimating and Strategizing Energy Security: The Case of Ukraine / Y. Kharazishvili [et al.] // Energies. – 2021. – № 14 (8). – P. 2126–2156.

2. Мазур, И. М. Методика оценки энергетической безопасности [Электронный ресурс] / И. М. Мазур // Актуальные вопросы современной науки. – 2014. – № 31. – Режим доступа :

https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-otsenki-energeticheskoy-bezopasnosti/viewer. – Дата доступа : 22.04.2022.

3. Molis, A. Building methodology, assessing the risks: the case of energy security in the Baltic States / A. Molis // Baltic Journal of Economics. – № 11. – 2011. – P. 59–80.

4. Хухлындина, Л. М. Энергетическая безопасность в системе национальной безопасности государства / Л. М. Хухлындина, А. М. Чиж // Актуальные проблемы международных отношений и глобального развития : сб. науч. ст. / Белорус. гос. ун-т ; сост. Е. А. Достанко ; редкол.: А. М. Байчоров (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2013. – Вып. 1. – С. 90–99.

5. Родионов, А. В. Направления обеспечения национальной энергетической безопасности в современных условиях (на примере Японии и США) / А. В. Родионов // Интеграционные процессы в современной науке : XXVIII Междунар. науч.-практ. конф., Анапа, 26 янв. 2022 г. : сб. науч. тр. / Науч.-исслед. центр «Иннова» ; редкол.: С. В. Бондаренко [и др.]. – Анапа, 2022. – С. 45–49.

6. Захаров, А. Н. Глобальная энергетическая проблема: новые вызовы и угрозы, возможности их преодоления / А. Н. Захаров // Вестн. МГИМО-Университета. – 2017. – № 1 (52). – С. 187–200.

7. Воропай, Н. И. Стратегические угрозы энергетической безопасности России / Н. И. Воропай, С. М. Сендеров, В. И. Рабчук // Всерос. эконом. журнал ЭКО. – 2006. – № 12 (390). – С. 42–58.

8. Krishman, R. Energy security through a framework of country risks and vulnerabilities / R. Krishman // Energy Sources, Part B : Economics, Planning and Policy. – 2016. – Vol. 11. – P. 32–37.

9. Доктрина энергетической безопасности российской федерации до 2030 года [Электронный ресурс] : Указ Президента Рос. Федерации 13 мая 2019 г., № 216 // М-во энергетики Рос. Федерации. – Режим доступа : https://minenergo.gov.ru/node/14766. – Дата доступа : 20.06.2022.

References

1. The Systemic Approach for Estimating and Strategizing Energy Security: The Case of Ukraine / Y. Kharazishvili [et al.] // Energies. – 2021. – № 14 (8). – P. 2126–2156.

2. Mazur, I. M. Metodika ocenki energeticheskoj bezopasnosti [Electronic resource] / I. M. Mazur // Aktual'nye voprosy sovremennoj nauki. – 2014. – № 31. – Mode of access : https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-otsenki-energeticheskoy-bezopasnosti/viewer. – Date of access : 22.04.2022.

3. Molis, A. Building methodology, assessing the risks: the case of energy security in the Baltic States / A. Molis // Baltic Journal of Economics. – № 11. – 2011. – P. 59–80.

4. Huhlyndina, L. M. Energeticheskaya bezopasnost' v sisteme nacional'noj bezopasnosti gosudarstva / L. M. Huhlyndina, A. M. CHizh // Aktual'nye problemy mezhdunarodnyh otnoshenij i global'nogo razvitiya : sb. nauch. st. / Belorus. gos. un-t ; sost. E. A. Dostanko ; redkol.: A. M. Bajchorov (gl. red.) [et al.]. – Minsk, 2013. – Iss. 1. – S. 90–99.

5. Rodionov, A. V. Napravleniya obespecheniya nacional'noj energeticheskoj bezopasnosti v sovremennyh usloviyah (na primere Yaponii i SSHA) / A. V. Rodionov // Integracionnye processy v sovremennoj nauke : XXVIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Anapa, 26 yanv. 2022 g. : sb. nauch. tr. / Nauchno-issledovatel'skij centr «Innova» ; redkol.: S. V. Bondarenko [et al.]. – Anapa, 2022. – S. 45–49.

6. Zaharov, A. N. Global'naya energeticheskaya problema: novye vyzovy i ugrozy, vozmozhnosti ih preodoleniya / A. N. Zaharov // Vestn. MGIMO-Universiteta. – 2017. – № 1 (52). – S.1 87–200.

7. Voropaj, N. I. Strategicheskie ugrozy energeticheskoj bezopasnosti Rossii / N. I. Voropaj, S. M. Senderov, V. I. Rabchuk // Vseros. Ekonom. zhurnal EKO. – 2006. – № 12 (390). – S. 42–58.

8. Krishman, R. Energy security through a framework of country risks and vulnerabilities / R. Krishman // Energy Sources, Part B : Economics, Planning and Policy. – 2016. – Vol. 11. – P. 32–37.

9. Doktrina energeticheskoj bezopasnosti Ros. Federacii do 2030 goda [Electronic resource] : Ukaz Prezidenta Ros. Federacii, 13 maya 2019 g., № 216 // M-vo energetiki Ros. Federacii. – Mode of access : https://minenergo.gov.ru/node/14766. – Date of access : 20.06.2022.

УДК 621.31.001.86

S. A. Minasyan[1], Kh. A. Shahbazyan[2]

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF STRUCTURAL CHANGES ON THE COUNTRY'S ENERGY SECURITY (ON THE EXAMPLE OF THE REPUBLIC OF ARMENIA)

[1]Doctor of Engineering Science, Professor, National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Republic of Armenia
[2]National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Republic of Armenia

Annotation. Armenia has taken a course of sustainable economic development, which implies, first of all, balanced development of the economy. In this context, the development of competition in the energy industry is the leading direction of sustainable development of the country's energy security. The electricity sector of Armenia includes several companies engaged in electricity generation and distribution generation is carried out by multiple companies both state-owned and private. The article analyzes the impact of changes in legislation in the energy sector, examines changes in the market structure and trade mechanisms. The conditions for ensuring the energy security of the Republic of Armenia in the process of structural changes are assessed taking into account the above factors. To assess the impact of the process of structural changes on the energy security of the Republic of Armenia, we will consider the elements of the structure of the energy security index.

Keywords: energy security, economic security, liberalization, electricity, market operator, power plant, supplier, natural monopoly.

С. А. Минасян[1], Х. А. Шахбазян[2]

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРАНЫ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ)

[1]Доктор технических наук, профессор,
Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Республика Армения
[2]Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Республика Армения

Аннотация. Армения взяла курс устойчивого экономического развития, который подразумевает прежде всего сбалансированное развитие экономики. В этом контексте развития конкуренция в энергетической отрасли является ведущим направлением устойчивого развития энергетической безопасности страны. Электроэнергетический сектор Армении включает в себя несколько компаний, занимающихся производством, распределением и передачей электроэнергии. Генерация осуществляется несколькими компаниями, как государственными, так и частными. В статье анализируется влияние изменения законодательства в энергетической сфере, рассматриваеются изменения в структуре рынка и торговые механизмы.

На основе вышеуказанных факторов дается оценка условиям обеспечения энергетической безопасности Республики Армения в процессе структурных изменений.

Для оценки влияния процесса структурных изменений на энергетическую безопасность Республики Армения рассмотрены элементы структуры энергетической безопасности.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, экономическая безопасность, либерализация, электроэнергия, оператор рынка, электростанция, поставщик, естественная монополия.

Introduction. The electricity market in the Republic of Armenia comprise the Wholesale and Retail markets. The Retail Market (REM) comprises the Universal Supplier, Suppliers and Distribution System Operator. The Wholesale Market (WEM) comprises all Market Service providers and all Market Participants [1–4] except Consumers and the main mechanisms of electricity trading is represented in the Fig. 1.

The WEM comprises of the following market segments [5]:

Bilateral Contracts Market;

Day-Ahead Market;

Balancing Market.

The Bilateral Contracts Market consists of the following components:

Long-term contracts component;

Regulated component;

Non-regulated component.

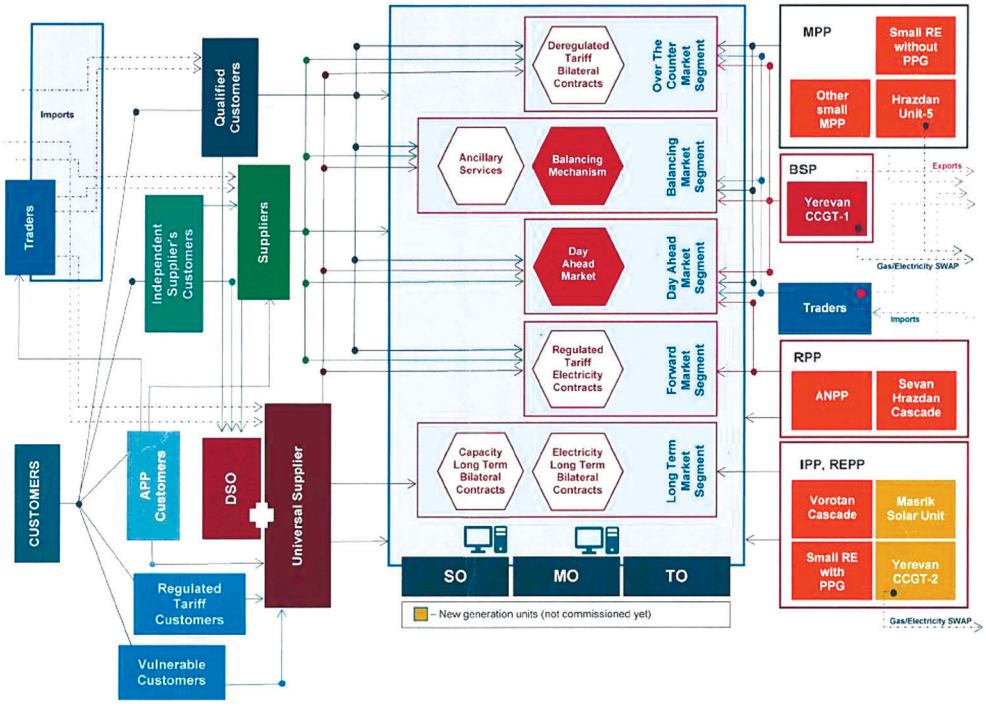


Fig. 1. The new design of the Power market of republic of Armenia

Solution methods and algorithms.

DAM clearing rules.

For the DAM Clearing purposes all electricity Offers and Bids submitted by WEM Participants shall be aggregated in order to produce one aggregated supply and one aggregated demand curve for each Trading Period. The processes shall entail adding all offered quantities at each price step to construct the aggregated supply curve and adding all demanded quantities at each price step to construct the aggregated demand curve.

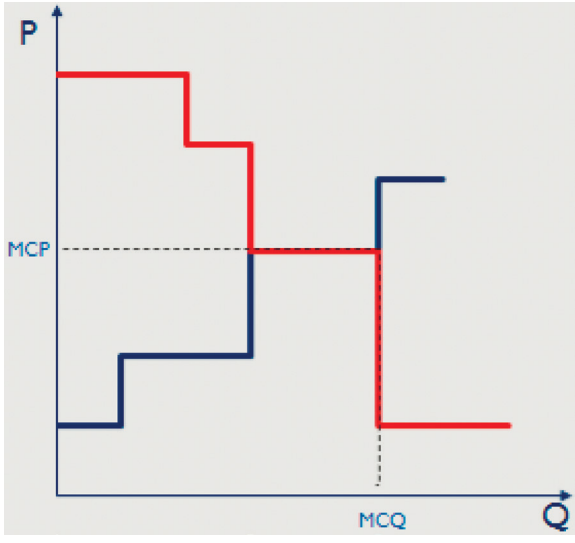


Fig. 2. DAM clearing mechanism

Where the aggregated supply and demand curves do not intercept because the price of the first Offer is higher than the price of the first Bid, then the EMO shall inform the Participants that the DAM shall not be cleared.

Imbalance settlement.

The net volume of imbalances for each WEM Trade Participant shall be calculated by the EMO through the market management system and determined in the following way:

the actual quantity of metered electricity delivered, consumed, exported or imported shall be determined for Metering point of each WEM Trade Participant per Trading period of the Trade Day (TD). Moreover, in case of import or export of electricity, the imbalances are distributed proportionally among the WEM participants carrying out import and export of electricity in proportion of Transactions on an hourly basis;

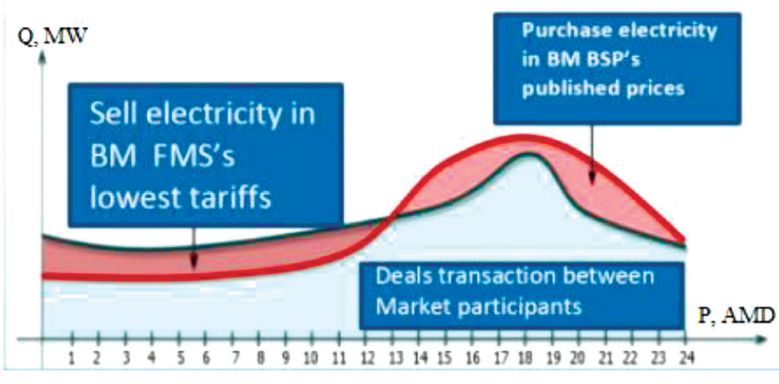


Fig. 3. Imbalance settlement

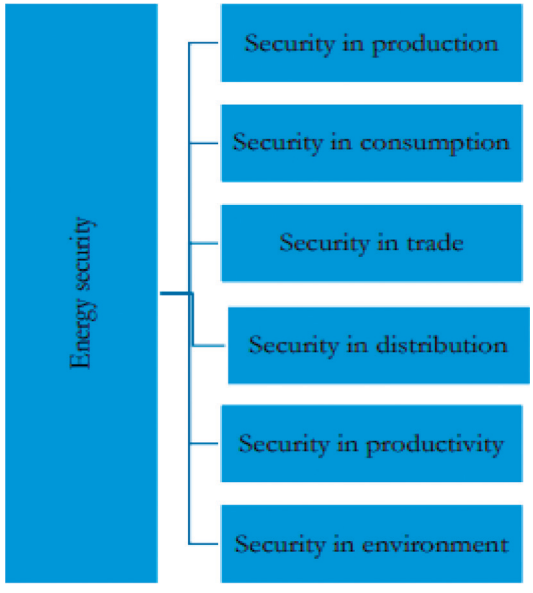


Fig. 4. Structure of a energy security index

the volume of TD net imbalances for each WEM Trade Participant shall be determined by comparing the actual metered data by Trading Periods with the Transactions concluded by the latter.

After analyses DAM clearing rules, Imbalance settlement and structure of WEM and REM we consider several blocks that influence the energy security of the country.

To assess the impact of the liberalization process on energy security, we will consider the elements of the energy security index structure [6–9].

Despite the fact that each block can be represented by several important indicators, for the convenience of formalizing the task, one most responsible indicator is selected from each block.

The first block includes the production of resources, compared to the average level [10–12]

$$K_1 = 100 \frac{P_t}{P_t^{\Sigma t-3}} : \frac{P_{t-n}}{P_{t-n}^{\Sigma t-3}}, \quad (1)$$

Where P_t – s the electricity production in the country for the period t; $P_t^{\Sigma t-3}$ – is the average electricity production in the country for the period $t-3$ years.

The second index analyses the consumption of energy.

$$K_2 = 100 \frac{C_t}{C_t^{\Sigma t-3}} : \frac{C_{t-n}}{C_{t-n}^{\Sigma t-3}}, \quad (2)$$

Where C_t – electricity consumption in the country for the period t; $C_{t-n}^{\Sigma t-3}$ – average consumption of electricity in the country for the period $t-3$ years.

The third index defines conditions of energy provision for the country.

$$K_3 = 100\frac{P_t + Im_t - Ex_t}{P_t}, \quad (3)$$

Where Im_t – import of electricity in the country for the period t; Ex_t – export of electricity from the country for the period t.

The next index indicates in what way country fights with energy loses.

$$K_4 = 100\frac{L_t^{\Sigma t-3}}{L_t}, \quad (4)$$

Where L_t – losses in the distribution and transmission networks of electric energy in the country for the period t; $L_t^{\Sigma t-3}$ – average loss in distribution and transmission networks of electric energy in the country for the period $t-3$ years.

The fifth index indicates the efficiency of using energy resources.

$$K_5 = 100\frac{E_t}{E_t^{\Sigma t-3}}, \quad (5)$$

Where E_t – Energy productivity in the country in period t; $E_t^{\Sigma t-3}$ – average energy productivity in the country in period $t-3$ years.

The next index indicates in role as it measures the green economy in the country.

$$K_6 = 100\frac{N_t}{N_t^{\Sigma t-3}}, \quad (6)$$

Where N_t – share of power from renewable sources in the country in period t; $N_t^{\Sigma t-3}$ – share of average power from renewable sources in the country in period $t-3$ years.

The final part index indicates the as it science and innovation.

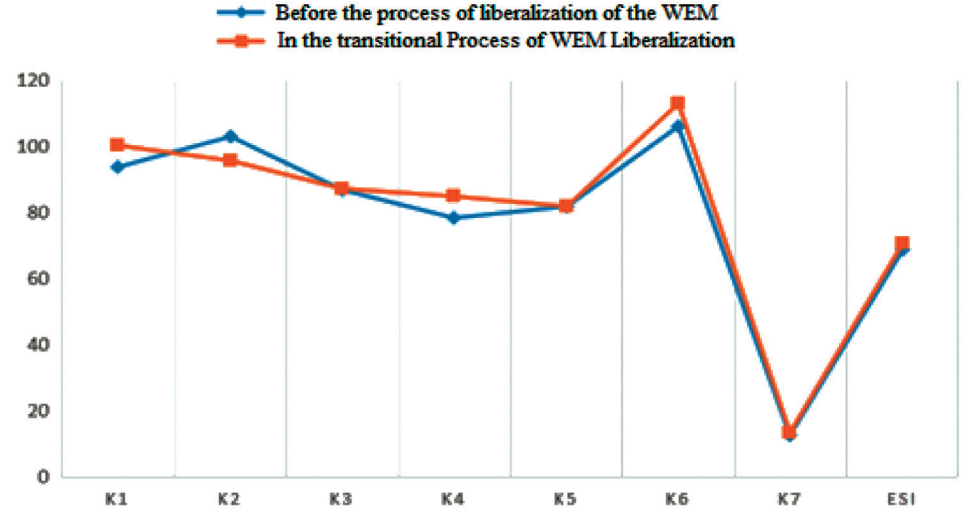


Fig. 5. Energy security index assessment results Republic of Armenia

$$K_7 = 100\frac{BP_{it}}{BP_t}, \tag{7}$$

Where BP_{it} – revenue from the sale of electricity using new or improved technologies; BP_t – total revenue from electricity sales [14].

If the problem of energy security is considered as a subtask of economic security, then the mutual influence of indicators of energy security is determined by solving the joint equations of all indicators. If we consider the mutual influence of only energy safety indicators, then we can use the following system of equations [8].

$$\begin{cases} \frac{dK_1}{dt} = a_{11} + a_{12}K_2(t) + a_{13}K_3(t) + a_{14}K_4(t) + a_{15}K_5(t) + a_{16}K_6(t) + a_{17}K_7(t) \\ \frac{dK_2}{dt} = a_{21}K_1(t) + a_{22} + a_{23}K_3(t) + a_{24}K_4(t) + a_{25}K_5(t) + a_{26}K_6(t) + a_{27}K_7(t) \\ \frac{dK_3}{dt} = a_{31}K_1(t) + a_{32}K_2(t) + a_{33} + a_{34}K_4(t) + a_{35}K_5(t) + a_{36}K_6(t) + a_{37}K_7(t) \\ \frac{dK_4}{dt} = a_{41}K_1(t) + a_{42}K_2(t) + a_{43}K_3(t) + a_{44} + a_{45}K_5(t) + a_{46}K_6(t) + a_{47}K_7(t). \\ \frac{dK_5}{dt} = a_{51}K_1(t) + a_{52}K_2(t) + a_{53}K_3(t) + a_{54}K_4(t) + a_{55} + a_{56}K_6(t) + a_{57}K_7(t) \\ \frac{dK_6}{dt} = a_{61}K_1(t) + a_{62}K_2(t) + a_{63}K_3(t) + a_{64}K_4(t) + a_{65}K_5(t) + a_{66} + a_{67}K_7(t) \\ \frac{dK_7}{dt} = a_{71}K_1(t) + a_{72}K_2(t) + a_{73}K_3(t) + a_{74}K_4(t) + a_{75}K_5(t) + a_{76}K_6(t) + a_{77} \end{cases} \tag{8}$$

The energy security index is the geometric mean of the above indices.

$$ESI = \sqrt[7]{\prod_{i=1}^{7} K_i}. \tag{9}$$

Conclusion. A number of positive trends are associated with the reform, which are observed in the electric power industry of Armenia.

Based on the results of the calculation, it can be concluded that in the process of liberalization of the electricity market, the energy security index of the Republic of Armenia is increasing. Electricity prices for end users will decrease and stabilize at a lower level, which will help to increase the competitiveness of enterprises and reduce internal threats to economic security.

As a result of the reform of the electric power industry, some of the country's economic problems will be resolved, in particular, the refusal to subsidize the industry from the state budget, market prices will be formed that reflect the real cost of electricity, which will contribute to the establishment of parity in prices for goods and service In addition, the liberalization of the electricity market will make it possible to equalize the disproportion between the prices of the internal market of Armenia and the external export market, which will contribute to the integration of the Armenian economy into the world economy.es in other sectors of the economy.

Список использованных источников

1. Decision of 25.12.2019 № 521-N of the Public Services Regulatory Commission of the Republic of Armenia [Electronic resource] // eRegulations Armenia. – Mode of access : https://armenia.eregulations.org/Laws?page=1&letter=p&l=en. – Date of access : 24.03.2022.

2. Decision of 25.12.2019 № 522-N of the Public Services Regulatory Commission of the Republic of Armenia [Electronic resource] // eRegulations Armenia. – Mode of access : https://armenia.eregulations.org/Laws?page=1&letter=p&l=en. – Date of access : 24.03.2022.

3. Decision of 25.12.2019 № 516-N of the Public Services Regulatory Commission of the Republic of Armenia [Electronic resource] // eRegulations Armenia. – Mode of access : https://armenia.eregulations.org/Laws?page=1&letter=p&l=en. – Date of access : 24.03.2022.

4. Decision of 25.12.2019 № 523-N of the Public Services Regulatory Commission of the Republic of Armenia [Electronic resource] // eRegulations Armenia. – Mode of access : https://armenia.eregulations.org/Laws?page=1&letter=p&l=en. – Date of access : 24.03.2022.

5. Decision of 09.08.2017 № 344-N of the Public Services Regulatory Commission of the Republic of Armenia [Electronic resource] // eRegulations Armenia. – Mode of access : https://armenia.eregulations.org/Laws?page=1&letter=p&l=en. – Date of access : 24.03.2022.

6. Decision of 14.01.2020 Long-term (until 2040) development ways of the ra energy system The Government of the Republic of Armenia [Electronic resource] // eRegulations Armenia. – Mode of access : https://armenia.eregulations.org/Laws?page=1&letter=p&l=en. – Date of access : 24.03.2022.

7. Burns, M. G. Managing Energy Security: An All Hazards Approach to Critical Infrastructure / M. G. Burns. – Routledge, 2019. – 1st ed. – 398 p.

8. Bykova, E. V. Methods for Calculation and Analysis of Energy Security Indice / E. V. Bykova. – Kishinev: CEP USM, Institute of Power Engineering, 2005. – 158 p.

9. Лисин, Е. М. Экономика и управление отраслевыми рынками : учеб. для вузов / Е. М. Лисин. – М. : МЭИ, 2017. – 114 с.

10. Софт, С. Экономика энергосистем. Введение в проектирование рынков электроэнергии (пер. с англ.) / С. Софт. – М. : Мир, 2006. – 623 с.

11. Гительман, Л. Д. Эффективная энергокомпания: экономика, менеджмент, реформирование / Л. Д. Гительман, Б. Е. Ратников. – М. : Олимп-Бизнес, 2002. – 534 с.

12. Айзенберг, Н. И. Моделирование и анализ механизмов функционирования электроэнергетических рынков / Н. И. Айзенберг, А. Ю. Филатов. – Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2013. – 93 с.

13. Боровский, Ю. В. Современные проблемы мировой энергетики / Ю. В. Боровский. – М. : Навона, 2011. – 232 с.

14 Доклад о развитии человека 2009. Преодоление барьеров: человеческая мобильность и развитие (пер. с англ.) / Дж. Клугман [и др.]. – М. : Весь Мир, 2009. – 232 с.

References

1. Decision of 25.12.2019 № 521-N of the Public Services Regulatory Commission of the Republic of Armenia [Electronic resource] // eRegulations Armenia. – Mode of access : https://armenia.eregulations.org/Laws?page=1&letter=p&l=en. – Date of access : 24.03.2022.

2. Decision of 25.12.2019 № 522-N of the Public Services Regulatory Commission of the Republic of Armenia [Electronic resource] // eRegulations Armenia. – Mode of access : https://armenia.eregulations.org/Laws?page=1&letter=p&l=en. – Date of access : 24.03.2022.

3. Decision of 25.12.2019 № 516-N of the Public Services Regulatory Commission of the Republic of Armenia [Electronic resource] // eRegulations Armenia. – Mode of access : https://armenia.eregulations.org/Laws?page=1&letter=p&l=en. – Date of access : 24.03.2022.

4. Decision of 25.12.2019 № 523-N of the Public Services Regulatory Commission of the Republic of Armenia [Electronic resource] // eRegulations Armenia. – Mode of access : https://armenia.eregulations.org/Laws?page=1&letter=p&l=en. – Date of access : 24.03.2022.

5. Decision of 09.08.2017 № 344-N of the Public Services Regulatory Commission of the Republic of Armenia [Electronic resource] // eRegulations Armenia. – Mode of access : https://armenia.eregulations.org/Laws?page=1&letter=p&l=en. – Date of access : 24.03.2022.

6. Decision of 14.01.2020 Long-term (until 2040) development ways of the ra energy system The Government of the Republic of Armenia [Electronic resource] // eRegulations Armenia. – Mode of access : https://armenia.eregulations.org/Laws?page=1&letter=p&l=en. – Date of access : 24.03.2022.

7. Burns, M. G. Managing Energy Security: An All Hazards Approach to Critical Infrastructure / M. G. Burns. – Routledge, 2019. – 1st ed. – 398 p.

8. Bykova, E. V. Methods for Calculation and Analysis of Energy Security Indice / E. V. Bykova. – Kishinev: SER USM, Institute of Power Engineering, 2005. – 158 p.

9. Lisin, E. M. Ekonomika i upravlenie otraslevymi rynkami : ucheb. dlya vuzov / E. M. Lisin. – M. : MEI, 2017. – 114 s.

10. Soft, S. Ekonomika energosistem. Vvedenie v proektirovanie rynkov elektroenergii (per. s angl.) / S. Soft. – M. : Mir, 2006. – 623 s.

11. Gitel'man, L. D. Effektivnaya energokompaniya: ekonomika, menedzhment, reformirovanie / L. D. Gitel'man, B. E. Ratnikov. – M. : Olimp-Biznes, 2002. – 534 s.

12. Ajzenberg, N. I. Modelirovanie i analiz mekhanizmov funkcionirovaniya elektroenergeticheskih rynkov / N. I. Ajzenberg, A. YU. Filatov. – Irkutsk: Irkut. gos. un-t, 2013. – 93 s.

13. Borovskij, Yu. V. Sovremennye problemy mirovoj energetiki / YU. V. Borovskij. – M. : Navona, 2011. – 232 s.

14 Doklad o razvitii cheloveka 2009. Preodolenie bar'erov: chelovecheskaya mobil'nost' i razvitie (per. s angl.) / Dzh. Klugman [et al.]. – M. : Ves' Mir, 2009. – 232 s.

УДК 338.27

В. В. Панасюк

РЕГИОНАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ РИСКОВ И УГРОЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Академия управления при Президенте Республики Беларусь,
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрена классификация существующих рисков энергетической безопасности в Республике Беларусь на всех этапах энергетического производства в региональном разрезе.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, риски и угрозы энергетической безопасности, экспертный опрос, классификация рисков.

V. V. Panasyuk

RISK AND THREATS TO ENERGY SECURITY OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The article considers the classification of existing risks of energy security in the Republic of Belarus at all stages of energy production in the regional context.

Keywords: energy security, risks and threats to energy security, expert survey, risk classification.

Введение. Обеспечение энергетической безопасности является важным фактором развития экономики страны и особо значимо как составляющая национальной безопасности государства. Вопросам обеспечения энергетической безопасности уделяют особое внимание международные организации, органы государственной власти, научное сообщество. Так, Мировой энергетический совет считает, что энергия уверенно должна иметься в том количестве и необходимого качества, которые востребованы конкретными экономическими условиями [1].

Проблемы энергетической безопасности постоянно исследуются отечественными и зарубежными учеными. Заслуживают внимания работы, проводимые Институтом экономики Уральского отделения РАН, по оценке энергетической безопасности территории с акцентами на вопросы финансово-экономического и экологического характера [2]. Уделено особое внимание электроэнергетической системе в подходах, разработанных А. Г. Воробьевым, Е. А. Мякотой, А. В. Путиловым [3]. А в работах Института систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН представлена онтологическая модель угроз энергетической безопасности [4]. Ряд зарубежных исследователей считают, что энергетическая безопасность не является новым понятием с новой концепцией, но ввиду появления новых проблем требуется более широкий подход к рассмотрению вопроса в соотношении спроса и предложения с учетом избыточности и нехватки энергии, при этом необходимо учитывать как частные проявления, так и государственные формы регулирования в данной области [5].

Материалы и методы исследования. В работах, проводимых Институтом энергетики НАН Беларуси, рассматривались основные методы оценки и формирования системы угроз энергетической безопасности, где белорусские ученые группируют их в блоки энергетической самостоятельности, диверсификации видов и надежности поставок энергоресурсов и энергетической эффективности их конечного потребления [6, 7]. Согласно работам белорусских ученых Б. И. Попова, Т. Г. Зориной, О. А. Любчик при исследовании проблемы энергетической безопасности предложен индикативный подход с предварительным определением и классификацией угроз энергобезопасности и их оценкой посредством отдельных показателей и интегральных индексов, где угрозы сгруппированы в блоки энергетической самостоятельности, диверсификации видов и надежности поставок энергоресурсов, а также энергетической эффективности их конечного потребления [8].

Повышению уровня энергетической безопасности страны способствуют мероприятия по интеграции в энергосистему Белорусской атомной станции (далее – БелАЭС) [9] и цифровой трансформации электроэнергетики Беларуси [10].

Результаты исследования и их обсуждение. В целях эффективной разработки направлений по формированию региональной политики энергетической безопасности страны предлагается рассмотреть угрозы и риски энергобезопас-

ности с учетом их значимости на всех этапах энергетического производства с классификацией их на риски производственного, финансового и информационного характера, а также оценкой их влияния на устойчивое социально-экономическое развитие регионов Республики Беларусь.

Для реализации данной цели была выполнена классификация существующих рисков энергетической безопасности Республики Беларусь по двум критериям: стадии энергетического производства и источники рисков, где источники рисков на каждой стадии энергетического производства (генерация, передача, распределение) были объединены в группы (виды):

производственные риски;

финансовые риски;

риски использования информационных технологий (информационные риски).

Следует отметить, что различные источники рисков (технологический процесс, финансовая деятельность, применение информационных технологий) на каждой стадии энергопроизводства приводят к различным рискам.

Для оценки уровня угроз энергетической безопасности был проведен письменный экспертный опрос среди около 30 специалистов технических, экономических и информационных служб 6 областных энергосистем республиканских унитарных предприятий (далее – РУП «Облэнерго»). Специалисты, по своему направлению, провели на каждой стадии энергопроизводства ранжирование видов рисков (производственные, финансовые, информационные) и конкретных рисков, относящихся к соответствующему виду. Ранжирование рисков производилось по одинаковым видам, конкретным рискам и их количеству для всех областных энергосистем. При проведении опроса обращено внимание влияния на энергобезопасность страны вводимой на полную мощность БелАЭС [10].

По результатам анализа информации, полученной в ходе экспертного опроса, все риски были систематизированы на основе выделенных критериев.

В табл. 1 представлена классификация рисков энергетической безопасности на стадии технологического процесса «Генерация».

Таблица 1. **Классификация рисков энергетической безопасности по источникам рисков на стадии «Генерация»**

Вид риска	Риск
1. Производственные риски	1.1. Износ основных средств
	1.2. Снижение загрузки собственных генерирующих мощностей в связи с вводом БелАЭС и отсутствием экспорта электроэнергии в сопредельные страны
	1.3. Необходимость поддержания резервов мощности в связи с вводом БелАЭС
	1.4. Несвоевременный ввод объектов резервирования мощностей при внеплановом останове БелАЭС
	1.5. Создание потребителями собственной генерации и привлечение их к регулированию нагрузок

Окончание табл. 1

Вид риска	Риск
1. Производственные риски	1.6. Снижение надежности работы оборудования (увеличение отказов)
	1.7. Аварии и отказы в работе оборудования в связи с ошибочными действиями персонала
	1.8. Низкий коэффициент использования установленной мощности по районным котельным
	1.9. Диверсии и террористические акты
	1.10. Негативное воздействие на окружающую среду
2. Финансовые риски	2.1. Рост стоимости основных топливно-энергетических ресурсов
	2.2. Снижение прибыльности РУП «Облэнерго» ввиду уменьшения загрузки собственных генерирующих мощностей
	2.3. Дефицит оборотных средств и инвестиций
	2.4. Различная рентабельность областных энергосистем
	2.5. Рост стоимости ремонтных работ подрядных организаций
	2.6. Рост себестоимости валового отпуска из-за снижения объемов выработки электроэнергии от собственных источников областных энергосистем в связи с вводом БелАЭС
	2.7. Высокие затраты на содержание вспомогательных ремонтных цехов
	2.8. Высокие затраты на содержание автотранспорта и спецмеханизмов
3. Информационные риски	3.1. Низкий уровень информатизации (цифровизации) управления генерирующим оборудованием
	3.2. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющие генерирующим оборудованием
	3.3. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющие оборудованием распределительных устройств электростанций
	3.4. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющие энергообъектами центральной диспетчерской службой
	3.5. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющие оборудованием контроля вредных выбросов в атмосферу
	3.6. Разнородность использования программных и аппаратных средств во вновь построенных автоматизированных системах управления технологическими процессами (далее – АСУ ТП)
	3.7. Цифровая зависимость от технологий и от поставщиков этих технологий
	3.8. Несовместимость срока эксплуатации технических средств АСУ ТП и основного технологического оборудования
	3.9. Несоответствие средств информационной безопасности внедренным информационным решениям
	3.10. Некачественное исполнение проекта по первичной разработке алгоритма управления техпроцессом
	3.11. Хакерские кибератаки
	3.12. Недостаточный уровень квалификации персонала
	3.13. Отсутствие на предприятиях энергетики специализированных подразделений, непосредственно отвечающих за информационную безопасность

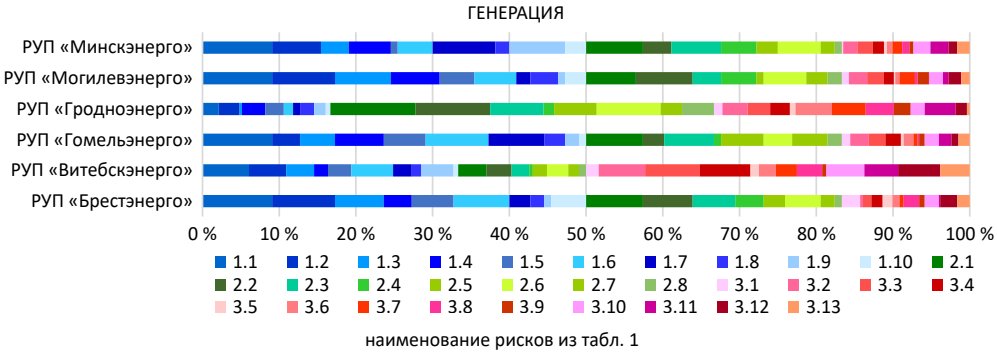


Рис. 1. Важность рисков энергетической безопасности областных энергосистем Республики Беларусь на стадии «Генерация»

Результаты анализа значимости рисков энергетической безопасности РУП «Облэнерго» на стадии «Генерация» представлены на рис. 1.

Как видно на рис. 1, наиболее важными на стадии «Генерация» для большинства областных энергосистем, по мнению экспертов, являются производственные риски энергобезопасности. Особо значимыми являются риск повышенного износа основных производственных средств и снижение загрузки собственных генерирующих мощностей в связи с вводом БелАЭС, где в первом случае при увеличении износа выше 45 % данный риск оказывает негативное влияние на надежность поставок энергии потребителям республики, а во втором случае могут увеличиться удельные расходы топлива на производство тепловой и электрической энергии из-за неоптимального режима работы генерирующего оборудования. К наименее важным производственным рисками эксперты отнесли низкий коэффициент использования установленной мощности по районным котельным ввиду сокращения промышленных потребителей тепловой энергии и создания децентрализованных источников теплоснабжения, обусловленных трансформацией белорусской энергосистемы.

Результат анализа значимости финансовых рисков на данной стадии энергопроизводства показал, что данному виду рисков особое значение придают в РУП «Гродноэнерго», а наиболее важными рисками для всех областных энергосистем являются рост стоимости основных топливно-энергетических ресурсов, которые составляют 70–80 % в затратах на топливо, что может привести к повышению тарифов для реального сектора экономики и неконкурентоспособности энергоемких предприятий республики, а также провоцировать появление производственного риска в части создания потребителями собственной генерации. К наиболее важным отнесены, кроме РУП «Гомельэнерго» и РУП «Минскэнерго», снижение прибыльности РУП «Облэнерго» ввиду уменьшения загрузки собственных генерирующих мощностей и отсутствия экспорта электроэнергии в сопредельные страны, а также неокупаемость ранее введенных объектов в связи с вводом БелАЭС. Незначительными финансовыми

рисками признаны высокие затраты на содержание вспомогательных ремонтных цехов, автотранспорта и спецмеханизмов.

РУП «Витебскэнерго» на данном этапе энергопроизводства считает группу рисков, связанных с применением информационных технологий, наиболее важными, где особую значимость определяют отказы и сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих генерирующим оборудованием и оборудованием распределительных устройств электростанций, приводящие к недоотпуску электроэнергии потребителям республики. К незначительным информационным рискам отнесены, кроме РУП «Брестэнерго», отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих оборудованием контроля вредных выбросов в атмосферу.

В табл. 2 представлена классификация выявленных рисков энергетической безопасности на стадии технологического процесса «Передача».

Таблица 2. **Классификация рисков энергетической безопасности по источникам рисков на стадии «Передача»**

Вид риска	Риск
1. Производственные риски	1.1. Износ основных средств
	1.2. Увеличение необходимых резервов установленной мощности связи с выходом БелАЭС на проектную мощность
	1.3. Необходимость дополнительного электросетевого строительства межсистемных связей (по причинам п. 1. 2)
	1.4. Низкий уровень автоматизации (цифровизации) сетей
	1.5. Аварии и отказы в работе оборудования в связи с ошибочными действиями персонала
	1.6. Увеличение доли потерь в случае снижения объемов промышленного производства
	1.7. Снижение надежности работы сети из-за погодных условий
	1.8. Недостаточный уровень резервирования наиболее крупных источников генерации в регионе
	1.9. Рост нагрузочных потерь при транспортировке электроэнергии
	1.10. Диверсии и террористические акты
2. Финансовые риски	2.1. Различная рентабельность областных энергосистем
	2.2. Дефицит оборотных средств и инвестиций
	2.3. Отсутствие источников финансирования на реконструкцию тепловых сетей
	2.4. Рост стоимости ремонтных работ подрядных организаций
	2.5. Высокие затраты на содержание вспомогательных ремонтных цехов
	2.6. Высокие затраты на содержание автотранспорта и спецмеханизмов
3. Информационные риски	3.1. Низкий уровень цифровизации сети
	3.2. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющего оборудованием подстанций
	3.3. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих энергообъектами центральной диспетчерской службой
	3.4. Разнородность использования программных и аппаратных средств во вновь построенных АСУ ТП

Окончание табл. 2

Вид риска	Риск
3. Информационные риски	3.5. Цифровая зависимость от технологий и от поставщиков этих технологий
	3.6. Несовместимость срока эксплуатации технических средств АСУ ТП и основного технологического оборудования
	3.7. Несоответствие средств информационной безопасности внедренным информационным решениям
	3.8. Некачественное исполнение проекта по первичной разработке алгоритма управления техпроцессом
	3.9. Хакерские кибератаки
	3.10. Недостаточный уровень квалификации персонала
	3.11. Отсутствие на предприятиях энергетики специализированных подразделений, непосредственно отвечающих за информационную безопасность

Как видно на рис. 2, наиболее важными рисками энергобезопасности на стадии «Передача», как и на стадии «Генерация», для областных энергосистем, кроме РУП «Гродноэнерго», являются производственные риски, из которых наиболее важный – износ основных средств. РУП «Гродноэнерго» считает особо важным необходимость дополнительного электросетевого строительства межсистемных связей между ОЭС Беларуси и ЕЭС России в связи с выходом на проектную мощность БелАЭС, которая находится на территории Гродненской области. РУП «Облэнерго» считает также наиболее важными снижение надежности работы сети из-за погодных условий и риск аварий и отказов в работе оборудования в связи с ошибочными действиями персонала ввиду низкого уровня его квалификации, отток высококвалифицированных кадров из-за неконкурентоспособности уровня заработной платы в конкретном регионе. Данные риски приводят к ухудшению значений показателей надежности, выражающихся в функции обеспечения бесперебойности поставок электроэнергии

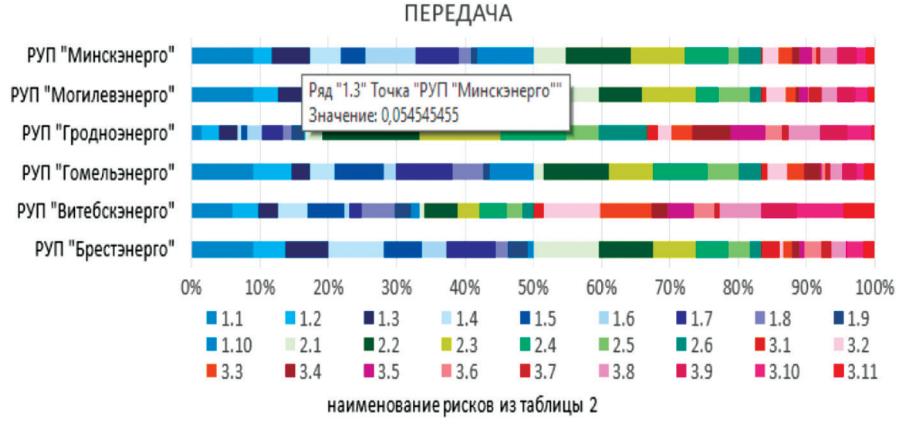


Рис. 2. Важность рисков энергетической безопасности областных энергосистем Республики Беларусь на стадии «Передача»

потребителям по показателям: SAIFI, SAIDI, CAIDI, а также показателю предельного экономического ущерба от нарушения электроснабжения потребителя. РУП «Витебскэнерго» на данном этапе энергопроизводства считает важным риск по недостаточному уровню резервирования наиболее крупных источников генерации в регионе с учетом пропускной способности межсистемных связей региона с соседними и низкий уровень автоматизации (цифровизации) сетей, что приводит к ухудшению значений показателей надежности, выражающихся в функции обеспечения бесперебойности поставок электроэнергии потребителям по показателям SAIFI, SAIDI, CAIDI, а также по показателю предельного экономического ущерба от нарушения электроснабжения потребителей.

К важным финансовым рискам на данной стадии технологического процесса областными энергосистемами отнесены дефицит оборотных средств и инвестиций (в том числе внешних) как на модернизацию объектов электросетевой инфраструктуры, так и по расчету на ранее реализованные проекты за счет иностранных кредитных линий (в том числе валютные колебания курсов), а также рост стоимости ремонтных работ подрядных организаций, в том числе ввиду снижения объемов экспорта ремонтных услуг подрядными организациями. Наименее важными финансовыми рисками признаны высокие затраты на содержание вспомогательных ремонтных цехов, автотранспорта и спецмеханизмов.

Информационными рисками высокого уровня на данной стадии энергопроизводства областные энергосистемы, кроме РУП «Брестэнерго» и РУП «Гродноэнерго», определили отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих оборудованием подстанций и управляющих энергообъектами центральной диспетчерской службой. К наименее важным информационным рискам относятся разнородность использования программных и аппаратных средств во вновь построенном АСУ ТП и несоответствие средств информационной безопасности внедренным информационным решениям.

В табл. 3 представлена классификация выявленных рисков энергетической безопасности на стадии технологического процесса «Распределение».

Таблица 3. **Классификация рисков энергетической безопасности по источникам рисков на стадии «Распределение»**

Вид риска	Риск
1. Производственные риски	1.1. Отключения, приводящие к нарушению функционирования объектов обеспечения жизнедеятельности населения
	1.2. Износ основных средств
	1.3. Недостаточность мощностей электросети 0,4–10кВ
	1.4. Необходимость масштабной реконструкции и строительства электросети 0,4–10кВ
	1.5. Высокий уровень затрат на обслуживание распределительной сети
	1.6. Аварии и отказы в работе оборудования в связи с ошибочными действиями персонала
	1.7. Снижение надежности работы распределительной сети из-за погодных условий

Окончание табл. 3

Вид риска	Риск
1. Производственные риски	1.8. Прием на баланс по «фактическому состоянию» изношенных сетей от других субъектов хозяйствования
	1.9. Высокий уровень потерь в сети 6 кВ
	1.10. Увеличение технологического расхода электроэнергии на транспорт с учетом работы электрокотлов
	1.11. Отсутствие 100 %-ного покрытия электронными приборами учета потребителей
	1.12. Диверсии и террористические акты
2. Финансовые риски	2.1. Дефицит оборотных средств и инвестиций
	2.2. Недостаточность источников финансирования по модернизации приборного парка учета электроэнергии
	2.3. Предоставление значительному количеству субъектов хозяйствования скидок с тарифов
	2.4. Снижение платежеспособности потребителей в регионе
	2.5. Рост тарифов на покупку электроэнергии от блок-станций (электростанций других ведомств)
	2.6. Рост цен на комплектные трансформаторные подстанции (далее – КТП) и мачтовые трансформаторные подстанции (далее – МТП), электронные приборы учета, сплит-системы
	2.7. Отсутствие влияния областных энергосистем на уровень установленных тарифов (естественная монополия)
	2.8. Рост стоимости ремонтных работ подрядных организаций
	2.9. Высокие затраты на содержание вспомогательных ремонтных цехов
	2.10. Высокие затраты на содержание автотранспорта и спецмеханизмов
3. Информационные риски	3.1. Низкий уровень автоматизации (цифровизации) распределительной сети
	3.2. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих оборудованием подстанций
	3.3. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих энергообъектами центральной диспетчерской службой (если такие имеются)
	3.4. Разнородность использования программных и аппаратных средств во вновь построенных АСУ ТП
	3.5. Цифровая зависимость от технологий (особенно иностранных) и от поставщиков этих технологий
	3.6. Несовместимость срока эксплуатации технических средств АСУ ТП и основного технологического оборудования
	3.7. Несоответствие средств информационной безопасности внедренным информационным решениям
	3.8. Некачественное исполнение проекта по первичной разработке алгоритма управления техпроцессом
	3.9. Хакерские кибератаки
	3.10. Недостаточный уровень квалификации персонала
	3.11. Отсутствие на предприятиях энергетики специализированных подразделений, непосредственно отвечающих за информационную безопасность

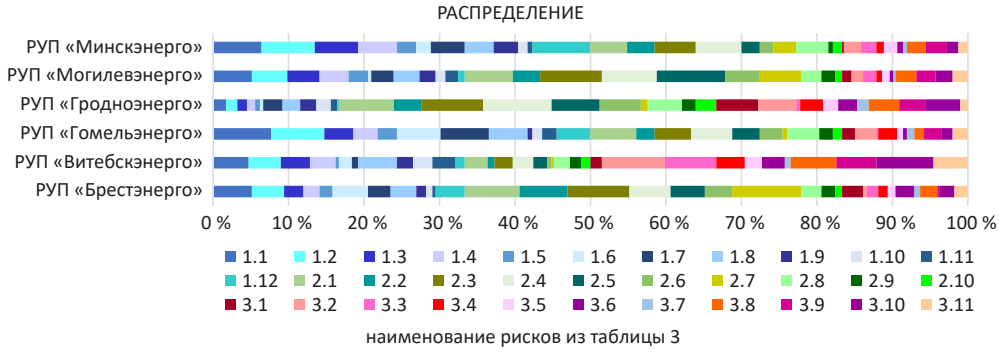


Рис. 3. Важность рисков энергетической безопасности областных энергосистем Республики Беларусь на стадии «Распределение»

Рассмотрим результаты анализа значимости рисков энергетической безопасности для областных энергосистем на стадии «Распределение», которые представлены на рис. 3.

Как видно на рис. 3, на этой стадии технологического процесса для областных региональных энергосистем наиболее важными производственными рисками энергобезопасности являются отключения, приводящие к нарушению функционирования объектов обеспечения жизнедеятельности населения (водо-, газо-, тепло-, электроснабжения, водоотведения) – социальный аспект риска, а также риск износа основных средств, который признавался значимым на предыдущих этапах энергопроизводства. Отключения, приводящие к нарушению функционирования объектов обеспечения жизнедеятельности населения, могут привести к нарушению электроснабжения потребителей 1-й группы, к значительным экономическим, социальным и производственным ущербам, отсутствию у населения основных жилищно-коммунальных услуг и, соответственно, социальных благ.

РУП «Минскэнерго» и РУП «Брестэнерго» считают важным риск диверсии и террористических актов. Риск диверсии и террористические акты проявляется достаточно серьезно в случае его реализации, поскольку объекты энергетической отрасли, являющиеся базовыми инфраструктурными объектами жизнедеятельности любого государства, являются приоритетными целями для вывода из строя. Нивелирование данного риска может быть осуществлено только за счет дополнительной защиты данных объектов. К наименее важным производственным рискам отнесены отсутствие 100 %-ного покрытия электронными приборами учета потребителей и высокий уровень затрат на обслуживание распределительной сети.

Согласно представленным данным по финансовым рискам, экспертов энергосистемы больше всего беспокоит дефицит оборотных средств и инвестиций (в том числе внешних) на модернизацию объектов распределительной электросетевой инфраструктуры, снижение платежеспособности потребителей в ре-

гионе, предоставление значительному количеству субъектов хозяйствования скидок с тарифов. РУП «Брестэнерго» придает особое значение риску отсутствия влияния областных энергосистем на уровень установленных тарифов (естественная монополия), а РУП «Витебскэнерго» придает данному риску минимальное значение.

К наименее важным финансовым рискам также отнесены, как и на предыдущих стадиях энергопроизводства, высокие затраты на содержание автотранспорта и спецмеханизмов с относительно низкими коэффициентами выпуска и сезонности использования некоторых групп подвижного состава, высокие затраты на содержание вспомогательных ремонтных цехов при моральном и физическом старении их производственных мощностей и применяемых технологиях.

Согласно рис. 3, к наиболее важным рискам, связанным с применением информационных технологий, на стадии «Распределение» в большинстве областных энергосистем отнесены отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих оборудованием подстанций (КТП, РП). РУП «Минскэнерго» и РУП «Могилевэнерго» считают важными информационными рисками хакерские кибератаки (взлом, внедрение вредоносных программ-шифровальщиков и блокировок, шантаж), некачественное исполнение проекта по первичной разработке алгоритма управления техпроцессом с последующей увязкой с ПТК управления. РУП «Витебскэнерго» полагает важным информационным риском недостаточный уровень квалификации персонала, отсутствие заинтересованности сотрудников во внедрении ИТ, приводящие к отказам, ошибкам и сбоям в работе оборудования по вине ИТ-персонала.

Наименее важным информационным риском большинство областных энергосистем считают цифровую зависимость от технологий (особенно иностранных) и от поставщиков этих технологий (отказы в работе оборудования в связи с непредоставлением поставщиком ПТК соответствующих паролей для доступа к ПО, возможность удаленного контроля и влияния на работу оборудования, снятие данных поставщиком, промышленный шпионаж).

Обращает на себя внимание высокий рейтинг информационного риска – отсутствие на предприятиях энергетики специализированных подразделений (отделов) персонала, непосредственно отвечающих за информационную безопасность.

Следует отметить, как показал анализ предоставленных региональными экспертами данных, подходы по определению значимости групп рисков схожи, а оценки значимости конкретных рисков в группах могут отличатся с учетом особенностей функционирования областных энергосистем страны.

Заключение. В рамках данного исследования проведена классификация существующих рисков энергетической безопасности в Республике Беларусь в региональном разрезе на основе критериев: стадий технологического процесса энергетического производства (генерация, передача, распределение) и по не-

изменным источникам рисков, которые объединены в группы производственных, финансовых и информационных рисков. Основой классификации послужили систематизированные по выше названным критериям результаты анализа, полученные в ходе экспертного опроса специалистов РУП «Облэнерго» и государственного производственного объединения ГПО «Белэнерго».

Предлагаемая идентификация угроз и ранжирование рисков энергобезопасности с учетом их значимости на всех этапах энергетического производства может быть использована для формирования региональной политики энергобезопасности страны и оценки их влияния на социально-экономическое развитие регионов Республики Беларусь.

Список использованных источников

1. World energy trilemma index [Electronic resource] // World Energy Council. – Mode of access : https://www.worldenergy.org/assets/downloads. – Date of access : 24.02.2022.

2. Борталевич, С. И. Методические основы оценки энергетической безопасности регионов / С. И. Борталевич // Экономический анализ: теория и практика. – 2019. – № 38 (293). – С. 33–37.

3. Воробьев, А. Г. Подходы к оценке энергетической безопасности региона (на примере Челябинской области) / А. Г. Воробьев, Е. А. Мякота, А. В. Путилов // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2020. – № 4 (12). – С. 71–80.

4. Ворожцова, Т. Н. Онтологическая модель угроз энергетической безопасности / Т. Н. Ворожцова, Н. И. Пяткова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2017. – № 3 (7). – С. 35–41.

5. Блюм, Х. Сложная экономика энергетической безопасности: обеспечение энергетических выгод в поддержку устойчивого развития / Х. Блюм, Ф. Луис, Л. Легей // Экономика энергетики. – 2012. – Т. 34, вып. 6. – С. 1982–1989.

6. Богдан, И. Т. Стратегия устойчивого развития энергетики Республики Беларусь / И. Т. Богдан, Т. Г. Зорина // Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь : состояние и перспективы : Междунар. науч. конф., Минск, 1–2 окт. 2020 г. : сб. докл. / ред. Т. Г. Зорина. – Минск : Беларус. навука, 2020. – С. 104–112.

7. Корсак, Е. П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь / Е. П. Корсак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2019. – Т. 62, № 4. – С. 388–398.

8. Попов, Б. И. Многокритериальный анализ решений как метод оценки уровня энергетической безопасности Республики Беларусь / Б. И. Попов, Т. Г. Зорина, О. А. Любчик // Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь : состояние и перспективы : Междунар. науч. конф., Минск, 1–2 окт. 2020 г. : сб. докл. / ред. Т. Г. Зорина. – Минск : Беларус. навука, 2020. – С. 287–295.

9. Об утверждении комплексного плана развития электроэнергетической сферы до 2025 года с учетом ввода Белорусской атомной электростанции [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 1 марта 2016 г., № 169 // М-во энергетики Респ. Беларусь. – Режим доступа : https://minenergo.gov.by/uploads/files. – Дата доступа : 25.02.2022.

10. Зорина, Т. Г. Цифровая трансформация электроэнергетики Беларуси в рамках общих подходов к цифровизации ТЭК стран СНГ / Т. Г. Зорина, С. Г. Прусов // Наука и инновации. – 2022. – № 2 (228). – С. 59–65.

References

1. World energy trilemma index [Electronic resource] // World Energy Council. – Mode of access : https://www.worldenergy.org/assets/downloads. – Date of access : 24.02.2022.

2. Bortalevich, S. I. Metodicheskie osnovy ocenki energeticheskoj bezopasnosti regionov / S. I. Bortalevich // Ekonomicheskij analiz: teoriya i praktika. – 2019. – № 38 (293). – S. 33–37.

3. Vorob'ev, A. G. Podhody k ocenke energeticheskoj bezopasnosti regiona (na primere Chelyabinskoj oblasti) / A. G. Vorob'ev, E. A. Myakota, A. V. Putilov // Ekonomicheskie i social'nye peremeny: fakty, tendencii, prognoz. – 2020. – № 4 (12). – S. 71–80.

4. Vorozhcova, T. N. Ontologicheskaya model' ugroz energeticheskoj bezopasnosti / T. N. Vorozhcova, N. I. Pyatkova // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. – 2017. – № 3 (7). – S. 35 – 41.

5. Blyum, X. Slozhnaya ekonomika energeticheskoj bezopasnosti: obespechenie energeticheskih vygod v podderzhku ustojchivogo razvitiya / X. Blyum, Luis F. L. Legej // Ekonomika energetiki. – 2012. – T. 34, iss. 6. – S. 1982–1989.

6. Bogdan, I. T. Strategiya ustojchivogo razvitiya energetiki Respubliki Belarus' / I. T. Bogdan, T. G. Zorina // Ustojchivoe razvitie energetiki Respubliki Belarus' : sostoyanie i perspektivy : Mezhdunar. nauch. konf., Minsk, 1– 2 okt. 2020 g. : sb. dokl. / red. T. G. Zorina. – Minsk : Belarus. navuka, 2020. – S. 104 –112.

7. Korsak, E. P. Formirovanie sistemy ugroz energeticheskoj bezopasnosti Respubliki Belarus' / E. P. Korsak // Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedenij i energ. ob"edinenij SNG. – 2019. – T. 62, № 4. – S. 388–398.

8. Popov, B. I. Mnogokriterial'nyj analiz reshenij kak metod ocenki urovnya energeticheskoj bezopasnosti Respubliki Belarus' / B. I. Popov, T. G. Zorina, O. A. Lyubchik // Ustojchivoe razvitie energetiki Resp. Belarus' : sostoyanie i perspektivy : Mezhdunar. nauch. konf., Minsk, 1–2 okt. 2020 g. : sb. dokl. / red. T. G. Zorina. – Minsk : Belarus. navuka, 2020. – S. 287–295.

9. Ob utverzhdenii kompleksnogo plana razvitiya elektroenergeticheskoj sfery do 2025 goda s uchetom vvoda Belorusskoj atomnoj elektrostancii [Electronic resource] : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', 1 mar. 2016 g., № 169 // M-vo energetiki Resp. Belarus'. – Mode of access : https://minenergo.gov.by/uploads/files. – Date of access : 25.02.2022.

10. Zorina, T. G. Cifrovaya transformaciya elektroenergetiki Belarusi v ramkah obshchih podhodov k cifrovizacii TEK stran SNG / T. G. Zorina, S. G. Prusov // Nauka i innovacii. – 2022. – № 2 (228). – S. 59–65.

УДК 620.9

О. Х. Чалбаш

СИСТЕМА ВЫРАБОТКИ РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Кандидат экономических наук, Институт энергетики,
Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Целью работы является разработка концептуальной модели для автоматизации выполнения экспертных процедур в сфере безопасности. Структуризация выделенных факторов и причинно-следственных связей между ними осуществляется посредством стохастического нагруженного графа. Информационная система предполагает разработку базы данных. В итоге эксперту достаточно выделить специфические для данного объекта катализаторы и указать ранговые характеристики факторов влияния для того, чтобы система сформировала набор мер, смягчающих возникающие потенциальные угрозы.

Ключевые слова: системы поддержки экспертных решений, системы безопасности, автоматизация экспертных решений, нагруженные графы, профиль риска.

O. X. Chalbash

SYSTEM FOR DEVELOPING RECOMMENDATIONS FOR THE SAFETY OF ENERGY FACILITIES

Ph. D. in Economics, Institute of Power Engineering,
Kishinev, Republic of Moldova

Annotation. The aim of the work is to develop a conceptual model for automating the execution of expert procedures in the field of security. The structuring of the selected factors and cause-and-effect relationships between them is carried out by means of a stochastic loaded graph. The information system involves the development of a database. As a result, it is enough for an expert to identify catalysts specific to a given object and indicate the rank characteristics of the influencing factors in order for the system to form a set of measures that mitigate emerging potential threats.

Keywords: expert decision support systems, security systems, expert decision automation, loaded graphs, risk profile.

Введение. Выработка экспертных решений (или экспертных рекомендаций) в той или иной предметной области всегда основывается на анализе и систематизации первичной информации. При этом первичная информация должна наиболее полно описывать (в интересующем контексте) условия функционирования выбранного объекта предметной области. В качестве субъекта рекомендаций, в зависимости от специфики предметной области, могут выступать различные мероприятия, процедуры или вербальные рекомендации, способствующие эффективному и стабильному функционированию данного объекта.

Во всех случаях рекомендации экспертов направлены на коррекцию жизнедеятельности объектов с точки зрения обеспечения их стабильной и штатной работы. И выработка экспертных рекомендаций основывается на изучении первичной информации о реальных условиях жизнедеятельности объекта.

Таким образом, общая схема разработки экспертного решения (рекомендаций) носит универсальный характер (рис. 1). Специфические особенности обусловливаются структурой связей и отношений между данными, содержащимися в исходных источниках информации, и набором субъектов экспертизы, с одной стороны, и формальными методами анализа – с другой.

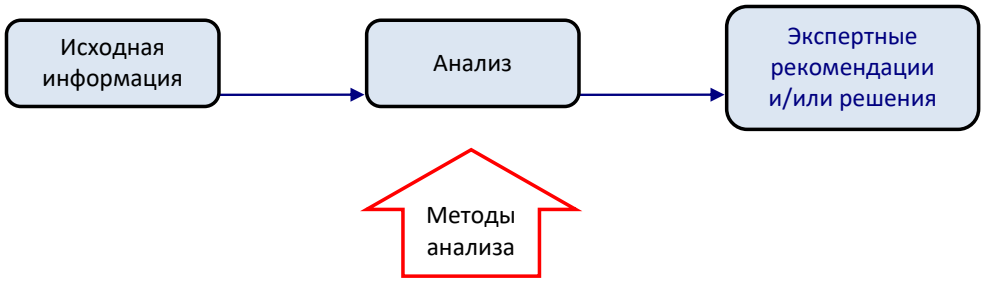


Рис. 1. Общая схема выработки экспертного решения

Материалы и методы исследования. Для того чтобы установить указанную структуру связей и отношений необходимо сформулировать концептуальную модель.

Центральная идея, лежащая в основе концептуальной модели экспертных систем для управления безопасностью различного рода сложных объектов, состоит в установлении корреляционных связей между условиями их жизнедеятельности и рисками возникновения нештатных деструктивных ситуаций. С другой стороны, такая модель предполагает разработку комплекса мер, способных в превентивном режиме смягчать или устранять возможные последствия опасных ситуаций.

Любой объект предметной области (человек, растения, энергетическая система или др.) функционируют в определенных специфических условиях. Данные условия могут быть выражены целым рядом факторов, причем многие из них способны оказывать негативное влияние на состояние объекта. Например, люди, работающие в горячих цехах, подвержены легочным заболеваниям в большей мере, чем работающие в иных условиях. Самолеты, взлетающие и приземляющиеся в аэропортах с неразвитой авиационной инфраструктурой, чаще подвержены авариям или иным нештатным ситуациям. Энергетические системы, обслуживаемые плохо обученным персоналом, более подвержены возникновению деструктивных ситуаций. Перечисление можно продолжить.

Факторы, определяющие специфические условия функционирования объектов, условно можно назвать катализаторами, поскольку они способны порождать угрозы (опасности) для нормального режима их жизнедеятельности. Описание таких факторов сосредоточено в различных источниках информации: журналах нештатных ситуаций, анамнезах, задокументированных мониторингах событий и другие документах (первичная информация).

Для выделения указанных факторов могут использоваться текстовые анализаторы, позволяющие определять вхождения ключевых слов в текст документа.

Субъекты экспертных решений (рекомендаций) при таком подходе можно квалифицировать как набор факторов, призванных смягчать и/или устранять указанные угрозы. При этом в качестве таких факторов могут выступать различные мероприятия, процедуры, инструкции и вербальные рекомендации.

Далее формулируется гипотеза, согласно которой условия функционирования (катализаторы) могут порождать всевозможные угрозы или опасности, а различные факторы группы субъекты решений способны смягчать или устранять возникающие угрозы.

Таким образом, между факторами выделенных групп формируется система причинно-следственных связей, которые в общем случае носят ассоциативный характер (многие ко многим).

На рис. 2 показана упрощенная принципиальная схема такой модели.

Но подобная концептуальная модель не может считаться завершенной по ряду причин, главная из которых – очевидный детерминизм такой модели. Получаемые варианты решения будут определяться исключительно выбором

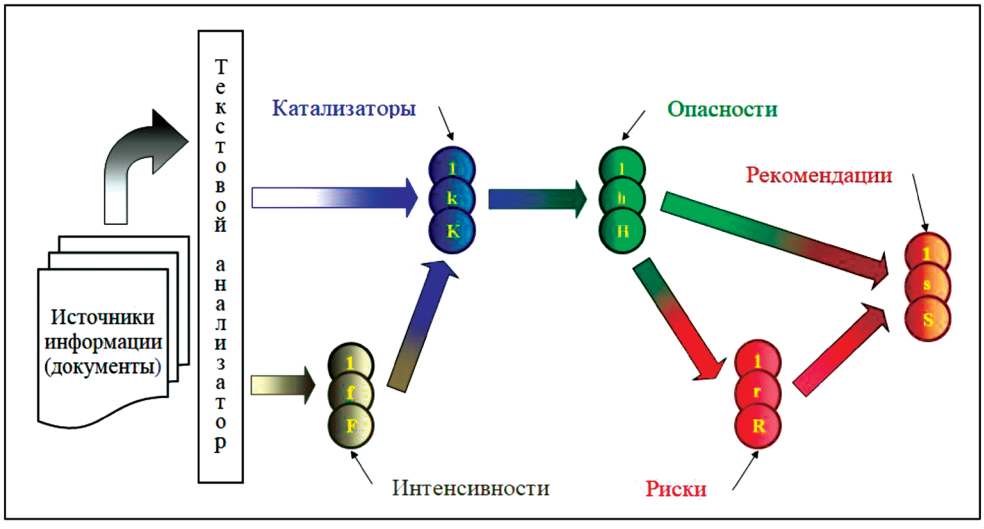


Рис. 2. Схема связей между различными факторами концептуальной модели

экспертом (ЛПР) того или иного подмножества катализаторов. Математически, число таких рекомбинаций решений определяется из выражения:

$$M = C_N^K = \frac{N!}{K!(N-K)!}, \quad (1)$$

где N – предельное число факторов группы «катализаторы»; K – фактическое число факторов, выбранных экспертом.

И хотя число таких рекомбинаций в практике может быть достаточно большим, тем не менее априорная предсказуемость такой модели имеет принципиальный характер.

Для того чтобы существенно увеличить вариабельность такой модели, а также учитывать интенсивность проявления катализаторов (их опосредованное влияние на профиль риска) вводится ряд дополнительных положений.

Положение 1. Вводится фактор интенсивности проявления катализаторов (фактор интенсивности влияния). Факторам влияния приданы градационные характеристики, отображающие меру интенсивности их воздействия на порождающий потенциал катализаторов, а также на характеристики профиля рисков.

Поясним на примерах. Факторы группы «катализаторы» могут проявляться с различной интенсивностью. Например, самолеты могут приземляться в аэропортах с неразвитой инфраструктурой один раз в месяц или ежедневно. Люди могут работать на вредных производствах постоянно или эпизодически и т. д. Поэтому способность порождать различные угрозы у отдельных факторов группы «катализаторы» будет различная.

Положение 2. На основе градационных оценок факторов интенсивности, катализаторам присваиваются количественные оценки их способности порождать опасности.

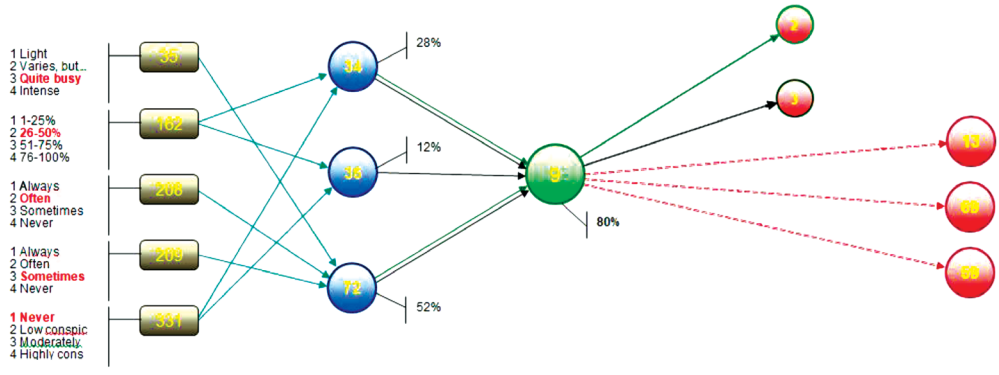


Рис. 3. Схема порождения угроз с пороговыми оценками

Порождающий потенциал катализаторов определяется весовыми оценками, заданными в вероятностных терминах. В вероятностных терминах заданы и пороговые оценки опасностей. В частности, из представленной на рис. 3 схемы видно, что совокупный потенциал катализаторов № 34, № 36 и № 72 достаточен для возникновения опасности № 9 (28+12+52>80 %).

Факторов интенсивности влияния, связанных с тем или иным катализатором, может быть более одного. А один и тот же фактор интенсивности может характеризовать интенсивность проявления более чем одного катализатора. Таким образом, между отдельными факторами групп «интенсивность» и «катализаторы» также формируются ассоциативные связи.

Введение еще одного положения способно обеспечить более «тонкий» учет условий функционирования объекта.

Положение 3. Учитывается влияние факторов интенсивности на профиль риска (в координатах «вероятность» – «тяжесть последствий»). Мера влияния устанавливается в зависимости от состава и ранга имеющихся (у катализаторов) факторов интенсивности влияния. Причем данное влияние оценивается дифференциально по цепочкам «катализатор – угроза – риск».

Для определения меры влияние факторов интенсивности на профиль риска была разработана специальная методика.

Согласно принятой концепции, статус риска (позиция на диаграмме профилей рисков (рис. 4)) определяется на основе его характеристик: обобщенной вероятности и обобщенной тяжести последствий (в соответствии с принятыми градациями (см. таблицу)). И далее, на основе статусов рисков, устанавливаются частотности применения отдельных факторов «субъекты экспертных решений». Позиционирование рисков осуществляется в пределах трех или более выделенных зон (согласно принятой частотности применения отдельных факторов группы «субъекты экспертизы»).

Методика определения меры воздействия катализаторов на профили рисков в зависимости от расчетных значений параметров группы интенсивности влияния приведена в работе [15].

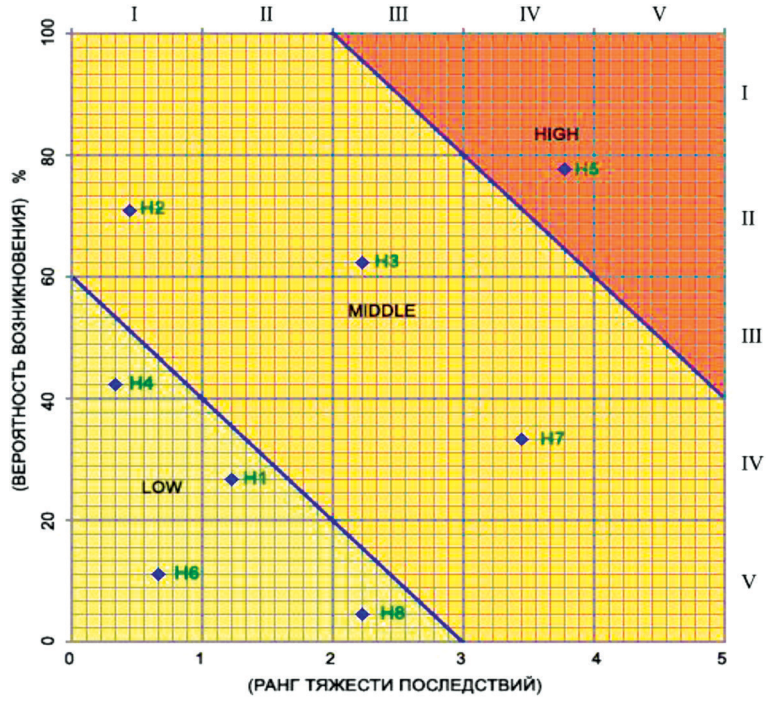


Рис. 4. Профили рисков

Шкалы градаций профиля рисков

Наименование градации вероятности события	Ранг	Наименование градации тяжести последствия события	Ранг
Rarely (очень редко)	I	Negligible (пренебрежимые)	I
Unlikely (маловероятно)	II	Minor (незначительные)	II
Possibly (возможно иногда)	III	Medium (средние)	III
Likely (вполне вероятно)	IV	Major (крупные)	IV
Almost always (почти всегда)	V	Catastrophic (катастрофические)	V

Таким образом, можно сформулировать основные процедуры построения концептуальной модели:

формируется фиксированное множество компонентов фактора «субъекты экспертных рекомендаций» и их частотные характеристики;

экспертные рекомендации всегда представляют собой некоторую конфигурацию компонентов данного множества (т. е. подмножество) с указанием их частотных характеристик;

формируется фиксированное множество компонентов фактора «риски сопряженные с функционированием объекта» и их характеристики;

формируется фиксированное множество компонентов фактора «специфические условия функционирования объекта» (катализаторы);

между компонентами указанных факторов устанавливаются «порождающие» связи, имеющие ассоциативный характер;

устанавливаются правила перехода (порождения) от компонентов одной группы к компонентам последующей;

наборы компонентов всех выделенных групп факторов, их характеристики и правила перехода хранятся в базе данных информационной системы и при необходимости могут быть отредактированы;

формируется стратегия проведения вариантных расчетов.

Все структурно-семантические и количественные характеристики графа (компоненты групп факторов, связи между ними, пороговые значения порождающих связей, ранговые градации отдельных факторов и ряд других параметров) содержатся в базе данных. Это позволяет осуществить частичную автоматизацию экспертных процедур, иначе – разработать взаимосвязанную систему «поточных алгоритмов» последовательной обработки данных вплоть до формирования набора экспертных рекомендаций. Однако в полной мере механизм работы признать «поточным» нельзя. Автоматизируются лишь определенные операции, и эксперту предоставляется возможность вносить коррективы в работу отдельных блоков. Работа с экспертной системой в общем случае строится в диалоговом режиме.

При полностью сформированной информационной системе (база данных и блок программных приложений с необходимым интерфейсом) теоретически эксперту достаточно указать подмножество катализаторов, характерных для данного объекта, а также ранговые градации связанных с катализаторами факторов влияния для того, чтобы получить решение – набор рекомендаций с указанием частотностей их применения. Но эксперту также предоставляется возможность внесения коррекций для настройки системы. Например, могут быть изменены пороговые значения порождающих связей, позиционирование зон профиля рисков и др.

Отдельно следует отметить процедуры формирования структуры графа на этапе проектирования информационной системы. Для выполнения указанных процедур необходимо привлекать экспертов для определения состава факторов отдельных групп, установления связей между факторами отдельных групп, придания им количественных характеристик и решения ряда других вопросов.

Данный этап проектирования информационной системы является наиболее ответственным и трудоемким и требует выработки обобщенных оценок мнений ряда экспертов по тому или иному вопросу. Для этого были использованы методы нечисловой статистики и разработано специализированное программное приложение, позволяющее получать медианальные решения (медиана по Кемени [6]) по отдельным вопросам формирования структурных компонентов системы.

Процедуры, выполняемые экспертной системой, условно можно разделить на два типа, по аналогии с понятиями «front-end» и «back-end», принятыми в WEB-проектировании. Первые выполняются экспертом-пользователем (ЛПР), а вторые представляют собой функциональные автоматизированные блоки программного комплекса системы. Причем конфигурация данных, поступающих на вход отдельных блоков, в значительной степени определяется действиями ЛПР.

Указанные процедуры неразрывно связаны между собой, представляют собой целостный архитектурный комплекс и определяются сценарием работы, подготовленным в рамках концептуальной модели системы.

Рассмотрим подробнее основные функциональные блоки системы и процедуры.

Сценарий обработки информации. На рис. 5 в самом общем виде представлена схема СПЭР, включающая основные функциональные блоки системы и потоки обрабатываемой информации.

На начальном этапе работы необходимо изучить специфические условия функционирования (жизнедеятельности) выбранного объекта и выделить наиболее существенные из них. Набор таких условий образует подмножество факторов группы «катализаторы». Если предельного множества катализаторов, содержащихся в базе данных недостаточно, эксперт-пользователь может ввести дополнительные факторы. Для этого в состав программного комплекса системы включен редактор базы данных, позволяющий модифицировать (добавлять, удалять или обновлять) любую информацию, содержащуюся в ней.

Кроме анализа условий функционирования объекта на начальном этапе необходимо выделить факторы интенсивности и отредактировать при необходимости,

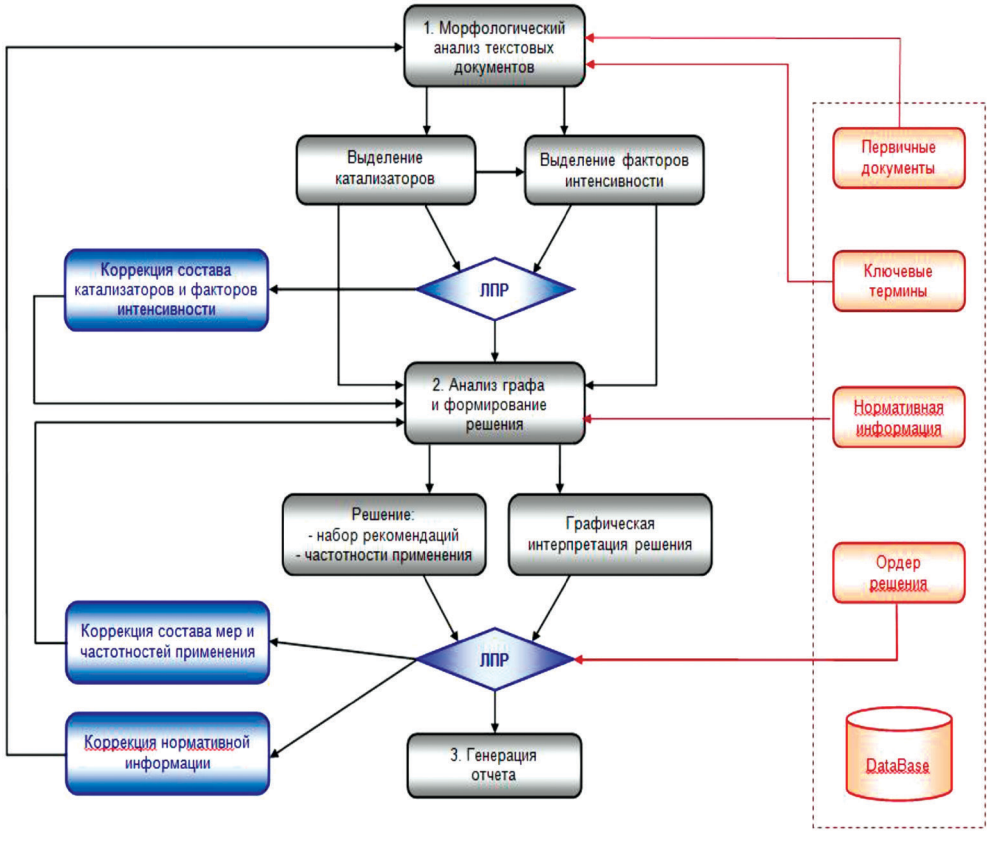


Рис. 5. Блок схема СПЭР. Сценарий работы в диалоговом режиме

их связи с катализаторами. При наличии в базе данных всей структурной и нормативной информации можно запустить систему в потоковом режиме и получить весь предусмотренный спектр промежуточных и результативных данных. Кроме того, результативные данные могут быть оформлены в виде структурированного отчета и распечатаны.

Выделение набора специфичных для данного объекта условий функционирования достаточно трудоемкая процедура. Поэтому система предполагает наличие в базе данных массива информации о различных аспектах «жизнедеятельности» выбранного объекта (по аналогии с анамнезом в медицине). В особенности это касается сведений о различных нештатных ситуациях.

Для облегчения выполнения процедур формирования специфических условий в системе предусмотрен морфологический текстовой анализатор. Его работа осуществляется посредством ключевых слов и морфологических словоформ, введенных в базу данных. Выделенные с помощью текстового анализатора наборы катализаторов, а также связи между ними и факторами интенсивности могут быть скорректированы экспертом перед запуском системы.

Опишем более подробно процедуры, выполняемые при работе эксперта с системой.

Установление подмножества компонентов группы «условия эксплуатации» представляет собой весьма нетривиальную проблему. Сложность состоит в том, что источником для анализа служит содержащаяся в первичных документах текстовая информация, в которой интересующие нас данные представлены в несистематизированном и «хаотичном» виде. Проблему представляет также их лексическая и морфологическая неадекватность поисковым запросам.

Такого рода анализ текстовой информации может быть ассоциирован с поисковыми системами. Хотя принципы работы классических поисковых систем не вполне соответствуют данной задаче. Проблема состоит в том, что в целом не гарантирована семантическая релевантность содержащихся в тексте терминов, указывающих на условия функционирования объекта, ограниченному множеству терминов, обозначающих компоненты группы «условия эксплуатации», т. е. лексические способы отображения в тексте специфических условий функционирования (эксплуатации) объекта нерелевантные значениям этих компонентов, хранимых в базе данных.

Таким образом, выполнение всех вышеуказанных процедур выделяется в самостоятельный модуль, указанный на рис. 2 как «текстовой анализатор».

После окончания работы системы эксперту предлагается решение.

Все процедуры обработки потоков данных в рамках сформированного графа выполняются автоматически. В частности, на основе анализа статусов рисков выделенных опасностей и существующих связей между опасностями и мерами безопасности (основные субъекты рекомендаций) система формирует набор рекомендованных мер с указанием частотности их применения.

Набор мер обеспечения безопасности представляет собой группу факторов «субъекты рекомендаций». Причем, как отмечалось выше (см. структуру факторов системы), в данную группу включены как меры, предусмотренные

национальными и международными стандартами, так и дополнительные меры, введенные экспертами на стадии проектирования системы. Система не игнорирует предусмотренные стандартные меры, но при необходимости меняет частотность их применения.

Помимо набора рекомендованных мер безопасности система предоставляет визуальную информацию о наборах факторов и системе связей между ними, обусловившую выбор той или иной меры безопасности. Это позволяет эксперту-пользователю наглядно представлять характер причинно-следственных связей, инициировавших рекомендацию той или иной меры безопасности.

Как отмечалось выше, система предусматривает возможность изменения структурной и нормативной информации, сформированной на стадии ее проектирования. Реализация такой функции позволяет проводить настройку системы для специфических условий конкретного объекта. При этом информационно-логическая конфигурация базы данных спроектирована таким образом, чтобы структура информации, относящаяся к другим объектам, не изменялась.

Эксперту также предоставляется возможность менять частотности применения рекомендованных системой мер безопасности. После выполнения необходимых, по мнению эксперта-пользователя, изменений исходной и/или промежуточной информации цикл вычислений в автоматизированном режиме может быть повторен. Полученные результаты автоматически формируются в виде отчетного документа. Структура отчета устанавливается на стадии проектирования системы и не может быть изменена в пользовательском режиме. Для образования структурных разделов отчета в базе данных предусмотрены специальные объекты, именуемые «ордерами решения». В такие ордера система вносит информацию по всем группам факторов и связям между ними, а также нормативные показатели, образующие результаты решения.

В ордере решения помимо рекомендованных мер могут фигурировать и другие мероприятия (тренинги, учебные материалы и др.). Их состав определяется обязательными для данного объекта мерами безопасности, предписанными различного рода стандартами – региональными или международными.

Заключение. На основе предложенной модели был разработан комплекс программных приложений. В качестве математической модели использован стохастический нагруженный граф. Результаты решения были апробированы для различного рода сложных технических объектов. В частности, для разработки рекомендаций в области безопасности полетов, осуществляемой компанией TrainingPortNet (Канада). В настоящий момент ведется разработка системы обеспечения безопасности для объектов энергетически.

Список использованных источников

1. Андрейчиков, А. В. Интеллектуальные информационные системы / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 424 с.

2. Боровиков, В. П. Прогнозирование в системе Statistica в среде Windows : учеб. пособие / В. П. Боровиков, Г. И. Ивченко. – М. : Финансы и статистика, 2006. – 368 с.

3. Горбань, А. Н. Методы нейроинформатики / А. Н. Горбань. – Красноярск, 1998. – 205 с.

4. Нейроинформатика : учеб. пособие / А. Н. Горбань [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1998. – 296 с.

5. Дюк, В. А. Информационные технологии в медико-биологических исследованиях / В. А. Дюк, В. Л. Эмануэль. – СПб. : Питер, 2003. – 528 с.

6. Кемени, Дж. Кибернетическое моделирование: Некоторые приложения / Дж. Кемени, Дж. Снелл. – М. : Сов. радио, 1972. – 192 с.

7. Кендэл, М. Ранговые корреляции / М. Кендэл. – М. : Статистика, 1975. – 216 с.

8. Литвак, Б. Г. Экспертная информация. Методы получения и анализа / Б. Г. Литвак. – М. : Радио и связь, 1982. – 368 с.

9. Орлов, А. И. Основы теории принятия решений: учеб. пособие / А. И. Орлов. – М. : Моск. гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана, 2002.

10. Орлов, А. И. Нечисловая статистика. Серия статистические методы / А. И. Орлов. – М. : МЗ-Пресс, 2004. – 513 с.

11. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации (пер. с польск.) / С. Осовский. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

12. Павлов, А. Н. Методы обработки экспертной информации : учеб.-метод. пособие / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов. – СПб. : ГУАП, 2005. – 34 с.

13. Раушенбах, Г. В. Меры близости и сходства / Г. В. Раушенбах // Анализ нечисловой информации в социологических исследованиях. – М. : Наука, 1985. – С. 169–203.

14. Хемминг, Р. В. Численные методы для научных работников и инженеров (пер. с англ.) / Р. В. Хемминг. – М. : Наука, 1972. – 400 с.

15. Чалбаш, О. Х. Система поддержки экспертных решений / О. Х. Чалбаш // Energy Security and Controlled Power Transmissions / сост. Е. В. Быкова, В. П. Берзан. – Кишинев, 2021. – С. 54–63.

References

1. Andrejchikov, A. V. Intellektual’nye informacionnye sistemy / A. V. Andrejchikov, O. N. Andrejchikova. – M. : Finansy i statistika, 2004. – 424 s.

2. Borovikov, V. P. Prognozirovanie v sisteme Statistica v srede Windows : ucheb. posobie / V. P. Borovikov, G. I. Ivchenko. – M. : Finansy i statistika, 2006. – 368 s.

3. Gorban’, A. N. Metody nejroinformatiki / A. N. Gorban’. – Krasnoyarsk, 1998. – 205 s.

4. Nejroinformatika : ucheb. posobie / A. N. Gorban’ [et al.]. – Novosibirsk : Nauka, 1998. – 296 s.

5. Dyuk, V. A. Informacionnye tekhnologii v mediko-biologicheskih issledovaniyah / V. A. Dyuk, V. L. Emanuel’. – SPb. : Piter, 2003. – 528 s.

6. Kemeni, Dzh. Kiberneticheskoe modelirovanie: Nekotorye prilozheniya / Dzh. Kemeni, Dzh. Snell. – M.: Sov. radio, 1972. – 192 s.

7. Kendel, M. Rangovye korrelyacii / M. Kendel. – M. : Statistika, 1975. – 216 s.

8. Litvak, B. G. Ekspertnaya informaciya. Metody polucheniya i analiza / B. G. Litvak. – M. : Radio i svyaz’, 1982. – 368 s.

9. Orlov, A. I. Osnovy teorii prinyatiya reshenij: ucheb. posobie / A. I. Orlov. – M. : Moskov. gos. tekhn. un-t im. N. E. Baumana, 2002.

10. Orlov, A. I. Nechislovaya statistika. Seriya statisticheskie metody / A. I. Orlov. – M. : MZ-Press, 2004. – 513 s.

11. Osovskij, S. Nejronnye seti dlya obrabotki informacii (per. s pol’sk.) / S. Osovskij. – M. : Finansy i statistika, 2002. – 344 s.

12. Pavlov, A. N. Metody obrabotki ekspertnoj informacii : ucheb.-metod. posobie / A. N. Pavlov, B. V. Sokolov. – SPb. : GUAP, 2005. – 34 s.

13. Raushenbah, G. V. Mery blizosti i skhodstva / G. V. Raushenbah // Analiz nechislovoj informacii v sociologicheskih issledovaniyah. – M. : Nauka, 1985. – S. 169–203.

14. Hemming, R. V. Chislennye metody dlya nauchnyh rabotnikov i inzhenerov (per. s angl.) / R. V. Hemming. – M. : Nauka, 1972. – 400 s.

15. Chalbash, O. H. Sistema podderzhki ekspertnyh reshenij / O. H. Chalbash // Energy Security and Controlled Power Transmissions / cost. E. V. Bykova, V. P. Berzan. – Kishinev, 2021. – S. 54–63.

УДК 658.264

С. А. Александрович, Е. В. Цегалко

АНАЛИЗ БАРЬЕРОВ НА ПУТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ НИЗКОУГЛЕРОДНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В ЖИЛИЩНОМ СЕКТОРЕ

Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассматривается проблематика перехода к низкоуглеродному теплоснабжению жилых зданий. Приведена классификация барьеров на пути внедрения технологий низкоуглеродного теплоснабжения и выделены основные группы барьеров для различных технологий низкоуглеродного теплоснабжения. На основании проведенного анализа сформирован перечень инструментов, способствующих внедрению низкоуглеродного теплоснабжения.

Ключевые слова: жилищный сектор, низкоуглеродное теплоснабжение, возобновляемые источники энергии, электроэнергия, барьеры, система теплоснабжения.

S. A. Aliaksandrovich, E. V. Tsegalko

ANALYSIS OF BARRIERS TO IMPLEMENTATION OF LOW-CARBON HEATING TECHNOLOGIES IN THE RESIDENTIAL SECTOR

Institute of Power Engineering of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The article deals with the problems of transition to low-carbon heating of residential buildings. The classification of barriers to the introduction of low-carbon heating technologies is given and the main groups of barriers to various low-carbon heating technologies are identified. Based on the analysis, a list of measures contributing to the introduction of low-carbon heating has been formed.

Keywords: residential sector, low-carbon heating, renewable energy sources, electricity, barriers, heating system.

Введение. Начиная с 2000 г. переход на низкоуглеродные виды топлива и технологии начал приобретать все большую популярность в некоторых странах в связи с климатической политикой. В последнее время страны начали переход к низкоуглеродному теплоснабжению в связи с целями в области изменения климата, такими как переход к тепловым насосам в Германии и по направлению к тепловым насосам и централизованному теплоснабжению, работающему на биомассе, в Швеции.

Многочисленные препятствия замедляют переход к низкоуглеродному теплоснабжению. Они связаны с политическими и институциональными рамками, отсутствием равных условий с ископаемыми видами топлива для теплоснабжения, высокими первоначальными затратами на некоторые технологии теплоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии, техническими проблемами и недостаточной осведомленностью населения о преимуществах и потенциале технологий низкоуглеродного теплоснабжения [1].

Материалы и методы исследования. Барьеры на пути широкого внедрения районного теплоснабжения с использованием возобновляемой энергетики варьируются от общих вопросов, не имеющих отношения к условиям реализации, до конкретных городских условий.

Можно выделить пять различных категорий общих барьеров.

Финансовые барьеры связаны с высокими первоначальными инвестиционными затратами, а также рисками, воспринимаемыми потенциальными потребителями и инвесторами.

Доступность ресурсов и стоимость. Основаны на стоимости, доступности, непредсказуемости и необходимости оценки потенциала возобновляемых источников энергии.

Городская среда и существующая сеть. Как структура городской среды, так и проектные параметры существующих сетей могут повлиять на принятие районных схем теплоснабжения с использованием электроэнергии и возобновляемых источников энергии.

Спрос. Анализ фактического уровня спроса/нагрузки и прогнозный уровень потребления необходим для разработки бизнес-модели и муниципального планирования. Эту проблему можно решить путем расширения сети и поэтапного модульного расширения мощностей возобновляемых источников энергии в районе. В национальном масштабе важна соответствующая политика подключения.

Политика и нормативные акты должны обеспечивать соответствующие рамки для содействия внедрению систем низкоуглеродного теплоснабжения на основе использования электроэнергии и возобновляемых источников энергии.

Политические и институциональные барьеры лежат в основе медленного перехода. Обязательства, принятые в рамках Парижского соглашения, редко воплощаются в конкретные действия, а если и воплощаются, то не охватывают все конечные виды использования. Это особенно верно в контексте доступа, где до сих пор отсутствуют международные политические обязательства по обеспечению чистого, недорогого и надежного доступа к энергии.

Основу проводимых политик, способствующих внедрению низкоуглеродного теплоснабжения, составляют следующие инструменты:

надежные долгосрочные обязательства: страны с успешным переходом имеют надежные долгосрочные обязательства по переходу инфраструктуры теплоснабжения, часто инициируемые по соображениям безопасности поставок, а в последнее время для достижения амбициозных целей декарбонизации;

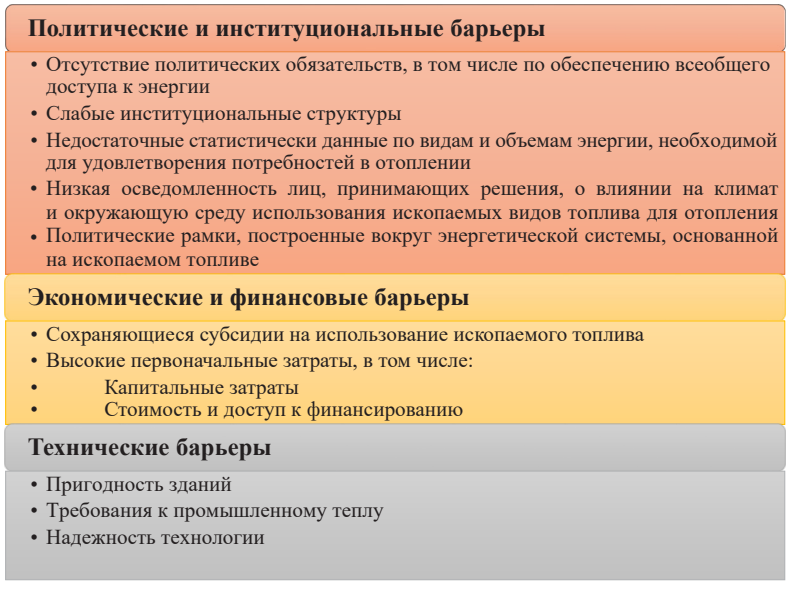


Рис. 1. Барьеры, замедляющие переход к низкоуглеродному теплоснабжению на основе использования электроэнергии и возобновляемых источников энергии [2]

налоги: налоги на энергию или выбросы углерода в некоторых странах оказались успешными в процессе перехода от нефти и газа к использованию возобновляемых технологий;

строительные кодексы: строительные нормы и правила, требующие определенного процента тепла, выделяемого из возобновляемых источников энергии, стимулировали переход на низкоуглеродные технологии;

технические стандарты: в частности, оказывают поддержку рынку тепловых насосов;

гранты/дотации: предоставляются для отдельных технологий, а также для инвестиций в централизованное теплоснабжение.

Барьеры, связанные с финансированием, актуальны для районных систем теплоснабжения в целом. Они усугубляются в проектах возобновляемых источников энергии, где инвестиционные затраты составляют большую долю общих расходов в течение срока службы проекта, чем инвестиции в традиционные генерирующие технологии.

Проанализируем основные барьеры внедрения систем низкоуглеродного теплоснабжения и возможные пути их решения (рис. 1).

Экономические и финансовые барьеры

Высокие первоначальные инвестиционные затраты. К основным мероприятиям по преодолению данных барьеров можно отнести:

национальную поддержку. Субсидии могут сыграть решающую роль в создании возможностей для использования возобновляемых источников энер-

гии в системах теплоснабжения. В мире существует широкий спектр национальных политик, направленных на содействие внедрению систем теплоснабжения на основе использования возобновляемых источников энергии;

участие частного сектора. Привлечение частного капитала и создание государственно-частных партнерств – возможная стратегия преодоления финансовых ограничений;

синергию с другими инфраструктурными проектами. Использование существующей энергетической инфраструктуры и других инфраструктурных проектов снижает первоначальные инвестиционные затраты. Например, объединение возобновляемых источников тепла и существующих ТЭЦ позволило использовать существующие накопители и подключения к сетям электроснабжения и централизованного теплоснабжения в Орхусе;

стабильный уровень нагрузки со стороны потребителя. Стабильный уровень спроса (нагрузки) на ранних этапах критически важен для обеспечения стабильного дохода и оправдания первоначальных затрат.

Риски со стороны финансовых организаций и потенциальных потребителей. Основными мероприятиями по преодолению данных барьеров являются:

реализация демонстрационных (пилотных) проектов. Демонстрационные (пилотные) проекты обеспечивают процесс обучения, а также способствуют признанию со стороны потенциальных потребителей и источников финансирования;

привлечение научно-исследовательских институтов. Многие схемы возобновляемого централизованного теплоснабжения и водоснабжения являются инновационными и требуют поддержки со стороны экспертов-исследователей для снижения технологических рисков. Например, результаты научных исследований легли в основу проектирования и установки системы солнечного отопления в Мюнхене.

Барьеры, связанные с доступностью ресурсов и их стоимостью

Неравномерность нагрузки со стороны потребителя тепловой энергии. Среди основных мероприятий по преодолению данного барьера можно выделить:

использование систем аккумулирования. Аккумулирование тепла позволяет лучше согласовывать выработку тепла из возобновляемых источников энергии тепла со спросом в различных временных масштабах. Данные технологии часто является неотъемлемой частью солнечных систем отопления;

диверсификация спроса. Разнообразный набор потребителей создает более плавные профили совокупной нагрузки с большей составляющей базовой нагрузки;

сочетание разнообразных возобновляемых источников энергии. Соответствующее комбинирование использования различных возобновляемых источников энергии позволит максимизировать потенциал всей системы.

Барьеры, связанные с городской средой и сетевой энергетической инфраструктурой

Проблемы размещения и выбора площадки для определенных возобновляемых источников энергии. Основными мероприятиями по преодолению данных барьеров являются:

использование городских пустырей и устаревших объектов. В пределах города неиспользуемые территории и городские пустыри часто предоставляют возможность для интеграции возобновляемых источников энергии;

использование существующих станций. Интеграция возобновляемых источников в существующую централизованную энергетическую инфраструктуру, в частности, ТЭЦ;

учет использования возобновляемых источников энергии при проектировании новых районов жилой застройки. Новые жилые комплексы предлагают большую гибкость в проектировании для интеграции возобновляемых источников энергии;

оценка спроса со стороны потребителя. Проводить предпроектную оценку потребности в тепле в городах, чтобы определить потенциал использования возобновляемых источников энергии вблизи центров спроса.

Барьеры, связанные с политикой в области энергоснабжения

Низкий уровень развития рынка технологий и нормативно-правовой базы. К основным мероприятиям по преодолению данных барьеров можно отнести:

разрешительные процедуры и правила. Использование возобновляемых источников тепла может потребовать значительного использования государственных земель и ресурсов. Оптимизация процедур подачи заявок и разрешений на национальном уровне может существенно повлиять на реализацию этих проектов и снизить риск, связанный с длительными бюрократическими процедурами;

масштабное использование ВИЭ. Работа в более крупных масштабах может помочь снизить барьеры, связанные с процедурами получения разрешений.

Недостаточное политическое признание. Основными мероприятиями по преодолению данных барьеров являются:

ввод целевых показателей по выбросам парниковых газов. Комплексные цели по сокращению выбросов могут стимулировать переход к экологически чистому централизованному теплоснабжению;

энергетическая маркировка зданий. Подключение зданий к районным энергетическим сетям с частично возобновляемой генерацией часто не влияет на энергетическую маркировку объекта.

Сильная поддержка традиционных решений в области теплоснабжения и использования ископаемых видов топлива. Основным мероприятием

по преодолению данного барьера является переоценка (пересмотр) субсидий. Переоценка или компенсация этих политических инструментов может увеличить долю возобновляемой энергии на рынке.

Барьеры на пути перехода к использованию электроэнергии из возобновляемых источников энергии в системах теплоснабжения жилых зданий

Решения по электрификации на основе возобновляемых источников энергии сталкиваются с ценовыми и финансовыми препятствиями, помимо проблем, связанных с технологиями, рынком инфраструктуры и нормативными требованиями [3].

Технические и связанные с инфраструктурой барьеры

Электрификация систем отопления и охлаждения увеличивает нагрузку на инфраструктуру, обеспечивающую передачу и распределение электроэнергии. Страны с холодными зимами или жарким летом сталкиваются с особыми проблемами высокого спроса при электрификации, если они не инвестируют в расширение или модернизацию инфраструктуры своей энергосистемы, включая дополнительные генерирующие мощности. Например, во Франции типичный пиковый спрос на электроэнергию и газ зимой в четыре раза выше, чем летом [2].

Помимо увеличения генерирующих мощностей для удовлетворения пикового спроса, сеть должна быть способна поставлять произведенную электроэнергию. В частности, электрификация промышленных нагрузок или полная электрификация зданий в отдельных районах может потребовать модернизации сетей передачи и распределения электроэнергии. В отсутствие надлежащим образом развитой энергосистемы широкая электрификация систем отопления может создать ограничения в сети, что остановит дальнейшее внедрение электрифицированных технологий отопления. Необходимы надлежащее планирование и инвестиции в инфраструктуру, а также внедрение цифровых технологий мониторинга и управления и поддержка научно-исследовательских, опытно-конструкторских и демонстрационных проектов.

Рыночные и регуляторные барьеры

Электрификация систем отопления может быть затруднена различными рыночными и регуляторными барьерами. К ним относятся отсутствие ценовых сигналов для гибкости спроса, устаревшая структура рынка электроэнергии и сложность конкуренции с ископаемым топливом в виду цен на энергоресурсы. Традиционная структура тарифов на электроэнергию не предусматривает ценовых сигналов для системного потребления электроэнергии или гибкости

спроса. Спрос часто рассматривается как пассивный и негибкий. Однако гибкость со стороны потребителя, которая будет иметь решающее значение в энергетических системах, пока не стимулируется должным образом. Преодоление этих барьеров потребует переосмысления структуры тарифов на электроэнергию для поддержки электрификации отопления.

Заключение. Масштабный переход к низкоуглеродному теплоснабжению частного сектора на основе использования электроэнергии и возобновляемых источников энергии в Республике Беларусь будет иметь важное значение как с позиции увеличения электропотребления, так и для достижения целей по сокращению выбросов углерода в соответствии с Законом об изменении климата и выполнения обязательств, взятых в Парижском соглашении.

Проведенный анализ показал, что многочисленные препятствия замедляют переход к низкоуглеродному теплоснабжению. Они связаны с политическими и институциональными рамками, отсутствием равных условий с ископаемыми видами топлива для теплоснабжения, высокими первоначальными затратами на некоторые технологии теплоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии, техническими проблемами и недостаточной осведомленностью населения о преимуществах и потенциале технологий низкоуглеродного теплоснабжения.

Для успешного долгосрочного перехода к низкоуглеродному теплоснабжению жилых зданий необходимо несколько элементов передовой политики:

долгосрочное стремление к использованию возобновляемых источников тепла в зданиях;

эффективный план реализации, основанный на системном подходе, интегрирующий возобновляемое тепло с политикой энергоэффективности и способствующий действиям на местном уровне;

государственные инвестиции в инфраструктуру централизованного теплоснабжения для облегчения интеграции возобновляемого тепла;

устранение экономических барьеров с помощью механизмов налогообложения и поддержки. Политика поддержки возобновляемого тепла в зданиях сосредоточена на грантах и поддержке возобновляемых источников энергии в централизованном теплоснабжении;

устранение неэкономических барьеров, например, с помощью строительных норм и сертификатов.

Список использованных источников

1. Renewable Heat Policies [Electronic resource] // IEA. – Mode of access : https://www.iea.org/reports/renewable-heat-policies. – Date of access : 01.09.2022.

2. Renewable Energy in District Heating and Cooling: A Sector Roadmap for REmap [Electronic resource] // International Renewable Energy Agency. – Mode of access : https://www.irena.org/publications/2017/Mar/Renewable-energy-in-district-heating-and-cooling. – Date of access : 01.09.2022.

3. Smart Electrification with Renewables: Driving the transformation of energy services [Electronic resource] // International Renewable Energy Agency. – Mode of access : https://www.irena.org/publications/2022/Feb/Smart-Electrification-with-Renewables. – Date of access : 01.09.2022.

References

1. Renewable Heat Policies [Electronic resource] // IEA. – Mode of access : https://www.iea.org/reports/renewable-heat-policies. – Date of access : 01.09.2022.

2. Renewable Energy in District Heating and Cooling: A Sector Roadmap for REmap [Electronic resource] // International Renewable Energy Agency. – Mode of access : https://www.irena.org/publications/2017/Mar/Renewable-energy-in-district-heating-and-cooling. – Date of access : 01.09.2022.

3. Smart Electrification with Renewables: Driving the transformation of energy services [Electronic resource] // International Renewable Energy Agency. – Mode of access : https://www.irena.org/publications/2022/Feb/Smart-Electrification-with-Renewables. – Date of access : 01.09.2022.

УДК 621.311

П. В. Илюшин

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ДОЛИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СТРУКТУРЕ ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ И СПОСОБЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Доктор технических наук, Институт энергетических исследований РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация. Приведены результаты анализа международного и российского опыта интеграции и функционирования электростанций на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в составе энергосистем, а также возникающих проблемных вопросов. Представлены перечни первоочередных и перспективных шагов, подлежащих реализации, позволяющие обеспечить надежную работу энергосистем и электроснабжение потребителей.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветровая электростанция, солнечная электростанция, технические требования, функция Low Voltage Ride Through, управление режимами энергосистем.

P. V. Ilyushin

PROBLEMATIC ISSUES OF INCREASING THE SHARE OF POWER PLANTS BASED ON RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE STRUCTURE OF GENERATING CAPACITIES AND WAYS TO SOLVE THEM

Doctor of Engineering Science, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Annotation. The results of the analysis of international and Russian experience of integration and operation of power plants based on renewable energy sources (RES) as part of power systems, as well as emerging problematic issues are presented. Lists of priority and promising steps to be implemented to ensure reliable operation of power systems and power supply to consumers are presented.

Keywords: renewable energy sources, wind power plant, solar power plant, technical requirements, Low Voltage Ride Through function, power system mode management.

Введение. В ряде стран мира поэтапно реализуются планы по достижению углеродной нейтральности к 2050 г. Поэтому в электроэнергетике снижаются объемы использования невозобновляемых источников энергии при увеличении объемов строительства электростанций на основе ВИЭ. Основные объемы вводов новых генерирующих мощностей приходятся на ветровые (далее – ВЭС) и солнечные (далее – СЭС) электростанции [1].

Строительство ВЭС (СЭС) обусловлено их высокой энергетической и экологической эффективностью, снижающей зависимость стран от импорта газа и нефти. Известны планы по полному переходу, например, Швеции к 2040 г. и Канады к 2050 г. на выработку электроэнергии электростанциями на основе ВИЭ. Устойчивый тренд на снижение удельных капитальных вложений в строительство ВЭС (СЭС) содействует их широкому внедрению [2].

Как правило, ВЭС (СЭС) интегрируются в распределительные сети среднего 6–35 кВ (мощностью до 1–10 МВт на одну цепь) и высокого 110–220 кВ напряжения (мощностью до 15–100 МВт на одну цепь). В России к 2025 г. должно быть введено в эксплуатацию ВЭС (СЭС) суммарной установленной мощностью 5,28 ГВт, а в следующие десять лет еще около 6,7 ГВт [3].

Интеграция электростанций на основе ВИЭ осуществляется на основании разрабатываемой схемы выдачи мощности (СВМ). В рамках СВМ рассматриваются схемно-режимные ситуации на год ввода электростанции в эксплуатацию, а также в перспективной схеме энергосистемы на срок до 5 лет. При этом оценить синергетический эффект для энергосистемы от интеграции большого количества электростанций на основе ВИЭ в краткосрочной и тем более долгосрочной перспективе на основе СВМ невозможно.

Упрощенная интеграция электростанций на основе ВИЭ с целью снижения удельной стоимости реализации проектов на данном этапе может обернуться существенными негативными последствиями. Опыт показывает, что при таком подходе возникают различные проблемные вопросы в процессе эксплуатации, что может потребовать значительно больших затрат в будущем для обеспечения безопасности и надежности функционирования энергосистем.

Целью статьи является анализ основных проблемных вопросов интеграции и функционирования ВЭС (СЭС) в составе энергосистем, а также представление перечня первоочередных и перспективных шагов, позволяющих увеличить их долю в структуре генерирующих мощностей.

Материалы и методы исследования. Приведены результаты анализа международного и российского опыта интеграции и функционирования электростанций на основе ВИЭ в составе энергосистем, расчетов электромеханических переходных процессов в сетях с ВЭС, выполненные в ПК PowerFactory, измерений фактической выработки ВЭС (СЭС), а также ретроспективные графики нагрузки энергосистемы.

Международный опыт интеграции ВЭС (СЭС) в энергосистемы позволяет выделить четыре этапа интеграции по суммарной установленной мощности:

первый этап (менее 3 %) – суммарная и единичные мощности электростанций на основе ВИЭ значительно меньше в сравнении с суммарной мощностью генерирующего оборудования в энергосистеме, поэтому она не оказывает существенного влияния на режимы работы энергосистем. Это позволяет свободно компенсировать стохастический характер выработки электроэнергии ВЭС (СЭС) традиционными электростанциями. В России ведется строительство крупных ВЭС и ветропарков установленной мощностью 35–210 (460) МВт, а также крупных СЭС установленной мощностью 25–115 МВт;

второй этап (3–13 %) – влияние ВЭС (СЭС) становится заметным, но за счет корректировки нормативно-технических документов в области управления режимами энергосистем оно может быть учтено. Желательно внедрение систем прогнозирования выработки электроэнергии на крупных ВЭС (СЭС) для планирования режимов и компенсации стохастической выработки электроэнергии традиционными электростанциями и управляемой нагрузкой;

третий этап (13–25 %) – значительное влияние ВЭС (СЭС) на режимы работы энергосистем, распределительных сетей и традиционных электростанций (запирание мощности, набросы нагрузки, перегрузки элементов сети и др.). Особое значение приобретает гибкость энергосистем, позволяющая реализовывать оптимальное управления режимами в темпе процесса за счет внедрения систем автоматического управления (САУ) на основе данных от систем оперативного и краткосрочного прогнозирования выработки ВЭС (СЭС);

четвертый этап (25–50 %) – возможны аварии, вызванные нарушением устойчивости энергосистем, перегрузками электрооборудования и отключением генерирующего/электросетевого оборудования, нарушением электроснабжения потребителей даже при кратковременных аварийных возмущениях, в условиях штатной работы устройств релейной защиты и автоматики (РЗА).

В отдельных энергосистемах России суммарная мощность электростанций на основе ВИЭ уже соответствует 3-му и 4-му этапам, что требует разработки и реализации комплекса организационно-технических мероприятий [4].

При конкурсных отборах проектов ВЭС (СЭС) часто учитываются только экономические показатели и требования по локализации оборудования, при этом не уделяется должного внимания решению важных технических вопросов их интеграции и функционирования в составе энергосистем.

В указанных условиях требуется внесение изменений в нормативно-правовые акты и нормативно-технические документы, регламентирующие технические требования к генерирующему оборудованию ВЭС (СЭС), его технологическому присоединению и функционированию в составе энергосистем [5]. Кроме того, необходима разработка методических документов по проектированию

электростанций на основе ВИЭ (методик, методических указаний, методических рекомендаций и др.).

Результаты исследования и их обсуждение. Рассмотрим основные проблемные вопросы интеграции и функционирования ВЭС (СЭС) в составе энергосистем.

Генерирующее оборудование ВЭС (СЭС) имеет высокие коэффициенты готовности, но отключается достаточно часто, что приводит к набросам нагрузки на прилегающую сеть и требует покрытия аварийных дефицитов активной мощности со стороны традиционных электростанций.

Коэффициенты готовности генерирующего оборудования ВЭС (СЭС) достаточно высокие, сопоставимые с газотурбинными и газопоршневыми установками объектов распределенной генерации, и находятся в диапазоне от 93,2 до 97,8 % для ВЭС и в диапазоне от 94,6 до 99 % для СЭС.

Генерирующее оборудование ВЭС (СЭС) отключается в 5–25 раз чаще и простаивают суммарно на 2–7 % больше, чем крупноблочные газотурбинные и паротурбинные генерирующие установки. Долевой коэффициент внутренних причин отключений составляет около 32,5 %, а внешних причин – около 67,5 %, что обусловлено частотой и тяжестью аварийных возмущений в энергосистемах.

Ветроэнергетические установки (ВЭУ) обладают сильно выраженной зависимостью показателей надежности от мощности, поэтому с увеличением мощности ВЭУ наблюдается снижение среднего времени между вынужденными отключениями на 1000 ч/МВт, а коэффициента готовности – на 0,4 %/МВт. Среднее время между вынужденными отключениями инверторов СЭС за последние время уменьшилось в 5 раз, что связано с частыми срабатываниями защит инверторов, при этом коэффициент готовности у них вырос до 99 % [6].

Отключения ВЭС (СЭС) при нормативных возмущениях в сети обусловлены заводской настройкой вольт-секундной характеристики функции LVRT (Low Voltage Ride Through) в инверторах, которая не соответствует требованиям Методических указаний по устойчивости энергосистем.

На рис. 1 приведена вольт-секундная характеристика для ВЭС при нормативных возмущениях в прилегающей сети (жирная линия), в пределах которой должна обеспечиваться устойчивая работа генерирующего оборудования, в сравнении с вольт-секундными характеристиками функции LVRT инверторов ВЭС различных зарубежных заводов-изготовителей.

Анализ рис. 1 показывает, что для устойчивой работы ВЭС требуется проведение реконструкции устройств РЗА в сетях для сокращения времени ликвидации коротких замыканий (область *3*). Собственникам ВЭС следует при закупке инверторов включать требование о переконфигурации вольт-секундной характеристики функции LVRT на основании результатов расчетов электрических режимов, полученных в процессе разработки СВМ (область *1*) [7].

Повышение уровней напряжения в распределительных сетях низкого и среднего напряжения на величину более 10 % в режимах минимальных нагрузок.

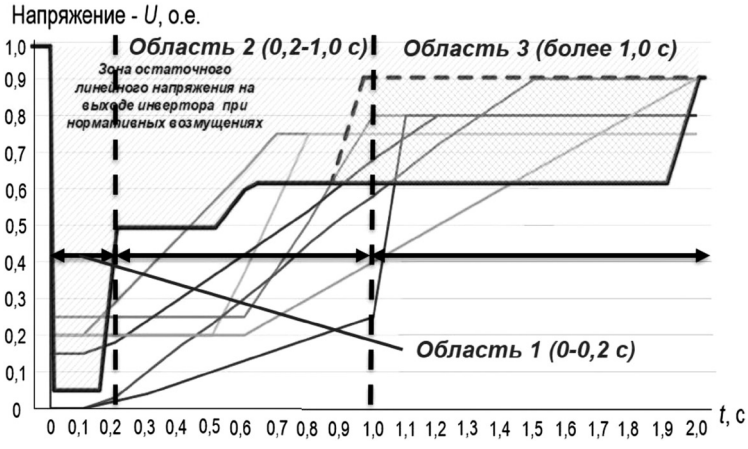


Рис. 1. Вольт-секундные характеристики функции LVRT зарубежных заводов-изготовителей в сравнении с российскими требованиями к ВЭС

Выдача микрогенерацией домохозяйств избыточной активной мощности по отношению к потребляемой в сетях 0,4 кВ, в которых величина активного сопротивления элементов превышает реактивное, приводит к повышению напряжения в точке подключения на более чем 10 % от $U_{ном}$ = 230 В.

На рис. 2 приведены графики напряжений в сети 0,4 кВ для трех режимов: *1* – максимальное потребление активной мощности ($P_{макс}$) при отсутствии выработки СЭС; *2* – выдача $P_{макс}$ СЭС при минимальной нагрузке в сети 0,4 кВ ($P_{мин}$); *3* – выдача $P_{макс}$ СЭС при нагрузке $P_{мин}$ с регулируемым уровнем потребления реактивной мощности в зависимости от величины напряжения.

Введение технических требований к генерирующему оборудованию ВЭС (СЭС) в отношении потребления реактивной мощности при выдаче активной, в зависимости от величины напряжения в точке присоединения, позволяет стабилизировать уровни напряжения в распределительных сетях, не допуская повреждений электроприемников потребителей от перенапряжений [8].

Стохастический характер выработки электроэнергии ВЭС (СЭС) в зависимости от погодных условий (рис. 3). Анализ рис. 3 показывает, что резкие изменения величины вырабатываемой активной мощности ВЭС (СЭС) на коротких временных интервалах требует наличия достаточного оперативного резерва мощности на высокоманевренных традиционных электростанциях. Часто генерирующее оборудование тепловых электростанций не обеспечивает требуемые характеристики по маневренности.

Деформация графика нагрузки в энергосистемах при массовом внедрении СЭС и объектов солнечной микрогенерации.

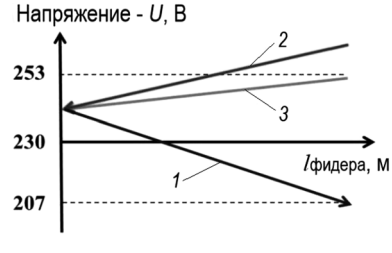
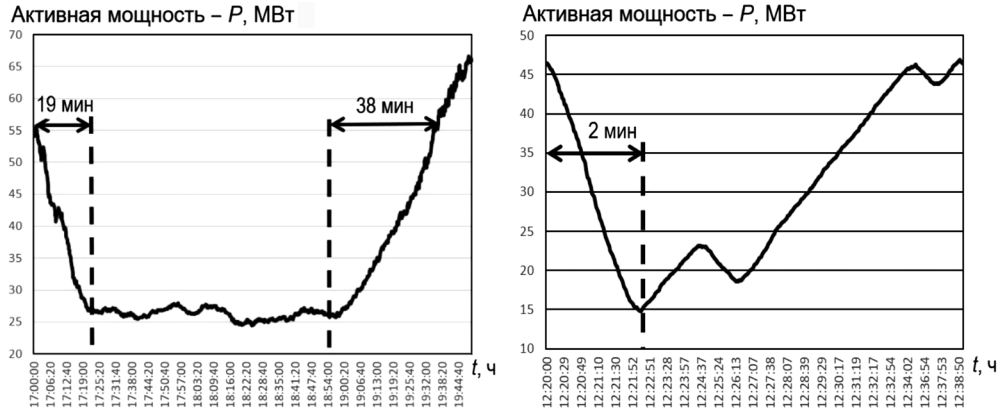


Рис. 2. Графики напряжений в сетях напряжением 0,4 кВ



а *б*

Рис. 3. Графики выработки активной мощности: *а* – ВЭС; *б* – СЭС

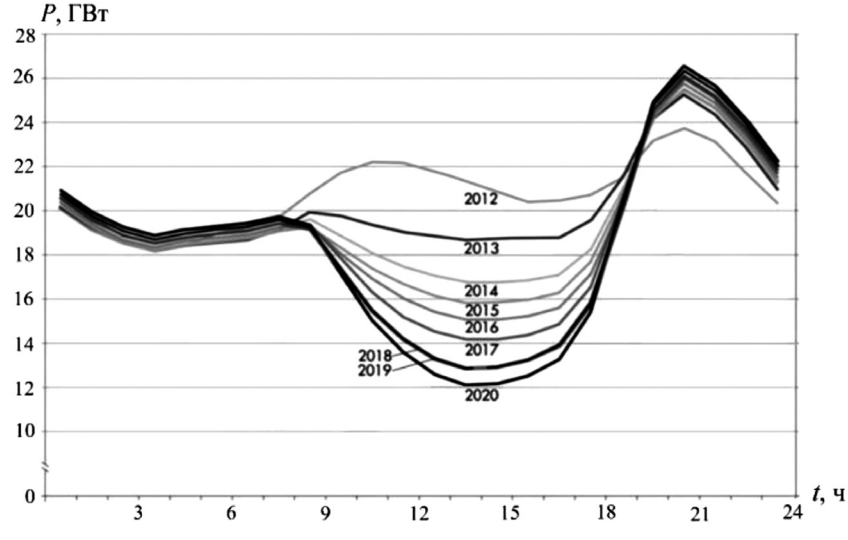


Рис. 4. График электропотребления энергосистемы

В различных регионах мира, где массово сооружаются СЭС, в том числе в сегменте микрогенерации (частных домохозяйствах), график нагрузки энергосистемы существенно изменяется, приобретая форму «утиного клюва», величина которого увеличивается при росте суммарной мощности СЭС (рис. 4).

Анализ рис. 4 показывает, что скорость разгрузки энергосистемы (7 ГВт за 4 часа) в утренние часы и набора мощности в вечерние часы (13 ГВт за 3 часа) можно в определенных пределах регулировать за счет применения систем накопления электроэнергии (СНЭЭ), но это является дорогим решением.

Развитие распределенной генерации промышленными предприятиями с непрерывным технологическим процессом содействует увеличению «утиного

клюва». Это связано с тем, что равномерная часть суточного графика нагрузки уходит из энергосистемы и покрывается распределенной генерацией.

В этих условиях необходима реализация первоочередных шагов, позволяющих обеспечить корректную интеграцию электростанций на основе ВИЭ в энергосистемы, не допуская повреждений электросетевого оборудования и аварий с массовым нарушением электроснабжения потребителей.

Перечень первоочередных шагов:

согласовать места размещения площадок для строительства ВЭС (СЭС) производить с учетом реальных возможностей распределительных сетей по их технологическому присоединению, а также подтвержденных финансированием инвестиционных программ по новому строительству или реконструкции действующих электросетевых объектов на пятилетний период;

определить предельно-допустимую величину суммарной мощности и максимальной единичной мощности ВЭС (СЭС) для каждой энергосистемы с учетом ограничений на перетоки мощности по сечению, маневренных характеристик генерирующих установок традиционных электростанций, технических характеристик СНЭЭ и объемов управляемого спроса;

расширить обязательные технические требования к генерирующему оборудованию ВЭС (СЭС) с учетом технологий преобразования первичного энергоресурса и величины установленной мощности, в том числе утвердить вольт-секундную характеристику функции LVRT для инверторов;

разработать методические указания по выбору алгоритмов работы и параметров настройки инверторов на ВЭС (СЭС), включая выбор скорости изменения мощности при изменении ветрового напора/солнечной радиации;

осуществлять строительство ВЭС (СЭС) мощностью более 10–15 МВт совместно с СНЭЭ для активного участия в управлении нормальными и послеаварийными режимами энергосистем. Выбор мощности и энергоемкости СНЭЭ следует производить на основании результатов расчетов электрических режимов для конкретного узла присоединения ВЭС (СЭС);

применять алгоритмы абсолютного и относительного ограничения мощности в инверторах ВЭС и СЭС (скорректировать процедуру подтверждения величины коэффициента использования установленной мощности; разработать механизм компенсации за недоотпуск электроэнергии потребителям);

внедрять системы оперативного и краткосрочного прогнозирования выработки электроэнергии на ВЭС (СЭС) мощностью более 10–15 МВт;

обеспечить внедрение систем дистанционного управления режимами ВЭС (СЭС) мощностью более 10–15 МВт из диспетчерских центров с возможностью последующей интеграции в САУ распределительных сетей;

определить целевой объем мощности электроприемников потребителей для участия в управлении спросом на электроэнергию для каждой энергосистемы, а также стимулировать розничных потребителей к активному взаимодействию с агрегаторами управления спросом;

разработать САУ режимами распределительных сетей среднего напряжения и реализовать пилотный проект с перспективой ее применения в сетях высокого напряжения (110–220 кВ);

разработать типовые технические решения для интеграции микрогенерации в распределительные сети напряжением 0,4 кВ с использованием устройств plug-and-play (сетевых инверторов);

разработать и ввести в действие рыночные механизмы оплаты услуг СНЭЭ, установленных у потребителей с мощностью технологического присоединения более 670 кВт, оказываемых субъектам электроэнергетики (системному оператору, электросетевым и генерирующим компаниям);

реализовывать шаги по созданию объектов распределенной энергетики – РЭ (преобразование отопительных котельных в мини-ТЭЦ на базе когенерационных установок), интегрируемых в распределительные сети среднего напряжения. Эффективна интеграция электростанций на основе ВИЭ мощностью 1–10 МВт в объекты РЭ, в том числе совместно с СНЭЭ;

использовать объекты РЭ в управлении режимами распределительных сетей, учитывая их возможности по повышению надежности электроснабжения и качества электроэнергии (нормализация уровней напряжения; симметрирование нагрузки; фильтро-компенсирующее устройство и др.).

Реализация перспективных шагов позволит содействовать увеличению доли электростанций на основе ВИЭ в структуре генерирующих мощностей, при обеспечении необходимых условий для управления режимами энергосистем.

Перечень перспективных шагов:

планировать размещение ВЭС (СЭС) в программе территориального развития регионов с учетом требования по их физическому рассредоточению для минимизации отклонения величины планируемой мощности при изменениях погодных условий на рассматриваемой территории [9];

разработать и реализовывать программу восстановления (сооружения новых) малых ГЭС различных типов для их привлечения к компенсации стохастического характера выработки электроэнергии ВЭС (СЭС) [10];

разработать методические указания по проектированию новых и реконструкции существующих распределительных сетей для обеспечения технологического присоединения ВЭС (СЭС), без ухудшения показателей надежности электроснабжения потребителей и качества электроэнергии;

осуществлять первоочередную реконструкцию электросетевых объектов в перспективных местах размещения ВЭС (СЭС) с изменением принципов построения и алгоритмов работы устройств РЗА [11];

планировать реконструкцию тепловых электростанций с применением пиковых высокоманевренных газотурбинных установок для их участия в нормированном первичном регулировании частоты. Следует реализовать пилотный проект строительства СНЭЭ мощностью 50–100 МВт, участвующей в НПРЧ для отработки алгоритмов управления и рыночных механизмов;

внести изменения в методики планирования текущих и перспективных электроэнергетических режимов для учета ВЭС (СЭС) в балансах мощности с учетом наличия СНЭЭ, а также их физического рассредоточения по территории;

реализовать пилотные проекты внедрения СНЭЭ у бытовых потребителей (например, 2 кВт – 2 кВт·ч) в регионах с высокой долей ВЭС (СЭС), разработав алгоритмы управления ими;

разработать технические решения по участию электромобилей в управлении режимами распределительных сетей для различных вариантов использования: электрозаправочные станции, стоянки бизнес-центров и электробусов, многоярусные паркинги личных электромобилей и др.;

реализовать проекты территориальных гибридных энергетических комплексов с комбинацией различной энергоресурсов (солнце-ветро-топливно-атомно-водородных) в пределах энергосистемы с управлением от единой САУ.

Заключение. Положительный синергетический эффект в решении проблемных вопросов интеграции и функционирования электростанций на основе ВИЭ в составе энергосистем можно получить только при поэтапной реализации первоочередных и перспективных шагов, рассмотренных в статье.

В процессе эксплуатации важно не допускать излишних отключений ВЭС (СЭС), ухудшения показателей надежности электроснабжения потребителей и качества электроэнергии, а также привлекать ВЭС (СЭС) к управлению нормальными и послеаварийными режимами энергосистем.

Необходимо выполнить работы по детальной проработке и технико-экономическому обоснованию реализации первоочередных и перспективных шагов с оценкой тарифно-балансовых последствий для потребителей.

Апробацию перечня шагов необходимо провести на выбранной энергосистеме в процессе реализации пилотного проекта, после чего принимать соответствующие решения по тиражированию полученного опыта.

Для осуществления перечисленных шагов потребуется внесение изменений в целый ряд нормативно-правовых актов и нормативно-технических документов.

Необходима корректировка и согласование инвестиционных программ субъектов электроэнергетики для возможности реализации пилотного проекта, в том числе мероприятий из перечня первоочередных и перспективных шагов.

Список использованных источников

1. Воропай, Н. И. Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем / Н. И. Воропай // Электричество. – 2020. – № 7. – С. 12–21.

2. Безруких, П. П. Прогноз развития возобновляемой энергетики мира на период до 2030 года / В. А. Бутузов // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2018. – № 9 (201). – С. 92–94.

3. Бутузов, В. А. Российская возобновляемая энергетика / В. А. Бутузов, П. П. Безруких, В. В. Елистратов // Энергия единой сети. – 2021. – № 3 (58). – С. 70–77.

4. Методы интеллектуального управления распределенными энергоресурсами на базе цифровой платформы / П. В. Илюшин [и др.] // Библиотечка электротехника. – 2021. – № 8. – 116 с.

5. Анализ общих технических требований к распределенным источникам энергии при их интеграции в энергосистему / Ю. Н. Кучеров [и др.] // Электрические станции. – 2016. – № 3. – С. 2–10.

6. Илюшин, П. В. Анализ показателей надежности современных объектов распределенной генерации / П. В. Илюшин, В. О. Самойленко // Промышленная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 8–16.

7. Симонов, А. В. О предотвращении отключений ветроэнергетических установок при нормативных возмущениях в прилегающей сети / А. В. Симонов, П. В. Илюшин // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 3 (44). – С. 70–75.

8. Ивановский, Д. А. Оценка эффективности интеграции объектов микрогенерации на основе фотоэлектрических модулей в сети домохозяйств / Д. А. Ивановский // Энергоэксперт. – 2020. – № 1 (73). – С. 72–75.

9. Анализ условий функционирования будущей электроэнергетической системы при рассматриваемом сценарии ее развития / Н. И. Воропай [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2020. – № 6 (63). – С. 34–38.

10. Бляшко, Я. И. Типовые решения для оборудования малых ГЭС / Я. И. Бляшко // Гидротехника. – 2019. – № 2 (55). – С. 55–59.

11. Шарыгин, М. В. Обеспечение селективности релейной защиты в системах электроснабжения на основе байесовского метода проверки гипотез / М. В. Шарыгин, А. Л. Куликов // Электричество. – 2017. – № 9. – С. 24–33.

References

1. Voropaj, N. I. Napravleniya i problemy transformacii elektroenergeticheskih sistem / N. I. Voropaj // Elektrichestvo. – 2020. – № 7. – S. 12–21.

2. Bezrukih, P. P. Prognoz razvitiya vozobnovlyaemoj energetiki mira na period do 2030 goda / V. A. Butuzov // Santekhnika, Otoplenie, Kondicionirovanie. – 2018. – № 9 (201). – S. 92–94.

3. Butuzov, V. A. Rossijskaya vozobnovlyaemaya energetika / V. A. Butuzov, P. P. Bezrukih, V. V. Elistratov // Energiya edinoj seti. – 2021. – № 3 (58). – S. 70–77.

4. Metody intellektual'nogo upravleniya raspredelennymi energoresursami na baze cifrovoj platformy / P. V. Ilyushin [et al.] // Bibliotechka elektrotekhnika. – 2021. – № 8. – 116 s.

5. Analiz obshchih tekhnicheskih trebovanij k raspredelyonnym istochnikam energii pri ih integracii v energosistemu / Yu. N. Kucherov [et al.] // Elektricheskie stancii. – 2016. – № 3. – S. 2–10.

6. Ilyushin, P. V. Analiz pokazatelej nadezhnosti sovremennyh ob"ektov raspredelennoj generacii / P. V. Ilyushin, V. O. Samojlenko // Promyshlennaya energetika. – 2019. – № 1. – S. 8–16.

7. Simonov, A. V. O predotvrashchenii otklyuchenij vetroenergeticheskih ustanovok pri normativnyh vozmushcheniyah v prilegayushchej seti / A. V. Simonov, P. V. Ilyushin // Relejnaya zashchita i avtomatizaciya. – 2021. – № 3 (44). – S. 70–75.

8. Ivanovskij, D. A. Ocenka effektivnosti integracii ob"ektov mikrogeneracii na osnove fotoelektricheskih modulej v seti domohozyajstv / D. A. Ivanovskij // Energoekspert. – 2020. – № 1 (73). – S. 72–75.

9. Analiz uslovij funkcionirovaniya budushchej elektroenergeticheskoj sistemy pri rassmatrivaemom scenarii ee razvitiya / N. I. Voropaj [et al.] // Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie. – 2020. – № 6 (63). – S. 34–38.

10. Blyashko, Ya. I. Tipovye resheniya dlya oborudovaniya malyh GES / Ya. I. Blyashko // Gidrotekhnika. – 2019. – № 2 (55). – S. 55–59.

11. Sharygin, M. V. Obespechenie selektivnosti relejnoj zashchity v sistemah elektrosnabzheniya na osnove bajesovskogo metoda proverki gipotez / M. V. Sharygin, A. L. Kulikov // Elektrichestvo. – 2017. – № 9. – S. 24–33.

УДК 661.971

Р. Ф. Камалиева[1], А. А. Филимонова[2]

УЛАВЛИВАНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВОДОРОДА И РАБОТЕ ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

[1]Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация
[2]Кандидат медицинский наук, доцент, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Аннотация. В работе изучены методы улавливания углекислого газа при производстве водорода, а также во время электрохимической реакции в топливном элементе, в частности высокотемпературном. В ходе анализа предложены наиболее эффективные способы улавливания.

Ключевые слова: углекислый газ, улавливание, методы, топливный элемент, водород, электроэнергия.

R. F. Kamalieva[1], A. A. Filimonova[2]

CARBON DIOXIDE CAPTURE DURING PRODUCTION HYDROGEN AND FUEL CELL OPERATION

[1]Kazan State Power Engineering University Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation
[2] Ph. D. of Medical Sciences, Associate Professor, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Annotation. Methods of carbon dioxide capture during hydrogen production, as well as during an electrochemical reaction in a fuel cell, in particular a high-temperature one, are studied in this work. In the course of the analysis, the most effective methods of trapping are proposed.

Keywords: carbon dioxide, capture, methods, fuel cell, hydrogen, electric power.

Введение. Парниковые газы, образующиеся в результате работы энергоустановок и попадающие в атмосферу, являются причиной изменения климата. Наиболее эффективные подходы к ограничению таких выбросов – принятие и внедрение современных технологий улавливания углекислого газа и использование топливных элементов. Таким образом, выбросы углекислого газа в атмосферу сокращаются на 90 %.

Целью данного исследования являются изучение, сравнение и анализ методов улавливания углекислого газа, а также технологий его утилизации. Работа топливных элементов основана на использовании водорода, поэтому в задачи исследования входил анализ классификации водорода по технологиям получения, выявление наиболее экологически и экономически выгодных способов его производства, а также изучение и сравнение методов улавливания углерода, образующегося в результате работы энергоустановок.

Улавливание углекислого газа при производстве водорода. Важнейшая характеристика в энергетических процессах – «углеродный след» – суммарный объем всех парниковых газов (в основном углекислый газ, веселящий газ,

метан, водяной пар), образующихся в результате техногенной деятельности и попадающих в атмосферу. В соответствии с этим показателем в Европе планируется введение таможенного сбора с импортных товаров. В первую очередь нововведение коснется электроэнергии. Данные обстоятельства привели к исследованиям экологически эффективных источников энергии. На сегодняшний день за водородными топливными элементами признается лидирующая роль в декарбонизации экономики и повышении энергетической эффективности производства [3].

Водород, получаемый для работы топливных элементов, классифицируют по степени экологичности. Степень экологичности зависит от количества и концентрации образования оксидов углерода при производстве водорода. Каждый способ производства обозначается цветом: зеленый, желтый, бирюзовый, серый, голубой и бурый [6].

«Зеленый» водород (возобновляемый или чистый водород) производится самой чистой технологией – электролизом. Источником энергии выступают возобновляемые источники энергии, поэтому выбросы углекислого газа отсутствуют [6].

«Желтый» водород также получают путем электролиза, однако в этом случае источник энергии – атомные электрические станции. Однако сторонники «зеленой» энергетики не признают атомные станции экологически безопасными [6].

«Голубой» и «серый» водород производят в основном паровым риформингом метана. Однако, несмотря на сходство процесса получения, главным отличием производства «голубого» водорода является улавливание и хранение полученного углерода, что сокращает выбросы примерно в два раза [6].

Технологический процесс такого вида риформинга включает в себя два реагента: метан и чистая вода. Поток метана сжимается, а поток воды нагнетают до необходимого давления. Перед входом в риформер оба потока нагревают в теплообменнике. Сам риформер представляет собой автономный агрегат с внешним давлением. Такая конструкция более экономически выгодна по сравнению с другими. Смешивание потоков представляет собой адиабатический процесс с постоянным давлением. Синтез-газ должен выходить при рабочей температуре и давлении риформинга. Тепло, удаляемое из синтез-газа, используется для нагрева перекачиваемой воды [2]. Схема парового риформинга метана представлена на рис. 1.

«Серый» водород получают также газификацией и пиролизом угля и метана. Следует отметить, что при протекании химической реакции выделяется углекислота в тех же объемах, что и при сгорании природного газа. По массе оксид углерода превышает полученный водород примерно в 10 раз. За счет своей низкой себестоимости данный процесс широко распространен в промышленности [7].

Исходным сырьем для производства «бурого» водорода выступает бурый уголь. Вследствие газификации бурого угля образуется синтез-газ. Он включает

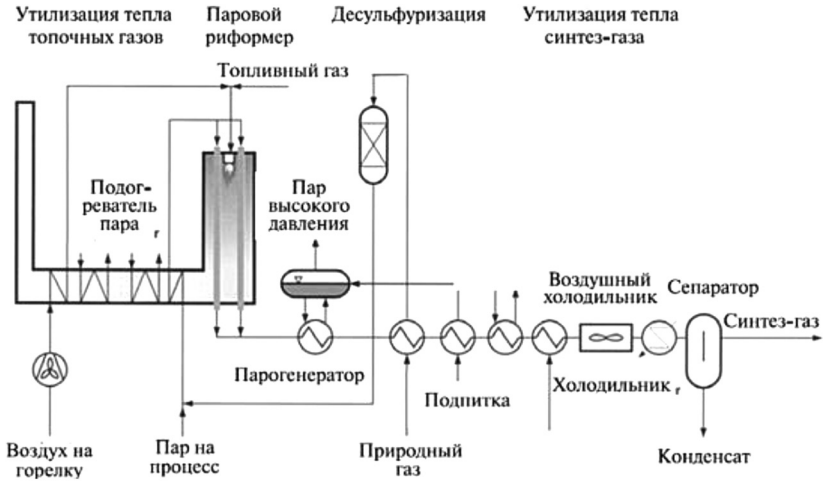


Рис. 1. Схема парового риформинга метана

в себя смесь углекислого газа, угарного газа, метана, водорода и незначительное количество других газов. Следовательно, «серый» и «бурый» водород нельзя отнести к методам, способствующим декарбонизации промышленности [5]. Данные по способам получения водорода, его чистоте и себестоимости представлены в таблице.

Сравнительная характеристика способов получения водорода

Цвет	Источник энергии	Чистота водорода, %	Себестоимость процесса, долл. США
Зеленый	ВИЭ	99,98	9–10
Желтый	АЭС	99,98	7–10
Голубой	Природный газ, уголь	95–98,5	2–5
Серый	Природный газ, уголь, метан	95–98,5	2–2,5
Бурый	Бурый уголь	90	2

Сегодня в мире всего 2 % от общего объема водорода составляет производство «зеленого» водорода. По прогнозу Минэнерго, к 2050 г. экспорт экологически чистого водорода из России достигнет 100 млрд долл. США в год, а по данным BloombergNEF, к этому времени 24 % мировых потребностей в энергии будет обеспечивать «зеленый» водород.

Использование «серого» и «бурого» водорода не выгодно, так как источником энергии в производстве выступают углеводороды, что не соответствует мировым экологическим тенденциям и может привести к санкциям и потерям перспективных рынков сбыта. А производство чистого «зеленого» водорода из-за слаборазвитых возобновляемых источников энергии не рассматривается как перспективное. Однако можно производить «серый» водород совместно с технологиями по улавливанию и хранению углекислого газа. В конечном итоге образуется «голубой» водород, который является более экологичным,

а так как Россия до сих пор возглавляет рейтинг стран по запасам природного газа (19,8 % мировых запасов на 2020 г.), то она может стать лидером на мировых рынках по его производству [5].

Технология улавливания углекислого газа подразумевает создание концентрированного потока углекислого газа высокого давления, который без затруднений можно экспортировать на место его хранения. Это значительно снизит расходы на энергию [14].

Материалы и методы исследования. Основными методами улавливания углекислого газа, выделяющегося при производстве водорода, являются:

абсорбция;

адсорбция;

мембранное разделение;

криогенное сепарирование.

Абсорбция является непрерывным и циклическим процессом. Стадия поглощения сопровождается регенерацией поглотительного раствора и возвращением его в начало цикла очистки. Выделяют два вида абсорбции – хемосорбцию (избирательное извлечение примесей химическими реакциями) и физическую абсорбцию (избирательное растворение газообразных и/или парообразных примесей). В физической абсорбции регенерация абсорбента характеризуется нагреванием и снижением давления, что приводит к десорбции поглощенной газовой примеси. При хемосорбции образовавшиеся химические соединения разлагаются с регенерацией активных компонентов поглотительного раствора и десорбцией поглощенной примеси.

Поглощение углекислого газа из отходящей газовой смеси раствором моноэтаноламина с регенерацией поглотителя при десорбции диоксида углерода является безотходным абсорбционно-десорбционным циклом, так как CO_2 в процессе сжижается и подается в чистом виде потребителю. На сегодняшний день это наиболее популярный способ улавливания.

Абсорбционные методы универсальные, экономичные и позволяют непрерывно извлекать большое количество примесей из газовой смеси. Однако технология мокрой очистки является достаточно трудоемкой вследствие своей многоступенчатости, а установка слишком массивная.

Мембранная технология представляется очевидной энергоэффективной альтернативой для получения сверхчистого водорода, необходимого для топливных элементов. Однако мембранная технология очистки водорода все еще не достигла высокого уровня, необходимого для ее повсеместного промышленного применения. Особое внимание уделяют основным типам мембран:

мембраны с молекулярным ситом углерода;

ионообменные мембраны;

электрохимические мембраны для перекачки водорода;

неорганические мембраны на основе палладиевых сплавов.

Последний метод основан на технологии разделения газовой смеси при помощи криогенных температур на основные газовые компоненты.

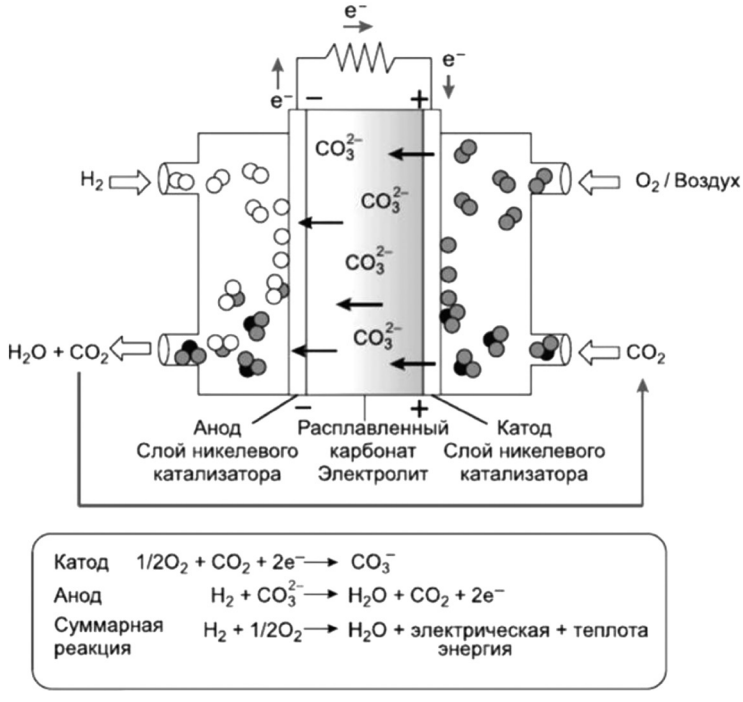


Рис. 2. Схема работы топливного элемента на основе расплавленного карбоната

Для улавливания в промышленных масштабах наиболее эффективно использование мембранной технологии, а именно углеродных мембран молекулярного сита. Они обладают превосходной термической и химической стабильностью, высокой проницаемостью и селективностью. Кроме этого, такие мембраны устойчивы к суровым условиям окружающей среды и способны выдерживать высокое давление и температуру. Главные преимущества мембран с молекулярным ситом углерода – высокая эффективность, простота эксплуатации и низкие капитальные и эксплуатационные затраты.

Улавливание углекислого газа при работе высокотемпературных топливных элементов. Топливный элемент состоит из анода и катода, которые разделены электролитом, служащим для проведения электрического заряда. Работа топливных элементов из расплавленного карбоната основана на пропускании через катод топливного газа. Процесс работы показан на рис. 2. Они работают в диапазоне 600–700 °С [3]. Такие высокие температуры позволяют повысить проводимость карбонатного электролита и исключить использование благородных металлов в качестве катализаторов для электрохимических процессов.

Результаты исследования и их обсуждение. Применение топливных элементов на основе расплавленного карбоната для улавливания углекислого газа представляет собой одну из самых интересных технологий. Фактически, электрохимические реакции, протекающие внутри топливного элемента, включают миграцию углекислоты от катода к аноду. В ходе этого процесса такой топ-

ливный элемент может работать одновременно как генератор энергии, так и сепаратор углекислого газа из выхлопного газового потока, образующегося в процессе сгорания и направленного на катод. Это открывает путь к широкому применению топливных элементов для удаления углекислого газ и преобразования энергии в теплоэлектростанциях. Фактически, топливные элементы на основе карбонатов могут питаться выхлопными газами газотурбинной электростанции или интегрироваться в парогазовую электростанцию комбинированного цикла [3]. Так как при переносе углекислого газа топливный элемент производит дополнительную энергию, не содержащую CO_2, то общий энергетический баланс для отделения CO_2 становится положительным, а удельные выбросы могут быть снижены.

Основной недостаток технологии применения расплавленных карбонатов – незначительный срок эксплуатации. Работа при высоких температурах и использование коррозионного электролита ускоряют разрушение компонентов и коррозию, сокращая срок службы элементов. Также топливные элементы на основе карбонатов генерирует поток, содержащий значительную долю неокисленного угарного газа и водорода. Однако сжигание угарного газа и водорода в присутствии кислорода и рекуперация тепла для выработки пара идет на пользу электростанции [1].

Таким образом, внедрение топливных элементов на основе расплавленных карбонатов на энергоустановки, которые используют в качестве исходного топлива природный газ или уголь, уменьшат количество выхлопов и увелича выходную мощность самой установки.

На сегодняшний день большое внимание уделяется высокотемпературным твердооксидным топливным элементам. Процесс их работы представлен на рис. 3. Они отличаются самой высокой рабочей температурой, которая варьируется в диапазоне от 800 до 1000 °С [9], что позволяет использовать в работе различные виды топлива без специальной предварительной обработки. Высокие рабочие температуры обосновываются применением стабилизированного оксидом иттрия диоксида циркония в роли кислородопроводящего электролита, приобретающего значительную проводимость при температурах выше 800 °С. Анод и катод изготавливаются из никель-кермета и манганита стронция лантана соответственно [9]. Эти материалы характеризуются согласованным коэффициентом термического расширения и химической устойчивостью при рабочих температурах данного топливного элемента.

Среди особенностей твердооксидных топливных элементов следует выделить отсутствие жидкой фазы и благородных металлов. А среди достоинств важное значение имеет относительно высокий КПД по электрической энергии даже для установок с малыми мощностями. Так, например, для твердооксидного топливного элемента с мощность 1 МВт КПД составляет 60 %, а для мощности в 10 МВт – 70 %.

В сравнении с другими типами топливных элементов высокотемпературные твердооксидные топливные элементы менее требовательны по отношению

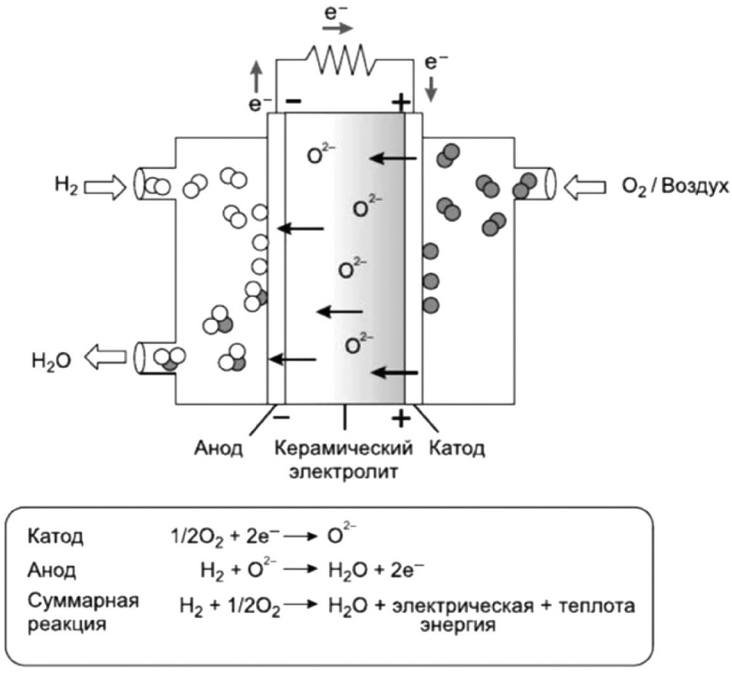


Рис. 3. Схема работы твердооксидного топливного элемента

к топливу тем не менее применение природного газа разрушает никель-керамический электрод [9].

Продукт выброса при работе топливных элементов – водяной пар при условии использования абсолютно чистого водорода, однако стоит учесть, что в качестве рабочего тела используют не только чистый водород, но и водород с примесями, и даже природный газ или уголь, следовательно, возможно выделение большого количества углекислого газа, который необходимо улавливать.

Рассмотрим методы и способы улавливания углекислого газа, которые могут быть использованы при работе топливного элемента.

Первый способ улавливания углекислого газа основан на поташной очистке с применением аминов. Поташная очистка состоит из двух основных стадий:

сорбция углекислого газа поташным раствором;

десорбция CO_2, поглощенного абсорбентом [13].

Среди абсорбентов выделяют водные карбонатные растворы, активированные добавками алканоламинов (моноэтаноламин, диэтаноламин, триэтаноламин, метилдиэтаноламин) и (или) полиаминов (пиперазин). Вещества аминовой и алканоламиновой природы применяются в качестве агентов для улучшения процессов поташной очистки газового потока.

Данный способ включает стадии, на которых:

предоставляют газовый поток, содержащий углекислый газ;

предоставляют поток абсорбента, содержащего, по меньшей мере, одну соль (карбонаты и гидрокарбонаты калия, лития и натрия, а также их смеси), по мень-

шей мере, один щелочной металл или гидроксид, по меньшей мере, один щелочной металл и, по меньшей мере, один полиамин;

приводят в контакт указанные газовый поток и поток абсорбента в условиях, достаточных для обеспечения абсорбции углекислого газа, содержащегося в указанном газовом потоке, указанным абсорбентом;

разделяют очищенный газовый поток и поток абсорбента, насыщенного углекислым газом;

осуществляют регенерацию абсорбента посредством десорбции углекислого газа;

рециркулируют поток регенерированного абсорбента на стадию 2, отличающийся тем, что поток абсорбента, используемый на стадии 2, дополнительно содержит, по меньшей мере, один алканоламин, причем полиамин, содержащийся в абсорбенте, имеет температуру кипения не менее чем на 100 °С ниже, чем температура кипения используемого алканоламина, и при этомабсорбент периодически подпитывают указанным полиамином [13].

Второй способ включает в себя мокрую очистку загрязненного воздуха или отходящих газов от примесей. Среди основных стадий выделяют:

подачу потока загрязненного воздуха (газа) и жидкого сорбента в осевом направлении на проницаемую торцевую поверхность вращающегося пористого;

в пористом теле диска происходит перемешивание и физико-химическое взаимодействие загрязненного воздуха (газа) с сорбентом;

в пространстве между диском и корпусом воздухоочистителя происходит дополнительное поглощение газов мелкораспыленным сорбентом с выбранными селективными характеристиками;

раздельный вывод очищенного воздуха и жидких отходов очистки [11].

На сегодняшний день эффективно использование адсорбентов. С их помощью можно улавливать как большие, так и совсем малые концентрации углекислого газа. Также среди преимуществ данного метода можно выделить использование дешевых абсорбентов, таких как активированный уголь, что приводит к экономичному удалению CO_2. Наиболее эффективно применение адсорбентов на основе мезопористой металлорганической каркасной структуры, предварительно обработанной водным раствором соли цинка и подвергнутой нагреванию в атмосфере инертного газа до формирования модифицирующей добавки в виде оксида цинка при его содержании 1–1,5 г на 1 г металлорганической каркасной структуры [12].

Для дальнейшей качественной утилизации углекислого газа следует применять мембранные методы его улавливания. Эффективно использование мембран из палладиевых сплавов, что в промышленных масштабах представляет собой достаточно дорогостоящий процесс. Необходимо также отметить, что рабочие температуры неорганических мембран из палладиевых сплавов могут достигать 800 °С, что будет актуально при применении высокотемпературных топливных элементов. Что касается полимерных мембран, то при их достаточно высокой производительности недостатком являются относительно низкие температуры (менее 150 °С). Таким образом, следует отдать предпочтение мем-

бранам с молекулярным ситом углерода, так как они отвечают всем необходимым требованиям: устойчивость к высоким температурам и давлению, достаточно высокая проницаемость и селективность, термическая стабильность, простота эксплуатации и низкие экономические затраты.

Собранный углекислый газ необходимо правильно хранить и утилизировать. Герметичные нефтяные резервуары пригодны для хранения CO_2, который растворяется в нефти, снижая ее эффективную вязкость и увеличивая подвижность. Перемещение CO_2 оттесняет к эксплуатационным скважинам остаточную нефть, что увеличивает коэффициент нефтеотдачи пласта [10].

Утилизированный углекислый газ применяется в холодильных установках в качестве рабочего тела [8]. Также CO_2 может быть использован в качестве сырья для устойчивого производства химических веществ или топлива, применяя электрохимические, биохимические и фотохимические методы, а также полимеризацию и процесс минерализации. Распространенные продукты, полученные из оксидов углерода, – муравьиная кислот, метанол, циклические карбонаты, салициловая кислота, силикатные руды [4].

Заключение. На основании обзора литературы и анализа современного состояния вопроса декарбонизации промышленности и энергетики можно обозначить несомненную актуальность исследований и разработок технологий улавливания и утилизации углекислого газа. В связи с запланированным на ближайшую перспективу переходом стран Евросоюза на безуглеродные технологии, для России, как основного поставщика газа и в будущем водородного топлива, решение вопроса внедрения «зеленых» технологий, минимализирующих выбросы парниковых газов, становится одним из первоочередных. Если говорить о способах производства водорода как основного топлива, на которое в ближайшие 5–10 лет делают ставки мировые экономики мира, то приоритет должен отдаваться «зеленому» и «голубому» водороду как наиболее экологически чистым видам топлива с минимальным «углеродным следом». Для его производства в промышленных масштабах следует использовать технологии улавливания углекислого газа, среди которых наиболее эффективны углеродные мембраны молекулярного сита.

На текущий момент топливные элементы – самый экологичный способ производства электроэнергии, но, чтобы сделать его еще более экологически чистым и высокоэффективным, необходимо предложить технологии улавливания углекислого газа. Наиболее предпочтительны технологии мембранного разделения, в частности эффективно использование мембран из палладиевых сплавов. Однако для снижения затрат в промышленных масштабах экономнее использовать мембраны с молекулярным ситом углерода. Но наиболее эффективно будет комплексное применение адсорбционных методов и мембранной технологии.

Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки и Минцифры России в рамках исполнения условий соглашений № 075-15-2021-1087 и № 075–15–2021–1178 от 30.09.2021 в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет – 2030».

Список использованных источников

1. Goura, P. Application of Fuel Cell in Power Plant to Reduce the Carbon-dioxide Emission / P. Goura, R. Nikose // International Journal Of Core Engineering & Management (IJCEM). – 2014. – Vol. 1, iss. 5. – P. 76–80.

2. Exergoenvironmental analysis of a steam methane reforming process for hydrogen production / A. Boyano [et al.] // Energy. – 2011. – № 36. – P. 2202–2214.

3. Carapellucci, R. Modeling and characterization of molten carbonate fuel cell for electricity generation and carbon dioxide capture / R. Carapellucci, R. Cipollone, D. Di Battista // 72nd Conf. of the Italian Thermal Machines Engineering Association, Lecce (Italy), 6–8 sept. 2017 / Energy Procedia. – Lecce, 2017. – Vol. 126 (201709) – P. 477–484.

4. Recent advances in carbon dioxide utilization / Zh. Zhang [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Vol. 125 (109799). – 62 p.

5. Адсорбция водорода и ксенона нанопористыми материалами из бурого угля [Электронный ресурс] / Т. Г. Шендрик [и др.] // Ин-т физико-орган. химии и углехимии им. Л. М. Литвиненко НАН Украины. – Режим доступа : http://ichms09.ichms.org/book/down/638-639.pdf. С. 638–639. – Дата доступа : 18.03.2022.

6. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики / В. С. Литвиненко [и др.] // Записки горного института. – 2020. – Т. 244. – С. 428–438. DOI: 10.31897/ PMI.2020.4.5.

7. Митрова, Т. Водородная экономика – путь к низкоуглеродному развитию / Т. Митрова, Ю. Мельников, Д. Чугунов. – М. : ЦЭМШУ СКОЛКОВО, 2019. – 62 с.

8. Возможные пути снижения выбросов углекислого газа / А. М. Гафуров [и др.] // Проблемы энергетики. – 2018. – Вып. 4. – С. 22–34.

9. Собянин, В. А. Высокотемпературные твердооксидные топливные элементы и конверсия метана / В. А. Собянин // Рос. хим. журнал. – 2003. – № 6. – С. 62–70.

10. Захоронение промышленных выбросов углекислого газа в геологические структуры / С. А. Переверзева [и др.] // Вестн. Санкт-Петербург. ун-та. – 2014. – Вып. 1. – С. 10–17.

11. Способ мокрой очистки воздуха : пат. 2343960 Российская Федерация, МПК B 01 D 45/14 / В. К. Баев [и др.] ; заявитель и патентообладатель Публ. акционер. о-во «СИБУР Холдинг» – № 2014153837/05. – Опубл. 10.07.16.

12. Адсорбент для улавливания, концентрирования и хранения диоксида углерода : пат. 2567634 Российская Федерация, МПК B 01 J 20/06 / Л. М. Кустов [и др.] ; заявитель и патентообладатель ИОХ РАН. – №2014150409/05. – Опубл. 10.03.16.

13. Способ очистки газовых потоков от диоксида углерода : пат. 2589166 Рос. Федерация, МПК B 01 D 53/00 / П. С. Лемпорт [и др.] ; заявитель и патентообладатель Публ. акционер. о-во «СИБУР Холдинг». – №2014153837/05. – Опубл. 10.07.16.

14. Улавливание и хранение двуокиси углерода : спец. доклад МГЭИК / Б. Метц [и др.] // Межправительственная группа экспертов по изменению климата. –2005. – С. 24.

References

1. Goura , R. Application of Fuel Cell in Power Plant to Reduce the Carbon-dioxide Emission / P. Goura, R. Nikose // International Journal Of Core Engineering & Management (IJCEM). – 2014. – Vol. 1, iss. 5. – P. 76–80.

2. Exergoenvironmental analysis of a steam methane reforming process for hydrogen production / A. Boyano [et al.] // Energy. – 2011. – № 36. – P. 2202–2214.

3. Carapellucci, R. Modeling and characterization of molten carbonate fuel cell for electricity generation and carbon dioxide capture / R. Carapellucci, R. Cipollone, D. Di Battista // 72nd Conf. of the Italian Thermal Machines Engineering Association, Lecce (Italy), 6–8 sept. 2017 / Energy Procedia. – Lecce, 2017. – Vol. 126 (201709). – P. 477–484.

4. Recent advances in carbon dioxide utilization / Zh. Zhang [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Rev. – 2020. – Vol. 125 (109799). – 62 p.

5. Adsorbciya vodoroda i ksenona nanoporistymi materialami iz burogo uglya [Electronic resource] / T. G. SHendrik [et al.] // In-t fiziko-organ. himii i uglekhimii im. L. M. Litvinenko NAN Ukrainy. – Mode of access : http://ichms09.ichms.org/book/down/638-639.pdf. – C. 638–639. – Date of access : 18.03.2022.

6. Bar'ery realizacii vodorodnyh iniciativ v kontekste ustojchivogo razvitiya global'noj energetiki / V. S. Litvinenko [et al.] // Zapiski gornogo instituta. – 2020. – T. 244. – S. 428–438. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.5.

7. Mitrova, T. Vodorodnaya ekonomika – put' k nizkouglerodnomu razvitiyu / T. Mitrova, Yu. Mel'nikov, D. Chugunov. – M. : CEMSHU SKOLKOVO, 2019. – 62 s.

8. Vozmozhnye puti snizheniya vybrosov uglekislogo gaza / A. M. Gafurov [et al.] // Problemy energetiki. – 2018. – Iss. 4. – S. 22–34.

9. Sobyanin, V. A. Vysokotemperaturnye tverdooksidnye toplivnye elementy i konversiya metana / V. A. Sobyanin // Ros. him. zhurnal. – 2003. – № 6. – S. 62–70.

10. Zahoronenie promyshlennyh vybrosov uglekislogo gaza v geologicheskie struktury / S. A. Pereverzeva [et al.] // Vestn. Sankt-Peterburg. un-ta. – 2014. – Iss. – S. 10–17.

11. Sposob mokroj ochistki vozduha : pat. 2343960 Rossijskaya Federaciya, MPK B 01 D 45/14 / V. K. Baev [et al.] ; zayavitel' i patentoobladatel' Publ. akcioner. o-vo “SIBUR Holding” – № 2014153837/05. – Opubl. 10.07.16.

12. Adsorbent dlya ulavlivaniya, koncentrirovaniya i hraneniya dioksida ugleroda : pat. 2567634 Rossijskaya Federaciya, MPK B 01 J 20/06 / L. M. Kustov [et al.] ; zayavitel' i patentoobladatel' IOH RAN – № 2014150409/05. – Opubl. 10.03.16.

13. Sposob ochistki gazovyh potokov ot dioksida ugleroda : pat. 2589166 Ros. Federaciya, MPK B 01 D 53/00 / P. S. Lemport [et al.] ; zayavitel' i patentoobladatel' Publ. akcionern. o-vo “SIBUR Holding”. – № 2014153837/05. – Opubl. 10.07.16.

14. Ulavlivanie i hranenie dvuokisi ugleroda : spec. doklad MGEIK / B. Metc [et al.] // Mezhpravitel'stvennaya gruppa ekspertov po izmeneniyu klimata. – 2005. – S. 24.

УДК: 620.92: 502.174.3

Л. В. Нефедова

СОВРЕМЕННАЯ И ПЕРСПЕКТИВНАЯ РОЛЬ ОБЪЕКТОВ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИИ РЕГИОНОВ РОССИИ

Кандидат географических наук, МГУ имени М. В. Ломоносова,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. На основе собранных в различных организациях данных об установленной мощности объектов на ВИЭ в регионах России на 01.01.2022 г. и эффективности их работы в зависимости от географического расположения ВЭС и СЭС в различные сезоны года выполнены расчеты объемов годовой выработки электроэнергии на данных энергообъектах, а также по данным об уровне энергопотребленияв регионах их расположения определено современное место возобновляемой энергетики в ТЭК субъектов Российской Федерации, оценен экологический эффект использования ВИЭ для энергообеспечения как альтернативы топливным ЭС. Обсуждаются проблемы и перспективы дальнейшего развития возобновляемой энергетики в стране в условиях внешнего санкционного давления.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветроэнергетика, гелиоэнергетика, коэффициент использования установленной мощности, энергообеспечение, энергетический объект, жизненный цикл, экологическая эффективность.

L. V. Nefedova

CURRENT AND PROSPECTIVE ROLE OF RENEWABLE ENERGY IN REGIONS OF RUSSIA POWER SUPPLY

Ph. D. of Geographical Sciences, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Annotation. The volumes of annual electricity generation at renewable power facilities, based on the data collected in various organizations on the working renewable energy facilities in the regions of Russia as of January 1, 2022 were calculated. Applied capacity factors varied depending on the geographic location of WPPs and SPPs. The modern place of renewable energy in the fuel and energy complex of the constituent entities of the Russian Federation was determined. The ecological effect of using renewable energy sources for energy supply as an alternative to fuel PPs was assessed. The problems and prospects for the further development of renewable energy in the country under external sanction actions are discussed.

Keywords: renewable energy sources, wind energy, solar energy, capacity factor, energy supply, energy facility, life cycle, environmental efficiency.

Введение. В энергетической стратегии Российской Федерации до 2035 г. указывается на необходимость увеличения роли использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергообеспечении страны [1]. Стоящие перед Россией, в соответствии с мировой тенденцией энергоперехода и декарбонизации экономики, задачи по развитию возобновляемой энергетики (ВЭ) получили в последние годы активные решения. В России благодаря государственной поддержке было создано отечественное производство высокоэффективных гетероструктурных солнечных панелей, работают предприятия по производству деталей ветроагрегатов. По программе ДПМ от 2015 г. проводились ежегодные конкурсные отборы на строительство электростанций на ВИЭ. В результате суммарная мощность объектов ВЭ в рамках ДПМ-1 составила на 01.01.2022 г. 3609,2 МВт, в том числе 69 СЭС – 1654,6, 22 ВЭС – 1937,7, 3 МГЭС – 20,9 МВт [2]. Объем ввода в России мощностей по программе ВИЭ до 2024 г. запланирован в 5,4 ГВт, из них ВЭС – 3,4 ГВт, СЭС – 1,9 ГВт.

По оперативным данным АО «СО ЕЭС», суммарная выработка ВИЭ (ВЭС и СЭС) в ЕЭС России в 2021 г. составила 5873,0 млн кВт·ч, что на 74,8 % больше, чем в 2020 г. Актуальным представляется проведение региональных оценок современного места возобновляемой энергетики в топливно-энергетическом комплексе России, а также и роли в процессе энергетического перехода.

Материалы и методы исследования. В данной статье представлены результаты исследований, выполненных с целью оценки роли возобновляемой энергетики в России, энергокомплексах регионов для обеспечения промышленного и бытового энергообеспечения. В связи с тем, что последние годы в России был сооружено значительное число солнечных и ветроэнергетических электростанций, проводится анализ объема выработки электроэнергии на данных станциях и уровня использования установленных мощностей. На основании проведенного анализа с учетом характера региональных энергобалансов

поставлена задача оценить возможный уровень объемов покрытия потребностей в электроэнергии возобновляемой энергетикой в настоящее время. Проведение анализа данных о введенных в строй солнечных фотоэлектрических станциях и ветроэнергетических станций в России позволило также оценить ежегодные объемы снижения выбросов углекислого газа в регионах, исходя из прогнозируемых объемов выработки электроэнергии на данных экологически безопасных энергообъектах. Для расчетов доли покрытия энергопотребления были проведены сопоставления объемов выработки электроэнергии на СЭС региона и объема энергопотребления субъекта Российской Федерации по данным Росстата [3]. Оценки потенциала сокращения выбросов парниковых газов за счет наращивания мощностей солнечных электростанций проведены из расчета, что производство электроэнергии в России в среднем сопровождается выбросами около 490 г CO_2/кВт·ч [4]. Однако, если идет замещение угольных ЭС (выбросы около 900 CO_2/кВт·ч), то при расчетах «невыбросов CO_2» вследствие получения электроэнергии на СЭС результаты расчетов необходимо увеличить. При выполнении оценочных расчетов нами также учитывались объемы эмиссии углекислого газа, связанные со всем «жизненным циклом» СЭС и ВЭС (производство фотоэлектрических модулей из высокоочищенного кремния, металлических рамок и стоек для солнечных панелей, утилизация и вторичная переработка панелей и лопастей ветроагрегатов др.). Анализ публикаций по данному вопросу показал, что за среднее значение выбросов фотоэлектрических станций может быть принято значение в 35 г CO_2-экв/кВт·ч вырабатываемой электроэнергии, а для ветроэнергетических станций – 25 г CO_2-экв/кВт·ч [5–7]. При этом удельные объемы выбросов CO_2 сокращаются, что обусловлено развитием технологий и снижением материалоемкости фотоэлектрических преобразователей и инверторов [8]. СЭС и крупные ветболее 3 МВт в настоящее время при эксплуатации негативного влияния на окруроэнергоагрегаты – мощностью жающую среду практически не оказывают.

При проведении исследования использованы расчетные статистические и прогнозно-аналитические методы, экономико-географический анализ и экспертные оценки. Базой для проведения расчетов послужили материалы компаний – производителей энергии, Системного оператора Единой энергосистемы (СО ЕЭС) России, статистические данные Госкомстата Российской Федерации и НП «Совет рынка».

Результаты исследования и их обсуждение. На основе расчетов суммарной установленной мощности солнечных фотоэлектрических и ветроэнергетических станций, работающих в России на начало 2022 г. для регионов с суммарной мощностью СЭС более 5,0 МВт и всех сетевых ВЭС, построенных по программе ДПМ, проведено их ранжирование по уровню развития возобновляемой энергетики. Наибольшие мощности 96,6 % ветроэлектростанций (кроме ВЭС Ульяновской области) установлены в Южном и Северо-Кавказском ФО, которые входят в Объединенную ЭС Юга России. Для расчетов выработки электроэнергии в регионах был принято среднегодовое значение коэффициента использо-

вания установленной мощности (КИУМ) по данным Системного оператора Единой ЭС Российской Федерации 2020–2021 гг.: 15,2 % по солнечным электростанциям для СЭС Южного и Северо-Кавказского ФО и 14,6 % для СЭС в других ФО; по ВЭС среднее значение для объединенной ЭС Юга 27,9 %, для ВЭС Ульяновской обл. – 28,8 % [9]. Полученные расчетные данные были сопоставлены с суммарным потреблением электроэнергии в 2020 г. по данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат) в регионах работы электростанций на ВИЭ. Результаты расчетов представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. **Оценка доли электроэнергии действующих солнечных электростанций в энергобалансах регионах России (по состоянию на 01.01.2022 г.)**

Субъект Российской Федерации, федеральные округа	Установленная мощность СЭС на 01.01.2022 г., МВт	Выработка ЭЭ за год, млн КВт·ч	Потребление ЭЭ в регионе за 2020 г., млн кВт·ч	Доля ЭЭ СЭС в энергобалансе, %
Приволжский ФО	599,0	–	–	–
Оренбургская область	360,0	479,35	17415,9	2,75
Республика Башкорстан	94,0	125,16	25280,2	0,50
Самарская область	75,0	99,86	24889,4	0,42
Саратовская область	70,0	93,20	12520,2	0,73
Южный ФО	600,4			
Астраханская область	275,0	366,17	4311,8	8,50
Республика Калмыкия	196,5	261,65	731,9	35,75
Волгоградская область	120,0	159,78	16423,2	0,97
Республика Адыгея	8,9	11,85	1649,0	0,72
Северо-Кавказский ФО	105,0			
Ставропольский край	100,0	133,15	10233,9	1,30
Чеченская республика	5,0	6,65	2904,0	0,23
Сибирский ФО	185,2			
Республика Алтай	120,0	159,78	688,6	23,20
Омская область	60,0	79,89	10351,1	0,77
Республика Хакассия	5,2	6,92	16468,5	0,04
Дальневосточный ФО	165,0			
Республика Бурятия	115,0	153,12	5057,2	3,03
Забайкальский край	50,0	66,58	8192,5	0,81
Всего на 01.01.2022 г.	1654,6	2203,11	–	–

Составлено автором с использованием данных [2, 3].

В России на 01.01.2022 г. в 15 регионах, расположенных в пяти Федеральных округах, суммарная установленная мощность СЭС была более 5 МВт. По результатам расчетов, лидерами по энергообеспечению за счет гелиоресурсов являются Республики Калмыкия и Алтай, в этих регионах доля возобновляемой электроэнергии от СЭС в энергобалансах составляет уже 35,75 и 23,20 % соответственно. Значительный уровень характерен и для Астраханской области (8,5 % энергопотребления). Крупные сетевые ВЭС, построенные по программе ДПМ, работают в шести регионах России, преимущественно в Южном ФО.

Таблица 2. **Оценка доли электроэнергии действующих ветроэлектростанций в энергобалансах регионов России (по состоянию на 01.01.2022г.)**

Регион Российской Федерации	Суммарная мощность ВЭС, МВт	Выработка ЭЭ за год, млн КВт·ч	Потребление ЭЭ в регионе 2020г., млн кВт·ч	Доля ЭЭ ВЭС в энергобалансе
Ростовская область	607,29	1484,24	18990,0	7,81 %
Ставропольский край	450,0	1099,81	10233,9	10,74 %
Астраханская область	340,2	831,46	4311,8	19,28 %
Республика Калмыкия	216,6	529,38	731,9	72,33 %
Республика Адыгея	150,0	366,60	1649,0	22,23 %
Ульяновская область	85,4	215,45	5323,9	4,05 %
Всего по Российской Федерации	1937,69	4526,94		

Составлено автором с использованием данных [2, 3].

В ветроэнергетике распределение доли в энергобалансах регионов более равномерное: при бесспорном лидерстве Республики Калмыкия (72,33 %) ряд регионов уже в значительной мере могут быть обеспечены электроэнергией за счет работы ВЭС: Республика Адыгея – на 22,23 %, Астраханская область – на 19,28 %, Ставропольский край – на 10,74 %.

Также было проведено ранжирование регионов по суммарной доле энергообеспечения за счет гелио- и ветроресурсов (табл. 3). Объекты на ВИЭ уже в настоящее время вырабатывают значительную долю энергопотребления в ряде регионов Российской Федерации. А Республика Калмыкия из энергодефицитного района, для которого вся ЭЭ поступала из соседних регионов, в настоящее время уже может считаться полностью способной обеспечить свои потребности в промышленном и бытовом энергоснабжении за счет ВИЭ, является энергоизбыточным регионом. Проблемой 100 %-ного энергообеспечения Республики за счет данных энергоисточников является неравномерность выработки и сложности полной успешной интеграции объектов на ВИЭ с неточно пока прогнозируемой выработкой ЭЭ. В трех же регионах России суммарная доля возобновляемой энергии в энергобалансах составляет более 20 %: Астраханская область, Республики Алтай и Адыгея.

Таблица 3. **Ранжирование регионов России по потенциальной доле возобновляемой энергии в энергобалансах**

Регион Российской Федерации	Суммарная мощность ВЭС, МВт	Выработка ЭЭ за год, млн КВт·ч	Потребление ЭЭ в регионе за 2020 г., млн кВт·ч	Доля ЭЭ ВЭС в энергобалансе
Ростовская область	607,29	1484,24	18990,0	7,81 %
Ставропольский край	450,0	1099,81	10233,9	10,74 %
Астраханская область	340,2	831,46	4311,8	19,28 %
Республика Калмыкия	216,6	529,38	731,9	72,33 %
Республика Адыгея	150,0	366,60	1649,0	22,23 %
Ульяновская область	85,4	215,45	5323,9	4,05 %
Всего по Российской Федерации	1937,69	4526,94	–	–

Были выполнены также оценки экологического значения развития возобновляемой энергетики в плане снижения эмиссии CO_2 за счет неиспользования ископаемого топлива с учетом «углеродного следа» СЭС и ВЭС. Суммарное снижение эмиссия CO_2, обусловленное работой ЭС на ВИЭ в Единой Энергосистеме Российской Федерации, но нашим расчетам, составляет: СЭС – более чем на 1 млн т CO_2 в год, а ВЭС – на 2,1 млн т CO_2 в год. Важно отметить, что 97 % от снижения эмиссии углекислого газа за счет ВЭС приходится на Южный и Северо-Кавказский округа, имеющие большое рекреационное значение.

В 2022 г. в связи с создавшей ситуацией в отрасли ввод в эксплуатацию строящихся ВЭС в России был отложен, что было обусловлено невозможностью завершения начатых работ. Были введены в строй за полгода только объекты гелиоэнергетики суммарной мощностью 137,6 МВт (в Саратовской области – 35 МВт, в Республике Дагестан – 15, в Калмыкии – 37,6 и в Забайкальском крае – 50 МВт).

Дальнейшее развитие возобновляемой энергетики в России и увеличение ее доли в энергообеспечении регионов связано с проблемами современного этапа развития возобновляемой энергетики в России, обусловленными внешними санкциями, разрывом экономических отношений и логистических цепочек в производстве оборудования. ГК «Хевел» – производство фотоэлектрических гетерогенных модулей ГК – сталкивается с санкциями уже несколько лет, вновь будет вынуждена искать новые рынки сбыта и, возможно, увеличит поставки странам СНГ и на внутренний рынок. Заявления таких компаний, как Vestas, Fortum и Enel об уходе с российского рынка, – неоднозначно, поскольку их предприятия находятся в Российской Федерации, на них трудятся российские сотрудники. Продолжаются работы АО «НоваВид» Росатома с заводами «Атоммаш» (генераторы и гондолы) и «ВетроСтройДеталь» (конструкции башни) в Волгодонске Ростовской области, производящими в год компоненты для 120 ВЭУ 2,5 МВт. Возникшие проблемы будут стимулом для поиска и выстраивания взаимоотношений с другими поставщиками тех же технологий и компонентов, расширения действующих производств и создания новых. Государство принимает меры по поддержке возобновляемой энергетики, такие как отмена штрафов за несоблюдение сроков запуска новых ЭС на ВИЭ и др. При этом ряд экспертов отмечают, что развитие ВИЭ в России только за счет механизма ДПМ и его производных ведет к существенному росту платежей за электроэнергию и значительно снижает эффекты функционирования низкоуглеродной энергетики [10]. Как более перспективный способ поддержки отечественных производителей оборудования и комплектующих для ВИЭ в современных условиях и ограничениях предлагается рассматривать переход от механизмов поддержки, сходных с ДПМ, к двусторонним контрактам, стимулирование поставщиков и потребителей электроэнергии, заинтересованных в «зеленой» повестке, к реализации совместных целевых проектов по строительству объектов ВИЭ без обременения всего энергетического рынка. Важным представляется развитие именно механизмов свободных двусторонних договоров на энерго-

объекты на ВИЭ на долгосрочной взаимовыгодной основе. Такой подход позволяет концентрировать производственные ресурсы, создавать промышленные кластеры и развивать отечественное производство компонентов энергообъектов.

Заключение. Проведенные исследования и расчеты показали важную роль возобновляемой энергетики в энергообеспечении регионов России. Лидерами по энергообеспечению за счет гелиоресурсов являются Республики Калмыкия и Алтай, в этих регионах доля возобновляемой электроэнергии от СЭС в энергобалансах составляет уже 35,75 и 23,20 % соответственно. Значительный уровень характерен и для Астраханской области (8,5 % энергопотребления). В ветроэнергетике распределение доли в энергобалансах регионов более равномерное: при бесспорном лидерстве Республики Калмыкия (72,33 %) ряд регионов уже в значительной мере могут быть обеспечены электроэнергией за счет работы ВЭС: Республика Адыгея – на 22,23 %, Астраханская область – на 19,28 %, Ставропольский край – на 10,74 %.

В Калмыкии, исходя из наших расчетов, суммарная выработка электроэнергии на СЭС и ВЭС уже превышает энергопотребление в республике. Проблемой 100 %-ного энергообеспечения Калмыкии за счет данных энергоисточников является неравномерность выработки и сложности полной успешной интеграции объектов на ВИЭ с неточно пока прогнозируемой выработкой ЭЭ. В трех же регионах России суммарная доля возобновляемой энергии в энергобалансах составляет уже более 20 %: Астраханская область, Республики Алтай и Адыгея. В последние месяцы возникли значительные проблемы по дальнейшему производству и строительству объектов ветроэнергетики, обусловленные санкционными мерами западных стран. Возникшие проблемы будут стимулом для поиска и выстраивания взаимоотношений с другими поставщиками тех же технологий и компонентов, расширения действующих производств и создания новых. Государство принимает меры поддержки отрасли. Помимо действующей программы ДПМ важным представляется развитие механизмов свободных двусторонних договоров на энергобъекты на ВИЭ на долгосрочной взаимовыгодной основе поставщиков и потребителей электроэнергии.

Работа выполнена в НИЛ ВИЭ Географического факультетата МГУ в рамках Госзадания № 121051400082-4.

Список использованных источников

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 г. [Электронный ресурс] : распоряжение Правительства Рос. Федерации, 9 июня 2020 г., № 1523-р. // Консорциум КОДЕКС / Электрон. фонд правовых и норматив.-техн. документов. – СПб., 2020.

2. НП Совет рынка. Перечень квалифицированных энергообъектов, функционирующих на основе ВИЭ [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm. – Дата доступа : 24.06.2022.

3. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики (Росстат) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial. – Дата доступа : 24.06.2022.

4. Углеродоемкость электроэнергии в мире и России / В. Гимади [и др.] // Энергет. бюл. Аналит. центра при Правительстве РФ. – 2019. – № 72. – С. 14–18.

5. Gerbinet, S. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review / S. Gerbinet, S. Belboom, A. Léonard // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 38. – P. 747–753.

6. Сидоренко, Г. Оценка экологической эффективности жизненных циклов энергетических объектов на основе возобновляемых источников энергии / Г. Сидоренко, П. Михеев // Экология и промышленность России. – 2017. – № 21 (5). – С. 44–49.

7. Bonou, A. Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy – from theory to application / A. Bonou, A. Laurent, S. Olsen // Applied Energy. – 2016. – Vol. 180. – P. 327–337.

8. Tawalbeha, M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook / M. Tawalbeha [et al.] // Science of the Total Environment. – 2021. – Vol. 759. – № 143528.

9. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 г. [Электронный ресурс] // Системный оператор Единой энергосистемы. – М. : Минэнерго, 2022. – 33 с. – Режим доступа : https://www.so-ups.ru. – Дата доступа : 24.06.2022.

10. Киселев, В. ВИЭ в России: субсидировать или развивать? / В. Киселев // Энергетическая политика. – 2022. – № 6. – С. 35–41.

References

1. Energeticheskaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2035 g. [Electronic resource] : rasporyazhenie Pravitel'stva Ros. Federacii, 9 iyunya 2020 g., № 1523-r. // Konsorcium KODEKS / Elektron. fond pravovyh i normativ.-tekhn. dokumentov. – SPb., 2020.

2. NP Sovet rynka. Perechen' kvalificirovannyh energoob"ektov, funkcioniruyushchih na osnove VIE [Electronic resource]. – Mode of access : https://www.np-sr.ru/ru/market/vie/index.htm. – Date of access : 24.06.2022.

3. Oficial'nyj sajt Federal'noj sluzhby gosudarstvennoj statistiki (Rosstat) [Electronic resource]. – Mode of access : https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial. – Date of access : 24.06.2022.

4. Uglerodoemkost' elektroenergii v mire i Rossii / V. Gimadi [et al.] // Energet. byul. Analit. centra pri Pravitel'stve RF. – 2019. – № 72. – S.14–18.

5. Gerbinet, S. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review / S. Gerbinet, S. Belboom, A. Léonard // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 38. – P. 747–753.

6. Sidorenko, G. Ocenka ekologicheskoj effektivnosti zhiznennyh ciklov energeticheskih ob"ektov na osnove vozobnovlyaemyh istochnikov energii / G. Sidorenko, P. Miheev // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. – 2017. – № 21 (5). – S. 44–49.

7. Bonou, A. Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy – from theory to application / A. Bonou, A. Laurent, S. Olsen // Applied Energy. – 2016. – Vol. 180. – P. 327–337.

8. Tawalbeha, M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook / M. Tawalbeha [et al.] // Science of the Total Environment. – 2021. – Vol. 759. – № 143528.

9. Otchet o funkcionirovanii EES Rossii v 2021 g. [Electronic resource] // Sistemnyj operator Edinoj energosistemy. – M. : Minenergo, 2022. – 33 s. – Mode of access : https://www.so-ups.ru. – Date of access : 24.06.2022.

10. Kiselev, V. VIE v Rossii: subsidirovat' ili razvivat'? / V. Kiselev // Energeticheskaya politika. – 2022. – № 6. – S. 35–41.

УДК 620.95:504.75

Н. И. Чернова[1], С. В. Киселева[2], М. С. Власкин[3], А. В. Григоренко[4], К. Г. Рындин[5]

РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ПРОИЗВОДСТВА БИОМАССЫ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОТОПЛИВА И СЕКВЕСТИРОВАНИЯ АНТРОПОГЕННОГО УГЛЕРОДА

[1]Кандидат биологических наук, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
[2]Кандидат физико-математических наук, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация
[3]Кандидат технических наук, Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Российская Федерация
[4,5]Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе введено понятие ресурсного потенциала производства биомассы микроводорослей и биотоплива из них. Определены природные и инфраструктурные факторы, которые определяют величину ресурсов. Представлены результаты оценок для территорий Республик Дагестан, Крым, Узбекистан.

Ключевые слова: биомасса микроводорослей, гидротермальное сжижение, бионефть, биоуголь, природно-климатические условия, ресурсный потенциал, секвестирование CO_2.

N. I. Chernova[1], S. V. Kiseleva[2], M. S. Vlaskin[3], A. V. Grigorenko[4], K. G. Ryndin[5]

RESOURCE POTENTIAL OF MICROALGAE BIOMASS PRODUCTION FOR BIOFUEL PRODUCTION AND ANTHROPOGENIC CARBON SEQUESTRATION

[1]Ph. D. in Biology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
[2]Ph. D. in Physics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
[3]Ph. D. in Engineering, Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation
[4,5]Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

Annotation. The paper introduces the concept of resource potential for the production of microalgae biomass and biofuel from them. The natural and infrastructural factors that determine the amount of resources are determined. The results of assessments for the territories of the Republics of Dagestan, Crimea, and Uzbekistan are presented.

Keywords: microalgae biomass, hydrothermal liquefaction, bio-oil, biochar, natural and climatic conditions, resource potential, CO_2 sequestration.

Введение. Проблема утилизации парниковых газов является общемировой; она является существенной и для России, где большую долю в топливно-энергетическом балансе занимают традиционные углеводородные топлива. В ряде стран мира вводятся углеродные налоги, в связи с чем многие участники рынка

ископаемых топлив, удобрений, металлов и иных видов продукции вынуждены обращаться к методам сокращения выбросов парниковых газов. Одним из перспективных решений вышеуказанной проблемы является использование фотосинтезирующих микроорганизмов, в частности, микроводорослей и цианобактерий, для утилизации дымовых газов, образующихся при сжигании ископаемых топлив, для производства биотоплива и других ценных сопутствующих продуктов.

Фотосинтезирующие микроорганизмы за счет большей удельной поверхности существенно более эффективно преобразуют в процессе фотосинтеза энергию солнечного света, углекислый газ и воду в биомассу и кислород, чем наземные растения. Эффективность поглощения CO_2 микроводорослями колеблется от 30 до 99 %, в зависимости от используемой системы культивирования и скорости перемешивания культур, при этом при выращивании 1 кг МКВ может поглощать приблизительно 1,83 кг CO_2 [9].

Использование монокультур (микроводорослей и цианобактериий) в процессах утилизации дымовых газов теплоэлектростанций и других промышленных объектов сталкивается с рядом трудностей. Прямая подача дымовых газов в фотобиореактор приводит к подкислению питательной среды, которое обычно неблагоприятно для роста и развития водорослей [11].

Помимо CO_2 дымовые газы обычно содержат ингибирующие токсичные загрязнители SO_x и NO_x, которые также могут негативно сказываться на росте микроводорослей [13]. Поэтому для эффективной утилизации дымовых газов необходимо провести скрининг и отобрать устойчивые штаммы фотосинтезирующих микроорганизмов, а также создать на их основе консорциумы с другими, например, гетеротрофными бактериями или грибами. При этом потребуются и особые условия их выращивания, которые минимизируют эффект от компонентов дымовых газов, препятствующих росту. Использование сточных вод для выращивания МКВ в сочетании с производством биотоплива является многообещающим, так как затраты питательных веществ (удобрений), выбросов CO_2 и нагрузка на ресурсы пресной воды при этом снижаются [6]. Такой метод культивирования МКВ также повышает эффективность изъятия из сточных вод биогенных элементов, тяжелых металлов, а также устранения патогенной микрофлоры. Метод обеспечивает образование O_2, необходимого гетеротрофным аэробным бактериям для минерализации органических загрязнителей, и утилизацию CO_2, выделяющегося при дыхании бактерий [5].

Материалы и методы исследования. Немаловажной задачей при утилизации парниковых газов фотосинтезирующими микроорганизмами является дальнейшее использование выращенной биомассы. Один из наиболее прагматичных подходов – преобразование биомассы в биотопливо с его последующей интеграцией в существующую инфраструктуру углеводородных топлив. Перспективным представляется получение из биомассы микроводорослей бионефти, для чего может быть использована технология гидротермального сжижения, которая позволяет перерабатывать влажную биомассу. Еще одним перспективным подходом к использованию биомассы может стать ее депонирование

на полигонах (шахтах) или в почвах (грунтах). Для обеспечения устойчивого захоронения CO_2 представляется целесообразным также конверсия биомассы в инертный биоуголь путем гидротермальной карбонизации и дальнейшее захоронение полученного биоугля.

Поскольку проблема высоких затрат на выращивание МКВ и низкой конкурентоспособности продуктов из них остается актуальной, большое значение имеет выбор территорий (регионов), обеспечивающих наиболее благоприятные природные и инфраструктурные условия для их производства и, следовательно, снижение себестоимости. Особенно важна оценка природных условий при выращивании микроводорослей открытым способом (на открытых площадках). Как показали наши исследования, в России такое выращивание возможно в ряде регионов в течение теплого времени года или в тепличных комплексах круглогодично [8]. В рамках поставленной задачи можно ввести понятие ресурсного потенциала производства биомассы и биотоплива из микроводорослей, под которым будем понимать:

количество биомассы микроводорослей, которое может быть получено на заданной территории с учетом природных (климатических) и инфраструктурных условий (или факторов);

количество биотоплива, которое можно произвести из выращенной биомассы МКВ с использованием известных технологий переработки;

площадь территории, которая может быть использована для производства биомассы МКВ как сырья для получения биотоплива с учетом природных (климатических) и инфраструктурных факторов.

Известные условия, необходимые для высокопродуктивного культивирования большинства промышленных видов микроводорослей открытым способом позволяют предложить следующий перечень наиболее значимых природных факторов:

интенсивность солнечной радиации (не менее 4,0 кВт·ч/м^2/сут, или примерно 14 МДж/м^2);

длительность освещения с интенсивностью, не менее необходимой, в течение суток, т. е. соотношение длительности световой и темновой фазы роста (не менее 6:18);

температура окружающего воздуха (не ниже 15 °С);

режим осадков и интенсивность испарения (не должно приводить к существенным и резким изменения концентрации питательных сред в открытых культиваторах);

незначительный уклон земной поверхности (не более 5 %);

удаленность плантаций от источников природного и техногенного загрязнения.

Поскольку чаще всего необходимые климатические условия обеспечиваются лишь в течение части года, важно определить также временные интервалы, в течение которых поддерживаются необходимые условия освещенности, температуры и т. д. в данной местности.

Помимо природных для промышленного производства микроводорослей необходимо наличие инфраструктурных условий (факторов):

наличие свободных земель (неплодородных, бедлендов, неиспользуемых промышленных площадок и т. п.);

наличие водных ресурсов, каковыми могут являться не только пресные, но и морские и солоноватые воды;

близость источников углекислого газа;

транспортная доступность;

наличие сетевого энергоснабжения или возможность использования возобновляемых источников энергии;

наличие низкотемпературных энергоносителей (сбросные воды ТЭС, АЭС; геотермальные источники);

близость потенциальных потребителей продуктов производства микроводорослей.

Проведение многофакторного пространственного анализа в целях поиска наиболее подходящих территорий и оценки ресурсного потенциала производства микроводорослей и биотоплива из них целесообразно на основе ГИС-технологий. Такой анализ был проведен на основе базы данных NASA POWER, содержащей многолетние ряды метеорологических и актинометрических характеристик [14]. В результате был собран массив данных о среднемесячных температурах воздуха на высоте 2 м, среднемесячных суточных суммах суммарной солнечной радиации и продолжительности светлого времени суток с пространственной детализацией 1° для территорий Республик Дагестана, Крыма, и Узбекистана (период осреднения – 1999–2019 гг.). В качестве объектов, для выращивания которых был проведен анализ природных условий, рассмотрены микроводоросли *Arthrospira/Spirulina platensis* и *Dunaliella salina*. Эти два вида МКВ выращивают в промышленных масштабах дешевым открытым способом как для применения в качестве биологически активных добавок к кормам и пище (БАД), так и для получения биотоплива. С учетом климатических условий, а также рельефа местности (уклон поверхности менее 5 %) как наиболее перспективные были выбраны равнинные районы северного Дагестана и Прикаспийской низменности в юго-восточной части Республики.

В качестве инфраструктурных факторов, которые способствуют снижению себестоимости получаемой биомассы микроводорослей и поэтому являются наиболее благоприятными, в оценках были учтены следующие.

Ко-локализация производства микроводорослей, которая позволяет существенно сократить энергозатраты за счет расположения плантаций рядом с источниками сырья, воды и потребителями основных и сопутствующих продуктов производства МКВ. Среди них наиболее важными являются:

источники дешевой тепловой энергии (низкопотенциального тепла) для выращивания МКВ – геотермальные месторождения и теплоэлектростанции;

стационарные источники CO_2 – теплоэлектростанции, цементные, стекольные заводы и заводы по производству удобрений. Так, по нашим расчетам, вы-

бросы CO_2 от цементной промышленности Дагестана и Махачкалинской ТЭЦ составляют около 2 555 000 т/год. Ассимиляция этого количества CO_2 микроводорослями при средней продуктивности биомассы 20 г/м^2/сут может обеспечить урожай около 1 867 000 т/год, или при выращивании МКВ в течение теплого периода года (150 сут) – 930 000 т биомассы;

потребители целевого и сопутствующего продуктов. Для биотоплива это котельные, сельскохозяйственная техника; для сопутствующих продуктов (кормовых добавок) – предприятия птицеводства и животноводства. В перспективе можно предусмотреть целевое производство витаминных добавок из МКВ (источники каротиноидов, витаминов групп А и В), а оставшуюся большую часть биомассы применять для трансформации в биотопливо.

При анализе инфраструктурных фактов в исследованиях были исключены из рассмотрения территории, на которых размещение крупных микроводорослевых производств ограничено или полностью невозможно по причине ограничений на хозяйственную деятельность (особо охраняемые природные территории, промышленные территории, зоны отдыха, виноградники и сады, зоны жилой застройки и т. д.).

В результате оценки ресурсного потенциала производства микроводорослей в качестве перспективных были выделены территории, расположенные в пределах Прикаспийской низменности и частично включающие в себя Каякентский, Кизилюртовский и Докузпаринский административные районы Республики Дагестан. Площадь территории, не имеющей ограничений для размещения предприятий по выращиванию микроводорослей, была рассчитана с помощью программных инструментов QGIS и составила 1500 км^2. При размещении плантаций МКВ на плантации площадью 400 га (обоснованная с технико-экономической точки зрения площадь единичной плантации) [15] количество выращенной биомассы за 5 месяцев теплого периода года составит в Дагестане 12 000 т, а полученной из нее технологией гидротермального сжижения бионефти – 4800 т.

Результаты исследования и их обсуждение. С использованием описанных методических подходов была проанализирована территория Республики Узбекистан, где по природным условиям наиболее благоприятным регионом для производства биомассы микроводорослей является территория Республики Каракалпакстан. Здесь за вегетационный период (6 месяцев) на единичной площади 400 га урожайность водорослей хлореллы или спирулины потенциально может составить 14 400 т (по биомассе), или 5760 т/год (по бионефти). При выращивании дуналиеллы, урожайность которой существенно ниже (2–6 г/м^2/сут), потенциальная урожайность на той же площади составит 1440–4800 т/год (по биомассе) или 580–1900 т/год (по бионефти). Учтены также потенциальные потребители биотоплива и сопутствующих продуктов (птицефабрики, животноводческие комплексы, перспективное выращивание микрорачков артемии, служащей ценным кормом для осетровых рыб), а также имеющиеся ограничения землепользования.

Микроводорослевые биотехнологии заслуживают внимания не только с точки зрения получения энергии, но и в качестве эффективного средства для ре-

медиации сточных вод. Культивирование МКВ в сточных водах может быть особенно актуально для Крымского полуострова, где на данный момент очень остро стоит проблема некачественной очистки сточных вод [3]. В решении этой проблемы наиболее перспективными считаются водорослево-бактериальные консорциумы, которые осуществляют экономически выгодную и устойчивую очистку сточных вод [12]. На сегодняшний день МКВ являются незаменимыми с экономической точки зрения при доочистке сточных вод с минимальной концентрацией загрязнителей, когда обработка химическими способами становится очень затратной [7]. Применение МКВ позволяет существенно повысить энергоэффективность очистки сточных вод путем повышения концентрации растворенного O_2 за счет роста активности гетеротрофных аэробных бактерий [10] и оксигенных групп МКВ. Водоросли обеспечивают поглощение питательных веществ из сточных вод и снабжение необходимым кислородом аэробных бактерий посредством фотосинтеза. В результате снижаются потребности в принудительной аэрации сточных вод и дополнительных затратах энергии [9].

В настоящее время в Крыму идет реконструкция очистных сооружений, которые планируют сделать закрытыми и максимально экологичными [4]. В аэротенках закрытого типа поддерживать оптимальные условия для круглогодичного культивирования МКВ становится намного проще, а это означает, что использование МКВ для очистки становится не только эффективным, но и экономически более выгодным за счет уменьшения расходов на аэрацию и химическую доочистку, а полученную биомассу можно использовать для производства биотоплива. На основе многолетних натурных экспериментов по выращиванию МКВ в Крыму (п. Кацивели) на базе филиала Гидрофизического института РАН [1] можно оценить ресурсный потенциал производства МКВ при круглогодичном их выращивании в сточных водах. При средней продуктивности МКВ 15 г/м^2/сут (плоские открытые культиваторы) на площади базовой плантации 400 га может быть получено порядка 21 900 т биомассы МКВ в год; выход бионефти из которых технологией гидротермального сжижения может составить около 8760 т [2]. При использовании этой технологии в качестве побочного продукта образуется биоуголь в количестве 20–30 % от исходной биомассы, т. е. от 4100 до 6570 т биоугля может быть захоронено, что обеспечит вклад процесса очистки сточных вод в секвестирование CO_2.

Заключение. Выращивание микроводорослей для комплексного их применения с получением биотоплива и ценных сопутствующих продуктов с одновременной утилизацией сточных вод и выбросов CO_2 может рассматриваться как перспективное направление биоэнергетики.

Пространственный анализ климатических и инфраструктурных факторов позволяет оценить ресурсный потенциал производства микроводорослей и биотоплива из них. Производство МКВ методом открытого культивирования может быть реализовано только в теплые периоды на территории Юга России (Ставропольский край, Краснодарский край, Ростовская область, Астраханская область, Республика Дагестан, Республика Крым).

На территории Республика Дагестан определены территории, пригодные для выращивания МКВ, обеспеченные транспортной доступностью (сетью автодорог), электросетями, источниками антропогенного CO_2 (ТЭЦ, цементные заводы), морской водой, минерализованными подземными водами, источниками низкопотенциального тепла (термальные воды с температурой не менее 40 °С). Учтены также потенциальные потребители биотоплива и сопутствующих продуктов (птицефабрики, животноводческие комплексы) и нормы землепользования. Территории, оптимальные для размещения производств МКВ площадью 1500 км^2, расположены на побережье Каспийского моря Дагестана в Махачкалинском и Каякентском районах. На оптимальной единичной плантации площадью 400 га в климатических условиях этого региона возможно получить за теплый период года открытым способом около 12 000 т биомассы микроводорослей и 1 800 т бионефти из нее.

В Республике Узбекистан наибольшим потенциалом для производства биомассы микроводорослей обладает территория Республики Каракалпакстан с потенциальной долей площади территории для развертывания плантаций порядка 0,5 %. Климатические условия, а также использование гиперсоленых морских вод Западного Арала позволяют достигнуть урожайность плантации площадью 400 га на данной территории за вегетационный период (6 месяцев) 14 400 т (по биомассе) и 5760 т/год (по бионефти) для хлореллы или спирулины. При выращивании микроводоросли дуналиеллы урожайность такой плантации – 1440–4800 т/год (по биомассе), и потенциальное производство биотоплива из нее – 580–1900 т/год соответственно.

Ресурсный потенциал производства микроводорослей территории Республики Крым был оценен с учетом возможности культивирования МКВ на сточных водах. Показано, что при выращивании МКВ артроспиры урожайность плантации расчетной площадью 400 га даст 21 900 т биомассы МКВ в год, а потенциальное производство бионефти из нее составит 8760 т. Получение в качестве побочного продукта технологии гидротермального сжижения биоугля в количестве 4100–6570 т/год и его дальнейшее захоронение может рассматриваться как альтернативный способ секвестирования антропогенного CO_2.

Исследование выполнено при частичной поддержке гранта Российского научного фонда № 22-49-02003.

Список использованных источников

1. Энергетические плантации / В. В. Алексеев [и др.] // География, общество, окружающая среда : сб. : в 3 т. / под ред. С. А. Добролюбова, Н. С. Касимова, С. М. Малхазовой. – М. : Городец, 2004. – Т. 3. – С. 578–607.

2. Дутикова, Ю. С. Использование сточных вод в технологиях производства биотоплива из микроводорослей / Ю. С. Дутикова, Н. И. Чернова // Возобновляемые источники энергии: материалы Всерос. науч. конф. и XII молодеж. шк. с междунар. участием, Москва, 23–26 нояб. 2020 г. : сб. / отв. ред. С. В. Киселѐва, Ю. Ю. Рафикова. – М. : Наука, 2020. – С. 206–211.

3. Ради чистой воды. Крым ждет новые очистные сооружения [Электронный ресурс] // «Федерал Пресс» Крым. – Режим доступа : https://fedpress.ru/article/2442818. – Дата доступа : 20.06.2022.

4. Вода в Черном море близка по составу к крови [Электронный ресурс] // NEWS-LIFE. – Режим доступа : https://news-life.pro/sevastopol/207170944. – Дата доступа : 20.04.2022.

5. Соловченко, А. Е. Экологические фотобиотехнологии для очистки сточных вод / А. Е. Соловченко [и др.] // Биотехнология. – 2011. – Т. 6. – С. 70–88.

6. Чернова, Н. И. Водоросли в качестве сырья для биотоплива и улавливания CO_2 / Н. И. Чернова, С. В. Киселева // Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь : состояние и перспективы : Междунар. науч. конф., Минск, 1–2 окт. 2020 г. : сб. докл. / ред. Т. Г. Зорина. – Минск : Беларус. навука, 2020. – С. 187–193.

7. Интегрированные системы использования микроводорослей для очистки сточных вод и получения биотоплива / Н. И. Чернова [и др.] // Фундаментальные и прикладные аспекты геологии, геофизики и геоэкологии с использованием современных информационных технологий : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Майкоп, 20–24 мая 2019 г. / Майкоп. Гос. техн. ун-т ; редкол. : С. К. Куижева [и др.]. – Майкоп, 2019. – Т. 2. – С. 247–258.

8. Пространственный анализ ресурсного потенциала для оптимального размещения объектов биоэнергетики / Н. И. Чернова [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – 2019. – № 22–27. – С. 30–41.

9. Bwapwa, J. K. Jet Fuel from Domestic Wastewater Treatment Using Microalgae: A Review / J. K. Bwapwa, A. Akash, C. Trois // Green Materials for Wastewater Treatment. Environmental Chemistry for a Sustainable Worl. – 2020. – Vol 38. – P. 321–360.

10. Renewable energy technologies: enlargement of biofuels list and co-products from microalgae / N. I. Chernova [et al.] // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 112. 10010 (1–6).

11. Yahya, L. Screening of native microalgae species for carbon fixation at the vicinity of Malaysian coal-fired power plant / L. Yahya, R. Harun, L. C. Abdullah // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10, № 1. – P. 22–35.

12. Gonzalez-Fernandez, C. Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts. From feedstock Cultivation to End-Products / C. Gonzalez-Fernandez, R. Munoz. – Elsevier Ltd., 2017. – 560 p.

13. Molitor, H. R. Using Simulated Flue Gas to Rapidly Grow Nutritious Microalgae with Enhanced Settleability / H. R. Molitor, J. L. Schnoor // ACS Omega. – 2020. – Vol. 5, № 42. – P. 27269–27277.

14. NASA Predictionof Worldwide Energy Resources [Electronic resource]. – Mode of access : https://power.larc.nasa.gov. – Date of access : 13.06.2021.

15. Quinn, J. C., Geographical Assessment of Microalgae Biofuels Potential in corporating Resource Availability / J. C. Quinn // Bio Energy Research. – 2013. – Vol. 6, № 2. – P. 591–600.

References

1. Energeticheskie plantacii / V. V. Alekseev [et al.] // Geografiya, obshchestvo, okruzhayushchaya sreda : sb.: v 3 t. / pod red. S. A. Dobrolyubova, N. S. Kasimova, S. M. Malhazovoj. – M. : Gorodec, 2004. – T. 3. – S. 578–607.

2. Dutikova, Yu. S. Ispol'zovanie stochnyh vod v tekhnologiyah proizvodstva biotopliva iz mikrovodoroslej / Yu. S. Dutikova, N. I. Chernova // Vozobnovlyaemye istochniki energii: materialy Vseros. nauch. konf. i XII molodezh. shk. s mezhdunar. uchastiem, Moskva, 23–26 noyab. 2020 g. : sbornik / otv. red. S. V. Kiselèva, Yu. Yu. Rafikova. – M. : Nauka, 2020. – S. 206–211.

3. Radi chistoj vody. Krym zhdet novye ochistnye sooruzheniya [Electronic resource] // "Federal Press" Krym. – Mode of access : https://fedpress.ru/article/2442818. – Date of access : 20.06.2022.

4. Voda v CHernom more blizka po sostavu k krovi [Electronic resource] // NEWS-LIFE. – Mode of access : https://news-life.pro/sevastopol/207170944. – Date of access : 20.04.2022.

5. Solovchenko, A. E. Ekologicheskie fotobiotekhnologii dlya ochistki stochnyh vod / A. E. Solovchenko [et al.] // Biotekhnologiya. – 2011. – T. 6. – S. 70–88.

6. Chernova, N. I. Vodorosli v kachestve syr'ya dlya biotopliva i ulavlivaniya SO_2 / N. I. Chernova, S. V. Kiseleva // Ustojchivoe razvitie energetiki Respubliki Belarus' : sostoyanie i perspektivy : Mezhdunar. nauch. konf., Minsk, 1– 2 okt. 2020 g. : sb. dokl. / red. T. G. Zorina. – Minsk : Belarus. navuka, 2020. – S. 187–193.

7. Integrirovannye sistemy ispol'zovaniya mikrovodoroslej dlya ochistki stochnyh vod i polucheniya biotopliva / N. I. Chernova [et al.] // Fundamental'nye i prikladnye aspekty geologii, geofiziki i geoekologii s ispol'zovaniem sovremennyh informacionnyh tekhnologij : materialy V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Majkop, 20–24 maya 2019 g. / Majkop.gos. tekhn. un-t ; redkol. : S. K. Kuizheva [et al.]. – Majkop, 2019. – T. 2. – S. 247–258.

8. Prostranstvennyj analiz resursnogo potenciala dlya optimal'nogo razmeshcheniya ob"ektov bioenergetiki / N. I. Chernova [et al.] // Al'ternativnaya energetika i ekologiya. – 2019. – № 22–27. – S. 30–41.

9. Bwapwa, J. K. Jet Fuel from Domestic Wastewater Treatment Using Microalgae: A Review / J. K. Bwapwa, A. Akash, S. Trois // Green Materials for Wastewater Treatment. Environmental Chemistry for a Sustainable Worl. – 2020. – Vol. 38. – P. 321–360.

10. Renewable energy technologies: enlargement of biofuels list and co-products from microalgae / N. I. Chernova [et al.] // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 112. 10010 (1–6).

11. Yahya, L. Screening of native microalgae species for carbon fixation at the vicinity of Malaysian coal-fired power plant / L. Yahya, R. Harun, L. C. Abdullah // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10, № 1. – P. 22–35.

12. Gonzalez-Fernandez, C. Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts. From feedstock Cultivation to End-Products / C. Gonzalez-Fernandez, R. Munoz. – Elsevier Ltd., 2017. – 560 p.

13. Molitor, H. R. Using Simulated Flue Gas to Rapidly Grow Nutritious Microalgae with Enhanced Settleability / H. R. Molitor, J. L. Schnoor // ACS Omega. – 2020. – Vol. 5, № 42. – P. 27269–27277.

14. NASA Predictionof Worldwide Energy Resources [Electronic resource]. – Mode of access : https://power.larc.nasa.gov. – Date of access : 13.06.2021.

15. Quinn, J. C., Geographical Assessment of Microalgae Biofuels Potential in corporating Resource Availability / J. C. Quinn // Bio Energy Research. – 2013. – Vol. 6, № 2. – P. 591–600.

УДК 620.92

Д. Ф. Гайнутдинова[1], Ф. Р. Гайнутдинов[2]

ВОДОРОД КАК ОСНОВА НИЗКОУГЛЕРОДНОЙ ЭКОНОМИКИ

[1]Кандидат химических наук, доцент, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация
[2]Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается водород как основа низкоуглеродной экономики, анализируются экологические ограничения применения водородных технологий.

Ключевые слова: декарбонизация, низкоуглеродная энергия, энергопереход, водородная энергетика, водородные технологии, низкоуглеродный водород.

D. F. Gainutdinova[1], F. R. Gainutdinov[2]

HYDROGEN AS THE BASIS OF A LOW-CARBON ECONOMY

[1]Ph. D. of Chemical Sciences, Associate Professor, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation
[2]Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Annotation. The article considers hydrogen as the basis of a low-carbon economy, analyzes the environmental limitations of the use of hydrogen technologies.

Keywords: decarbonization, low-carbon energy, energy transfer, hydrogen energy, hydrogen technologies, low-carbon hydrogen.

Введение. Глобальная проблема − существенное влияние энергетики на экологию вследствии значительного спроса на энергоносители, приводит к актуализации декарбонизации и трансформации энергобаланса [1].

Рост потребности в энергии определяет поиск и изучение новых источников энергии и инновационных технологий. Из-за возрастающих экологических проблем повышается доля альтернативных и возобновляемых источников энергии в мировом энергетическом балансе. Прогноз топливно-энергетического баланса в мире представлен в таблице.

Прогноз топливно-энергетического баланса в мире на 2020–2050 гг., %

Виды энергоносителей	2020 г.	2030 г.	2050 г.
Нефть	33–34	32–33	28–29
Природный газ	26	26	28
Уголь	27	24	23–24
Прочие	13–14	17–18	19–21

Результаты исследования и их обсуждения. В качестве низкоуглеродных решений в основном рассматривается атомная и газовая энергетика. По мере ужесточения требований трансграничного углеродного регулирования потребность в низкоуглеродной электроэнергии будет расти со стороны секторов добычи и потребления нефти, производства базовой химической продукции, что может привести к конкуренции за «зеленые» источники энергии, способствующие переходу к безуглеродной экономике [2].

В этом плане следует обратить внимание на создание и расширение мощностей, работающих на возобновляемых источниках энергии (увеличение мощностей гидроэлектростанций приведет к затоплению земель), а также на осуществление поиска энергетической мощности для получения «зеленого» водорода. Большинство экспертов высоко оценивают перспективы развития водородных технологий и потенциал его применения в различных отраслях экономики. Для развития водородной экономики требуется расширение возможностей по производству водорода. Пиролиз, плазменная конверсия, термохимические циклы углеводородного сырья относятся к методам получения водорода, при которых отсутствует выбросы углекислого газа, но они энергозатратны, поэтому необходимы новые технологические решения. Электролиз на базе возобновляемых источников энергии является капиталоемкой и перспективной технологией [3].

Заключение. Потеря экологического смысла энергоперехода на водород и одновременное увеличение производственных затрат в экономике произойдет, если при производстве водорода не будут соблюдаться следующие условия: 1) электролиз без использования низкоуглеродной энергии; 2) отсутствие технологий улавливания, утилизации углекислого газа при получении водорода из природного газа. Для обеспечения экологической безопасности производ-

ства водорода путем электролиза необходимо решить вопросы с утилизацией рассола, образующегося в результате дистилляции воды, а также с обеспечением всех процессов низкоуглеродными источниками энергии и с созданием мощностей по получению дистиллированной воды.

Список использованных источников

1. Мясников, Ю. Н. Экология и энергетика будущего / Ю. Н. Мясников // Тр. Крылов. гос. науч. центра. – 2021. – № 2. – С. 159–170.

2. Гарькавый, К. А. Взаимосвязь энергетики, экономики и экологии / К. А. Гарькавый // Тр. Кубан. Гос. аграр. ун-та. – 2013. – № 45. – С. 203–211.

3. Барьеры реализации водородных инициатив в контексте устойчивого развития глобальной энергетики / В. С. Витвиненко [и др.] // Зап. Горного ин-та. – 2020. – № 244. – С. 428–438.

References

1. Myasnikov, Yu. N. Ekologiya i energetika budushchego / Yu. N. Myasnikov // Tr. Krylov. gos. nauch. centra. – 2021. – № 2. – S. 159–170.

2. Gar'kavyj, K. A. Vzaimosvyaz' energetiki, ekonomiki i ekologii / K. A. Gar'kavyj // Tr. Kuban. gos. agrar. un-ta. – 2013. – № 45. – S. 203–211.

3. Bar'ery realizacii vodorodnyh iniciativ v kontekste ustojchivogo razvitiya global'noj energetiki / V. S. Vitvinenko [et al.] // Zap. Gorn. in-ta. – 2020. – № 244. – S. 428–438.

УДК: 620.9

Е. О. Каменская

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассматривается состояние возобновляемой энергетики в Республике Беларусь. Приведены примеры действующих установок по использованию ВИЭ.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, возобновляемые источники энергии, энергоэффективность экономики.

E. O. Kamenskaya

THE USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE REPUBLIC OF BELARUS

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Annotation: The article discusses the state of renewable energy in the Republic of Belarus. Examples of existing installations for the use of renewable energy are given.

Keywords: renewable energy, renewable energy sources, energy efficiency of the economy.

Введение. Республика Беларусь признает ключевую роль современных энергоэффективных и углеродонейтральных технологий в успешном экономическом развитии каждой страны и всего мирового сообщества. Наряду с мировым сообществом Беларусь непрерывно осуществляет модернизацию и внедряет инновации в энергетическом секторе страны, включая меры по развитию возобновляемой энергетики и замещению ископаемого топлива возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ). Для Республики Беларусь, в полной мере не обеспеченной собственными топливно-энергетическими ресурсами, важно отслеживать мировые энергетические тренды и анализировать их влияние на экономику страны для выработки рациональной энергетической политики.

Результаты исследования и их обсуждение. Одной из ключевых движущих сил развития возобновляемой энергетики является желание максимально уменьшить последствия воздействия традиционной энергетики на окружающую нас среду. В связи с тем, что интенсивная добыча, переработка и транспортировка нефтепродуктов и газа приводят к большой нагрузке на природную среду, один из главных факторов мировых энергетических стратегий – устойчивое развитие энергетической отрасли с высоким уровнем природоохранных мероприятий.

Принцип устойчивого развития энергетики формировался в ходе осознания обществом проблем состояния природной среды. Это – конструктивная реакция общества на наблюдаемые и активно освещаемые в научных публикациях и средствах массовой информации процессы деградации природы под усиленным антропогенным давлением.

С начала 1990-х годов в Республике Беларусь проводится целенаправленная работа по созданию государственной системы повышения энергоэффективности экономики: созданы законодательная база, институциональные структуры, механизмы государственной поддержки и стимулирования, система целевых показателей и государственных программ с мониторингом их выполнения. Главный приоритет энергетической политики Беларуси – повышение эффективности использования энергии как средства для снижения затрат общества на энергоснабжение, обеспечения устойчивого развития страны, повышения конкурентоспособности производительных сил и охраны окружающей среды.

В настоящий момент в Республике Беларусь действуют 102 солнечные установки общей мощностью 272,37 МВт (крупнейшая является Чериковская солнечная станция мощностью 109 МВт); 55 гидроэлектростанций (ГЭС) мощностью 98,36 МВт (крупнейшая Витебская ГЭС мощностью 40 МВт); 114 ветроэнергетических установок (ВЭУ) мощностью 129,71 МВт (крупнейший ветропарк (шесть объединенных ВЭУ) в Новогрудском районе, 9 МВт, РУП «Гродноэнерго»); 39 биогазовых установок мощностью 42,31 МВт (крупнейший биогазовый комплекс в СПК «Рассвет имени Орловского», 4,8 МВт); 100 установок, использующих энергию биомассы с сумарной тепловой мощностью 275,71 МВт, электрической мощностью около 186,39 МВт.

Возобновляемая энергетика в нашей стране не рассматривается в качестве прямого конкурента традиционным углеводородам. Использование ВИЭ –

осознанная необходимость. Данное направление является элементом государственной политики в стране. По мнению международных экспертов, идеальное соотношение между видами электрогенерации в энергосистеме должно быть в равных пропорциях: по 25 % на атомные станции, природный газ, использование переработки отходов и возобновляемых источников энергии. Страны, которые достигнут этого баланса, обеспечат свою энергетическую безопасность. Использование ВИЭ должно рассматриваться в контексте экономической и экологической целесообразности, а также с учетом социального фактора.

Заключение. Такие очевидные преимущества ВИЭ, как неисчерпаемость и экологическая безопасность, пока не могут безоговорочно перевесить технически отработанные и более дешевые методы получения энергии на базе органического топлива. Вместе с тем для Республики Беларусь, экономика которой базируется преимущественно на импорте традиционных энергоресурсов, эффективность использования или замены последних является одним из определяющих факторов производства конкурентоспособной продукции и в конечном итоге – достигнутого благосостояния общества. Поэтому для повышения энергоэффективности национальной экономики приоритет имеет реализация комплекса мероприятий энергосберегающей политики на основе максимально возможного и экономически целесообразного вовлечения в топливно-энергетический баланс местных видов топлива, вторичных энергоресурсов и ВИЭ.

Вовлечение в хозяйственный оборот ВИЭ является составляющей национальной стратегии энергосбережения, цель которой заключается в реализации правовых, научных, организационных, производственных, технических и экономических мер, направленных на повышение эффективности использования энергетических ресурсов.

Список использованных источников

1. Ковалев, М. М. Будущее белорусской энергетики на фоне глобальных трендов / М. М. Ковалев, А. С. Кузнецов. – Минск : БГУ, 2018. – 223 с.

2. Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://195.50.7.239/Cadastre/Map. – Дата доступа : 10.09.2022.

3. Департамент по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://energoeffect.gov.by/programs. – Дата доступа : 15.09.2022.

4. Цилибина, В. О состоянии и перспективах развития возобновляемых источников энергии в мире и Беларуси. [Электронный ресурс] / В. Цилибина // Портал Нефтехимия. – Режим доступа : https://belchemoil.by/news/analitika/vozobnovlyaemaya-energetika-stanovitsya-samym-bystro-razvivayushhimsya-vidom-generacii. – Дата доступа : 20.09.2022.

References

1. Kovalev, M. M. Budushchee belorusskoj energetiki na fone global’nyh trendov / M. M. Kovalev, A. S. Kuznecov. – Minsk : BGU, 2018. – 223 s.

2. Ministerstvo prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus’ [Electronic resource]. – Mode of access : http://195.50.7.239/Cadastre/Map. – Date of access : 10.09.2022.

3. Departament po energoeffektivnosti Gosudarstvennogo komiteta po standartizacii Respubliki Belarus' [Electronic resource]. – Mode of access : https://energoeffect.gov.by/programs. – Date of access : 15.09.2022.

4. Cilibina, V. O sostoyanii i perspektivah razvitiya vozobnovlyaemyh istochnikov energii v mire i Belarusi. [Electronic resource] / V. Cilibina // Portal Neftekhimiya. – Mode of access : https://belchemoil.by/news/analitika/vozobnovlyaemaya-energetika-stanovitsya-samym-bystro-razvivayushhimsya-vidom-generacii. – Date of access : 20.09.2022.

УДК 62-233

О. Н. Лабкович, С. Г. Погирницкая

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МАЛОЙ ВЕТРОУСТАНОВКИ ПРИ МАЛОЙ СКОРОСТИ ВЕТРА

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассматриваются способы повышения эффективности работы малой ветроустановки. Экспериментально показано, что применение на валу ветроустановки магнитожидкостных подшипников с добавлением в магнитную жидкость многослойных углеродных нанотрубок позволяет выходить на номинальный режим при меньших скоростях набегающего потока воздуха.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, ветроэнергетическая установка, магнитожидкостный подшипник, магнитная жидкость, многослойные углеродные нанотрубки.

O. N. Labkovich, S. G. Pogirnitskaya

IMPROVING THE EFFICIENCY OF A SMALL WIND TURBINE AT LOW WIND SPEEDS

Belorussian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. Ways to improve the efficiency of a small wind turbine are considered. It has been experimentally shown that the use of magnetic fluid bearings on the shaft of a wind turbine with the addition of multilayer carbon nanotubes to the magnetic fluid makes it possible to reach the nominal mode at lower speeds of the incoming air flow.

Keywords: renewable power engineering, wind turbine, magnetic fluid bearing, magnetic fluid, multilayer carbon nanotubes.

Введение. Альтернативой или дополнением к традиционной энергетике, основанной на сжигании углеводородов, может быть энергетика, использующая возобновляемые ресурсы. Ветер присутствует во всех точках планеты, однако проблемы в использовании этого ресурса ветроустановками возникают, когда скорость ветра невелика, и вследствие этого ветроколеса не вращаются. Поэтому при проектировании ветроэнергетических установок (ВЭУ) стремятся уменьшить момент страгивания, чтобы при меньших скоростях выйти на номинальный режим ветрогенератора. Авторы предлагают применить магнитожидкостные подшипники. Кроме уменьшения трения магнитожидкостные подшипники

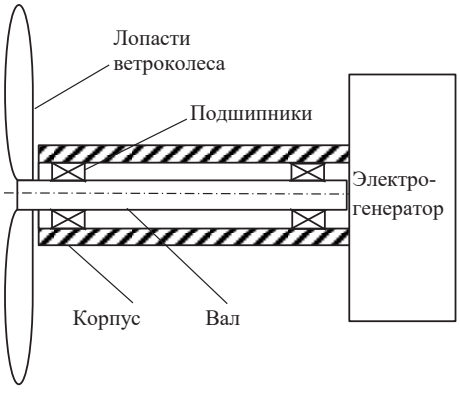


Рис. 1. Схема ветрогенератора

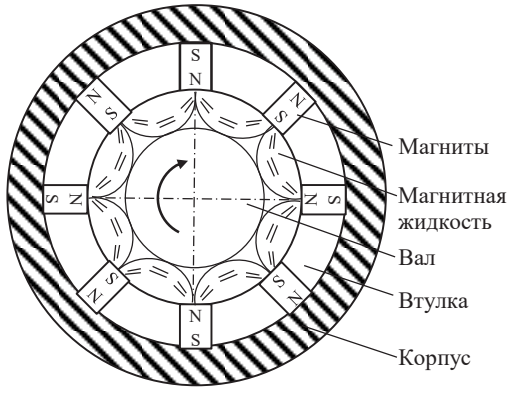


Рис. 2. Схема узла магнитожидкостного радиального подшипника скольжения

дополнительно дают демпфирующий и защитный эффекты. Эффекты усиливаются, если добавить в магнитную жидкость многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ).

Рассматриваются ветроустановки мощностью 3÷5 кВт с весом ротора до 90 Н. Такие ветроустановки можно применять в различных хозяйствах, коттеджах. Под действием ветра ветроколесо вращается, вращение вала передается электрогенератору, где вырабатывается электрический ток (рис. 1). Предлагается вместо традиционных шарикоподшипников установить магнитожидкостные подшипники (рис. 2).

Магнитная жидкость представляет собой коллоидный раствор в жидкости–носителе магнитных частиц размером порядка 10 нм, покрытых поверхностно-активным веществом для предотвращения слипания. Магнитная жидкость обладает свойствами жидкости и способностью взаимодействовать с магнитным полем. Эти свойства дают возможность использовать магнитные жидкости в различных технических устройствах, таких как уплотнения, демпферы, подшипники. Магнитная жидкость в магнитожидкостных подшипниках удерживается магнитным полем.

Результаты исследования и их обсуждение. Экспериментальные исследования проводились в аэродинамической трубе. Исследовалась модель горизонтально-осевой ветроэнергетической установки с тремя лопастями. Вал установки устанавливался на двух подшипниках. На расстоянии 50 мм от подшипника со стороны набегающего потока воздуха к валу крепились три лопасти диаметром 200 мм. Общий вес ротора (вал, лопасти, система генератора) составлял 9 и 14 Н. Изучалось влияние подшипников на время выхода ВЭУ на номинальную мощность. Были применены щарикоподшипники 206 ГОСТ 520-2011 (*1*), магнитожидкостные подшипники с магнитной жидкостью на трансформаторном масле и магнетите намагниченностью насыщения 50 кА/м ММт-50 (*2*) и магнитожидкостные подшипники с добавлением в магнитную жидкость многослойных углеродных нанотрубок диаметром 70÷300 нм, длиной 0.01÷20 мкм

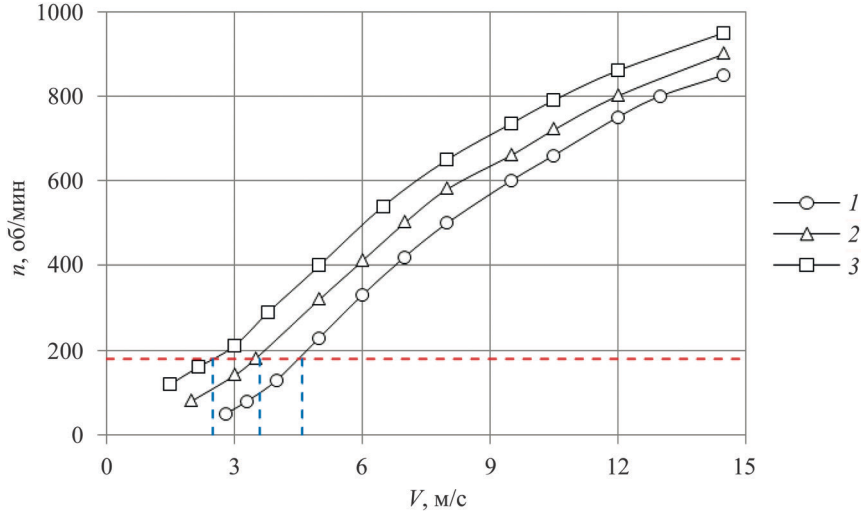


Рис. 3. Зависимость числа оборотов ротора ВЭУ (*n*) от скорости набегающего потока (*V*): *1* – шарикоподшипники; *2* – магнитожидкостные подшипники (ММт-50); *3* – магнитожидкостные подшипники (ММт-50 + 0,5 % МУНТ)

с весовой концентрацией 0,5 % ММт-50+0,5 МУНТ (*3*). Скорость потока воздуха в аэродинамической трубе плавно регулировалась от 0 до 15 м/с и измерялась термоанемометром ТКА-ПКМ. Скорость вращения ротора ВЭУ – фототахометром ДТ-2234С. Экспериментально было установлено, что модель ВЭУ стабильно вырабатывает электроэнергию при оборотах вращения ротора n = 180 об/мин (номинальная мощность) и выше. На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости числа оборотов ротора ВЭУ от скорости набегающего потока после стояночного режима в течение 24 часов.

Для подшипников выход генератора ВЭУ для ротора весом 9 Н на номинальную мощность (n = 180 об/мин) наблюдался при скорости потока воздуха $V_{ном}$ = 4,6 м/с (кривая *1*). Установка ротора на магнитожидкостные подшипники с магнитной жидкостью ММт-50, работающие в гидродинамическом режиме смазки, снизила скорость $V_{ном}$ до 3,6 м/с (кривая *2*). Введение в магнитную жидкость многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) позволило получить максимальный эффект снижения по сравнению с шарикоподшипниками: $V_{ном}$ = 2,6 м/с (кривая *3*). При весе ротора 14 Н для шарикоподшипников $V_{ном}$ = 4,6 м/с, магнитожидкостных подшипников с ММт-50 (граничный режим смазки) $V_{ном}$ = 4,2 м/с, магнитожидкостных подшипников с ММт-50+0,5 % МУНТ (граничный режим смазки) $V_{ном}$ = 3,2 м/с. Нанотрубки в стояночном режиме препятствуют образованию структур из частиц магнетита, снижая вязкое трение. При граничном режиме смазки структуры из нанотрубок проявляют смазочные свойства.

Заключение. Таким образом, магнитожидкостные подшипники, обеспечивая более низкие собственные потери на трение по сравнению с шарикопод-

шипниками, позволяют ВЭУ выходить на номинальный режим при меньших скоростях набегающего потока воздуха. Добавки МУНТ 0,5 % в магнитную жидкость ММт-50 увеличивают эффект до 45 %. ВЭУ небольшой мощности может эффективно работать при малой скорости ветра.

Список использованных источников

1. Червинский, В. Л. Энергооценка вероятностного распределения энергетических штилей / В. Л. Червинский, С. Г. Погирницкая, С. Латушкин // Информационные технологии в политических, социально-экономических и технических системах : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 22 апр. 2022 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Г. М. Бровка (пред. редкол.) [и др.] ; сост. А. В. Садовская. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 224–227.

2. Берковский, Б. М. Магнитные жидкости / Б. М. Берковский, В. Ф. Медведев, М. С. Краков. – М. : Химия, 1989. – 240 с.

3. Лабкович, О. Н. Виброзащитные характеристики магнитожидкостных радиальных подшипников скольжения / О. Н. Лабкович [и др.] // XX Юбилейная Всерос. с междунар. участием Плесская науч. конф. по нанодисперсным магнитным жидкостям : сб. науч. тр. / Иванов. гос. энергет. ун-т имени В. И. Ленина. – Иваново, 2022. – С. 292–299.

4. Елецкий, А. В. Механические свойства углеродных нанотрубок и материалов на их основе / А. В. Елецкий // Успехи химии. – 2007. – Т. 177, № 3. – С. 233–274.

References

1. Chervinskij, V. L. Energoocenka veroyatnostnogo raspredeleniya energeticheskih shtilej / V. L. CHervinskij, S. G. Pogirnickaya, S. Latushkin // Informacionnye tekhnologii v politicheskih, social'no-ekonomicheskih i tekhnicheskih sistemah : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Minsk, 22 apr. 2022 g. / Belorus. nac. tekhn. un-t ; redkol.: G. M. Brovka (pred. redkol.) [et al.] ; sost. A. V. Sadovskaya. – Minsk : BNTU, 2022. – S. 224–227.

2. Berkovskij, B. M. Magnitnye zhidkosti / B. M. Berkovskij, V. F. Medvedev, M. S. Krakov. – M. : Himiya, 1989. – 240 s.

3. Labkovich, O. N. Vibrozashchitnye harakteristiki magnitozhidkostnyh radial'nyh podshipnikov skol'zheniya / O. N. Labkovich [et al.] // HKH Yubilejnaya Vseros. s mezhdunar. uchastiem Plesskaya nauch. konf. po nanodispersnym magnitnym zhidkostyam : sb. nauch. tr. / Ivanov. gos. energet. Un-t imeni V. I. Lenina. – Ivanovo, 2022. – S. 292–299.

4. Eleckij, A. V. Mekhanicheskie svojstva uglerodnyh nanotrubok i materialov na ih osnove / A. V. Eleckij // Uspekhi himii. – 2007. – T. 177, № 3. – S. 233–274.

УДК 620.92(075.8)

А. В. Новик[1], А. А. Бибик[2]

ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В РАМКАХ НАПРАВЛЕНИЯ «АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА»

[1]Кандидат физико-математических наук, Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь,
[2]Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений энергетики в наше время бесспорно является альтернативная энергетика. Подготовка специалистов по специально-

сти «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» и ряда других специальностей энергетического профиля, наряду с популяризацией использования возобновляемых источников энергии, должна предусматривать получение знаний о практическом применении и использовании современных технологий и методов преобразования энергии.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, энергоэффективные технологии, возобновляемые источники энергии, преобразование энергии.

A. V. Novik[1], A. A. Bibik[2]

INCREASING THE LEVEL OF TRAINING OF SPECIALISTS WITHIN THE DIRECTION "ALTERNATIVE ENERGY"

[1]Ph. D. in Physics and Mathematics Sciences, Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
[2]Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. One of the most intensively developing areas of energy in our time is undoubtedly alternative energy. The training of specialists in the specialty "Energy Efficient Technologies and Energy Management" and a number of other specialties of the energy profile, along with the promotion of the use of renewable energy sources, should provide for obtaining knowledge about the practical application and use of modern technologies and methods of energy conversion.

Keywords: alternative energy, energy efficient technologies, renewable energy sources, energy transformation.

Введение. Демонстрационная площадка альтернативной энергетики служит для реализации одного из актуальных направлений подготовки будущих специалистов. Целесообразно, чтобы программа обучения высококвалифицированных специалистов в сфере энергетики предусматривала получение не только теоретических знаний, но и выполнение практических лабораторных работ. С учетом ярко выраженной сезонности климата Республики Беларусь лабораторный практикум рационально формировать из двух составляющих.

Выполнение лабораторных работ в рамках учебной лаборатории.

В рамках учебной лаборатории выполняются лабораторные работы на имеющихся экспериментальных установках, позволяющих с определенной степенью достоверности моделировать природные условия.

Это дает возможность получить хорошую корреляцию теоретических знаний с экспериментальными результатами. Однако не следует упускать из виду, что полученные в таких условиях экспериментальные результаты (в определенной степени) можно оценивать, как полученные в идеальных условиях. В ходе выполнения работ по изучению энергопотенциала Солнца в рамках лаборатории практически невозможно воспроизведение целого ряда природных факторов, влияющих на эффективность использования тех или иных устройств. В частности, практически невозможно точное воспроизведение спектрального состава солнечного излучения и его изменения в зависимости от облачности и времени года. Сложно воспроизвести изменение интенсивности падающего излучения в зависимости от времени суток и т. д.

Выполнение целого ряда учебных работ на специальной демонстрационной площадке в условиях, максимально соответствующих условиям реальной эксплуатации тех или иных энергетических установок с учетом сезонных изменений и климатических особенностей Беларуси.

Материалы и методы исследования. В качестве аппаратной оснащенности предлагается следующая конфигурация.

Демонстрационная площадка состоит из двух модулей – атмосферного и лабораторного модуля.

Атмосферный модуль с расположенными на нем солнечными панелями, ветрогенератором и воздушным коллектором служит для получения параметров вырабатываемой энергии в реальных условиях эксплуатации с учетом региональных условий (скорости ветра, температуры, активности солнечного излучения и т. д.).

Лабораторный модуль предназначен для анализа информации и проведения функциональной диагностики: сбор поступающей информации от каждой установки атмосферного модуля, обработка данных за любой период проведения наблюдений, построение графических зависимостей от времени года, суток, поры года и круглогодичных параметров.

В случае необходимости расширения функционального назначения демонстрационной площадки при проектировании атмосферного модуля можно рассматривать различные варианты моделей оборудования и его размещения для оценки эффективности его использования. Для фотоэлектрических преобразователей и солнечных коллекторов предусмотреть использование трекерной системы слежения за солнцем. Для ветрогенератора – сравнение эффективности различных типов лопастей, минимальной скорости ветрового потока для начала выработки энергии и т. д.

При проектировании лабораторного модуля можно рассматривать автоматизированные расчеты для подбора оборудования и обработки экспериментальных данных в программе MATLAB. MATLAB – пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений. Пакет используют более миллиона инженерных и научных работников, он работает на большинстве современных операционных систем, включая Linux, Mac OS, Solaris и Windows [1].

Лабораторный модуль включает в себя возможность проведения функциональной диагностики фотопреобразователей (ФЭП), предлагаемых к использованию в сборке солнечных панелей с использованием имитатора солнечного излучения.

Результаты исследования и их обсуждение. При таком оснащении демонстрационная площадка позволит обеспечить:

обучение и проведение практики и лабораторных работ студентов по специализации «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» и других;

повышение квалификации технических кадров предприятий среднего и малого бизнеса, энергетики и сельского хозяйства;

накопление и систематизацию новых знаний в области использования возобновляемых источников энергии (база данных), консультирование специалистов и населения по этим вопросам;

проведение научно-исследовательских работ по совершенствованию и оценке сравнительной эффективности использования в условиях Республики Беларусь установок, работающих на возобновляемых источниках энергии.

Важными направлениями обеспечения энергетической безопасности и эффективного использования топливно-энергетических ресурсов являются вопросы повышения квалификации специалистов, работающих в сфере энергетики и управления [2].

Современная концепция образовательной системы предполагает интегрированный подход, обеспечивающий требуемый уровень образования. Для реализации этой концепции появится возможность проводить повышение квалификации как специалистов, работающих непосредственно в сфере применения возобновляемых источников энергии (ВИЭ), так и руководителей предприятий, учебных заведений, организаций и преподавателей системы Министерства образования.

Заключение. Создание демонстрационной площадки ВИЭ позволит учебному заведению или предприятию решить следующие актуальные задачи:

создать современную материально-техническую базу для обучения студентов, проведения курсов и семинаров по повышению квалификации специалистов, проведения научно-практических конференций, совещаний и выставок оборудования ВИЭ;

организовать компетенц-центр по возобновляемой энергетике, задачами которого будет оказание услуг предприятиям, организациям, населению по выбору оптимального варианта энергообеспечения с использованием ВИЭ, разработка соответствующих проектов, оказание консультационных услуг.

Эффективность использования энергии ветра и солнца в значительной степени зависит не только от потенциальных ресурсов, но и от выбора места установки, экономичности строительства и эксплуатации оборудования. Возведение более мощных агрегатов соответствует мировым тенденциям развития энергетики, что требует более тщательного анализа условий эксплуатации оборудования, так как даже незначительные просчеты при проектировании могут привести к снижению эффективности выработки энергии и значительным экономическим потерям. Проведение анализа технических требований к проектированию установок ВИЭ, расчетов экономических показателей строительства и эксплуатации, а также выполнение требований по снижению экологического воздействия разрабатываемых систем повышает эффективность и безопасность [3].

Список использованных источников

1. Лосюк, Ю. А. Нетрадиционные источники энергии / Ю. А. Лосюк, В. В. Кузьмич. – Минск : Технопринт, 2005. – 10 с.

2. Альтернативные источники энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://alternattiveenergy.com/alternativnye-istochniki-jenergii/jenergija-solnca. – Дата доступа : 05.04.2022.

3. Баштовой, В. Г. Методическое пособие для разработки раздела дипломного проекта Экономика: обоснование инвестиций в энергосберегающие мероприятия : метод. пособие / В. Г. Баштовой, Е. А. Милаш. – Минск : БНТУ. – 2012. – 88 с.

References

1. Losyuk, Yu. A. Netradicionnye istochniki energii / Yu. A. Losyuk, V. V. Kuz'mich. – Minsk : Tekhnoprint, 2005. – 10 s.

2. Al'ternativnye istochniki energii [Electronic resource]. – Mode of access : https://alternattiveenergy.com/alternativnye-istochniki-jenergii/jenergija-solnca. – Date of access : 05.04.2022.

3. Bashtovoj, V. G. Metodicheskoe posobie dlya razrabotki razdela diplomnogo proekta Ekonomika: obosnovanie investicij v energosberegayushchie meropriyatiya : metod. posobie / V. G. Bashtovoj, E. A. Milash. – Minsk : BNTU. – 2012. – 88 s.

УДК 620.9

В. Л. Червинский[1], В. В. Дюров[2], Э. Э. Роа[3]

ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МАЛЫХ ВЕТРОЭНЕРГОУСТАНОВОК

[1]Кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

[2,3]Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Статья посвящена анализу возможностей повышения коэффициента использования установленной мощности для малых ветроэнергоустановок путем применения инновационного ветроколеса, обладающего высоким крутящим моментом на низких оборотах.

Ключевые слова: ветроэнергоустановка, коэффициент использования установленной мощности, ветроколесо поперечно-крыльчатое.

V. L. Charvinski[1], V. V. Dyurov[2], H. E. Roa[3]

SPECIFICS OF INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF SMALL WIND POWER PLANTS

[1]Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

[2,3]Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The article is devoted to the analysis of the possibilities of increasing the installed capacity utilization factor for small wind turbines by using an innovative wind turbine with high torque at low rotation speeds.

Keywords: wind turbine, installed capacity utilization factor, cross-vane wind turbine.

Введение. Одним из способов решения проблемы декарбонизации в энергетическом секторе является расширение применения ветроэнергоустановок (ВЭУ). Традиционно об энергоэффективности их работы можно судить по коэффициенту использования установленной мощности (КИУМ). Для случая работы ВЭУ

как с сетью, так и с автономным потребителем встает вопрос интеграции ее работы в соответствии с графиком суточной нагрузки энергосистемы или потребителя. Естественно, для увеличения КИУМ необходим накопитель энергии.

Повышение показателя КИУМ для ВЭУ – это комплексная задача, которая состоит из целого ряда подзадач:

выбор места размещения ВЭУ;

оптимизация аэродинамических решений для ветроколеса;

оптимизация технических характеристик для ветрогенератора;

применение накопителя электрической или тепловой энергии в зависимости от задачи, решаемой ВЭУ.

Выбор места размещения ВЭУ предполагает выбор не только географической точки местности, но и также соответствующей модели ветротурбины, которая наилучшим образом будет подходить для этой точки местности. Для выявления энергооценки данной точки местности необходимо на основании годового тренда статистических измерений скоростей ветра, характерных для данной точки местности, построить статистическое распределение Вейбулла. Это позволит определить наиболее вероятную скорость ветра, что необходимо для правильного выбора параметров ветроколеса. Естественно, что при снижении стартовой скорости ветра возрастает КИУМ. Известен способ расчета КИУМ на основании построения графика зависимости времени появления определенной скорости ветра для данной величины скорости ветра (рис. 1).

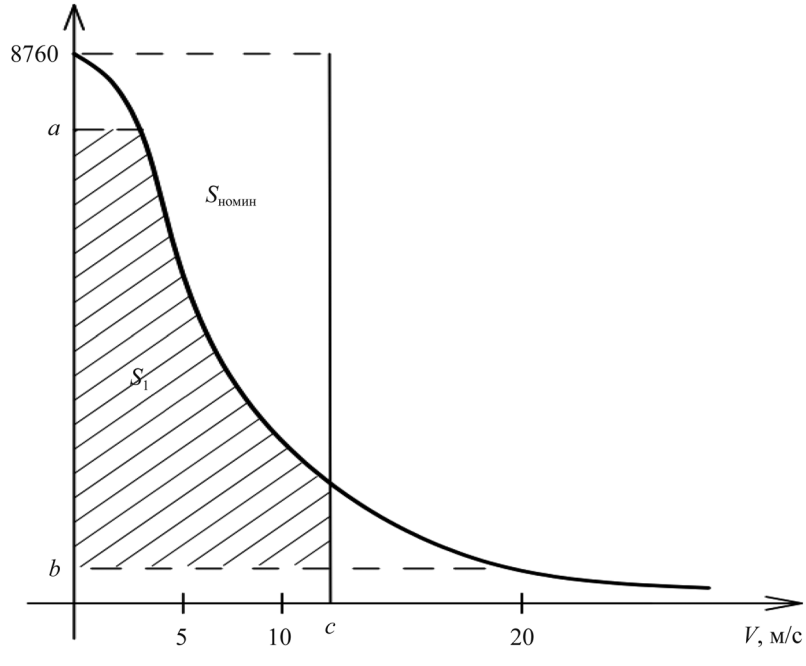


Рис. 1. График зависимости времени появления определенной скорости ветра от величины этой скорости

Зная скорость ветра, при которой ветроустановка выдает номинальную мощность, можно определить коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) для ветроэнергоустановки, работающей в данной точке местности. Он будет равен отношению площадей:

$$\text{КИУМ} = S_1/S_{\text{номин}},$$

где точка *a* – это точка равная числу часов работы ВЭУ при минимальной скорости ветра, равной скорости начала вращения; точка *b* – это скорость ветра, при которой ВЭУ отключается по соображениям безопасности из-за большой скорости ветра; точка *c* – это номинальная скорость ветра, при которой ВЭУ достигает номинальной мощности.

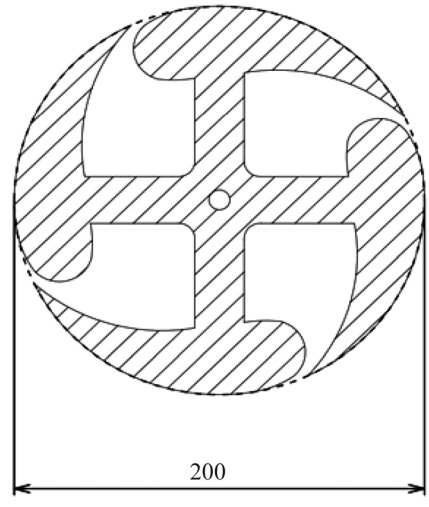


Рис. 2. Экспериментальное ветроколесо с низкой стартовой скоростью вращения

Для исследования максимального снижения скорости ветра, при которой начинает вращаться ветроколесо, была сделана примерная модель инновационного ветроколеса согласно белорусскому патенту «Ветроколесо поперечно-крыльчатое» [1].

Внешний вид его приведен на рис. 2. Продувки в аэродинамической трубе показали, что скорость ветра для начала вращения составила 1,6 м/с, что гораздо ниже, чем у обычного репеллерного двухлопастного ветроколеса такого же диаметра.

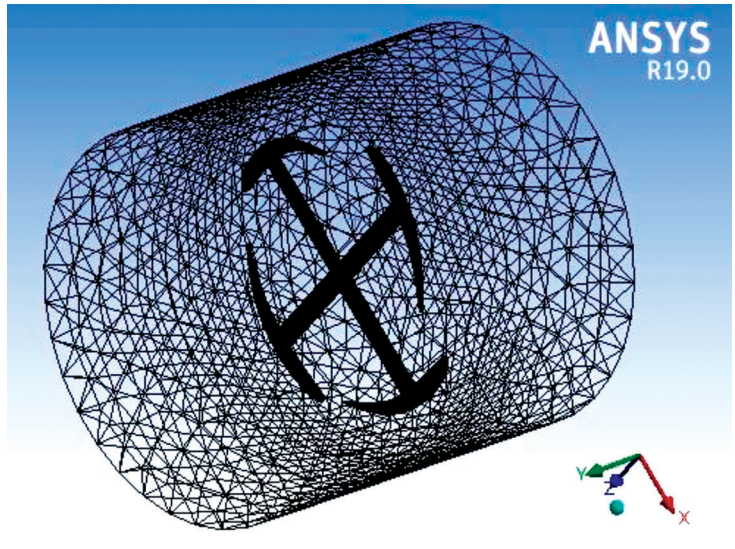


Рис. 3. Инновационное ветроколесо в аксонометрической проекции ANSYS

Для дальнейшего моделирования была изготовлена физическая модель этого ветроколеса, а также его математическая модель в программе ANSYS (рис. 3).

Заключение. Цель дальнейшего физического и математического моделирования заключается в оптимизации технико-экономических параметров ветроколеса при заданных ограничениях.

Список использованных источников

Ветроколесо поперечно-крыльчатое : пат. BY 21234 C1 / И. Д. Иванцов. – Опубл. 18.04.2017 г.

References

Vetrokoleso poperechno-kryl'chatoe : pat. BY 21234 C1 / I. D. Ivancov. – Opubl. 18.04.2017 g.

УДК 620.92

В. Л. Червинский[1], А. В. Трацевский[2], Н. А. Трацевский[3]

ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

[1]Кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь
[2]УП «Солар Инвест», Минск, Республика Беларусь
[3]Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Статья посвящена анализу одного малоизученного явления, влияющего на производительность солнечных электрических станций, – эффекта «марева», или «миража». Данный эффект проявляется в жаркую погоду и вызывает отражение части солнечных лучей от слоя нагретого воздуха непосредственно над поверхностью солнечных панелей. Это может вызывать снижение производительности солнечной станции до 10 %.

Ключевые слова: солнечные электрические станции, солнечные панели, «марево», производительность солнечной станции.

V. L. Charvinski[1], A. V. Tratcevski[2], N. A. Tratcevski[3]

FEATURES OF INCREASING THE ENERGY EFFICIENTY OF SOLAR POWER PLANTS

[1]Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
[2]JSC «Solar Invest», Minsk, Republic of Belarus
[3]Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The article is devoted to the analysis of one little-studied phenomenon that affects the performance of solar power plants – the "haze" or "mirage" effect. This effect manifests itself in hot weather and causes part of the sun's rays to be reflected from a layer of heated air directly above the surface of the solar panels. This can cause a decrease in the performance of the solar station up to 10 %.

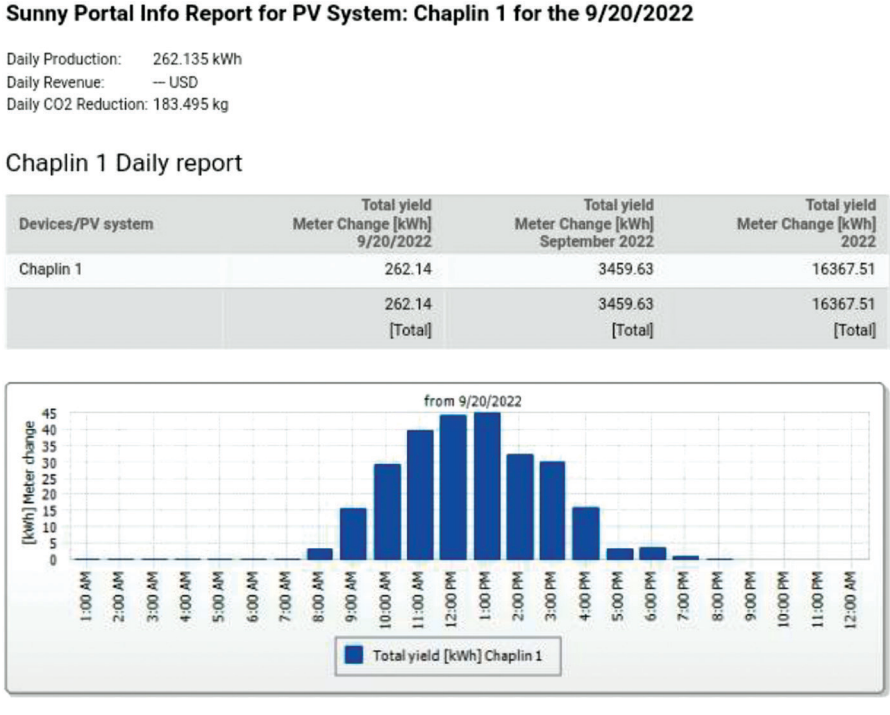
Keywords: solar power stations, solar panels, haze, solar station performance.

Введение. Применение источников распределенной генерации вносит неоспоримый вклад в снижение выбросов парниковых газов и решение проблемы декарбонизации. Однако при развитии источников распределенной генерации возникают проблемы. Во-первых, это проблема ее интеграции с энергосистемой, а во-вторых, это проблемы интеграции с потребителем в случае автономной работы. В том и другом случае возникает необходимость обеспечения энергоэффективной работы самих источников распределенной генерации.

Результаты исследования и их обсуждение. Рассмотрим особенности повышения энергоэффективности солнечных электростанций. В настоящее время практически все солнечные электростанции в республике работают в автоматическом режиме и ведут суточные отчеты о выработанной электроэнергии и о дневном количестве снижения выбросов CO_2 (Daily CO_2 reduction). Эти данные можно посмотреть на примере солнечной станции «Чаплин 1», расположенной в Гомельской области. Они представлены на рис. 1.

Для солнечных электростанций помимо традиционных способов повышения энергоэффективности работы можно описать проблему, которая снижает энергоэффективность ее работы. Дело в том, что при высокой солнечной инсоляции и высокой температуре окружающего панели воздуха над поверхностью панелей возможно возникновение эффекта «марева», или миража (рис. 2).

Такое состояние нагретых слоев воздуха над солнечными панелями возникает в жаркую безветренную погоду. Температура воздуха над панелями



Sunny Portal Info Report for PV System: Chaplin 1 for the 9/20/2022

Daily Production: 262.135 kWh
Daily Revenue: --- USD
Daily CO2 Reduction: 183.495 kg

Chaplin 1 Daily report

Devices/PV system	Total yield Meter Change [kWh] 9/20/2022	Total yield Meter Change [kWh] September 2022	Total yield Meter Change [kWh] 2022
Chaplin 1	262.14	3459.63	16367.51
	262.14 [Total]	3459.63 [Total]	16367.51 [Total]

Рис. 1. Типичный суточный отчет по работе солнечной электростанции



Рис. 2. Эффект «миража» на поверхности фотовольтаических панелей



Рис. 3. Тестирование температуры поверхности фотовольтаических панелей тепловизором

может превышать 40 °С (рис. 3). При этом температура окружающего станцию воздуха будет в районе 30–33 °С.

Данный эффект приводит к снижению эффективности работы солнечных панелей из-за их перегрева.

Заключение. Из-за кумулятивного эффекта нагрева фотовольтаических панелей температура в центральной области солнечной станции превышает ее значение в граничных областях на 5–8 °С. По этой причине площадку для проектирования солнечной станции необходимо выбирать в хорошо обдуваемых ветром местах или сами фотовольтаические панели располагать рядами, параллельно преимущественному направлению движения ветровых потоков в месте расположения солнечной станции.

Список использованных источников

1. Sunny Portal [Electronic resource]. – Mode of access : https://www.sma.de. – Date of access : 04.04.2022.

2. Фаренбрух, А. Солнечные элементы: Теория и эксперимент / А. Фаренбрух, Р. Бьюб. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.

References

1. Sunny Portal [Electronic resource]. – Mode of access : https://www.sma.de. – Date of access : 04.04.2022.

2. Farenbruh, A. Solnechnye elementy: Teoriya i eksperiment / A. Farenbruh, R. B’yub. – M. : Energoatomizdat, 1987. – 280 s.

УДК 620.16

Г. И. Беляева[1], М. Г. Зиганшин[2]

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОДИНАМИКИ ПОТОКОВ В МУЛЬТИЦИКЛОНАХ В СОСТАВЕ КОМПЛЕКСНОГО ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

[1]ООО «Газпром трансгаз Казань», Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация
[2]Доктор технических наук, профессор, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Аннотация. Повышение технико-экономических характеристик газотурбинных установок обусловило их широкое распространение в последние годы в топливной и энергетической отраслях ТЭК России. Вместе с тем повышение энергетической и экологической эффективности магистральных и городских газотранспортных систем, а также систем топливоподготовки ТЭС крупных городов остаются актуальными и на сегодняшний день. Комплексное воздухоочистительное устройство (КВОУ) обеспечивает поступление в газотурбинную установку или газоперекачивающий агрегат подготовленного атмосферного воздуха, очищенного от взвесей до класса PM 2,5 включительно. В данной работе рассматривается эффективность применения циклонов и рукавных фильтров в составе КВОУ в качестве элементов, замещающих ступени грубой и тонкой очистки. Целью замещения является повышение надежности работы КВОУ за счет увеличения долговечности элементов обеих ступеней очистки при сохранении габаритов и повышении степени очистки.

Ключевые слова: комплексное воздухоочистительное устройство, газотурбинная установка, вычислительная гидродинамика, модель турбулентности, циклонные элементы.

G. I. Belyaeva[1], M. G. Ziganshin[2]

NUMERICAL STUDIES OF FLOW AERODYNAMICS IN MULTICYCLONES AS PART OF AN INTEGRATED AIR CLEANING DEVICE

[1]OOO Gazprom Transgaz Kazan, Kazan, Russian Federation
[2]Doctor of Engineering Science, professor, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Annotation. The increase in the technical and economic characteristics of gas turbine installations has led to their widespread use in recent years in both the fuel and energy sectors of the fuel and energy complex of Russia. At the same time, increasing the energy and environmental efficiency of trunk and urban gas transmission systems, as well as fuel treatment systems of thermal power plants in large cities, is an urgent problem today. A complex air integrated cleaning device (IACD) ensures the supply of prepared atmospheric air purified from suspensions of class PM 2.5 to a gas turbine installation

or gas pumping unit. In this paper, the effectiveness of the use of a multicyclone filter as part of a IACD with elements combining the stages of coarse and fine cleaning is considered. Combining two stages of cleaning in one device will lead to a reduction in the size of the IACD, ease of maintenance and increased reliability.

Keywords: integrated cleaning device, gas turbine installation, computational fluid dynamics, turbulence model, cyclone elements.

Введение. Как известно, около 60 % мощности газотурбинной установки (далее – ГТУ) расходуется на привод осевого компрессора, который преобразует механическую работу вращения вала в потенциальную энергию рабочего тела (воздуха) газовой турбины. Производительность осевого компрессора напрямую зависит от профиля лопаток, а также от сохранения гладкой формы поверхности. В процессе эксплуатации элементы проточной части подвергаются низко- и высокотемпературной коррозии, вибрации и повышенному износу. Оседание загрязнений изменяет форму лопаток и блокирует каналы охлаждения лопаток турбины, создавая локальную концентрацию напряжения, что приводит к быстрому сокращению срока их службы. Вместе с воздухом в проточную часть ГТУ могут проникать различные загрязняющие частицы: пыль органического и неорганического происхождения, несгоревшие углеводороды и химические реагенты.

Материалы и методы исследования. В данной работе рассматривается эффективность применения циклонов и рукавных фильтров в составе КВОУ в качестве элементов, замещающих ступени грубой и тонкой очистки. Целью замещения является повышение надежности работы КВОУ за счет увеличения долговечности элементов обеих ступеней очистки при сохранении габаритов и повышении степени очистки. Целью данной работы является также обеспечение степени осаждения в очистных элементах более 99 % для частиц размерами от 0,5 мкм, что необходимо для повышения срока безаварийной работы газотурбинных установок и газоперекачивающих агрегатов на магистральных газотранспортных системах, а также в системах энергогенерации городов.

Параметры, обеспечивающие требуемую эффективность работы очистных элементов, можно наиболее точно определить на основе опытных испытаний физических моделей, имеющих размеры, сопоставимые с промышленными образцами. Однако полученная информация будет достоверной только для аппаратов исследованной конфигурации, а аппараты других конструктивных типов вновь придется исследовать в полном объеме [1].

Более полные результаты и рекомендации можно получить на основе численных экспериментов с использованием математических моделей гидродинамических процессов в мультициклоне. Вычислительная гидрогазодинамика (Computational Fluid Dynamics, CFD) обеспечивает выполнение численных исследований движения многофазных потоков с учетом влияния конструктивных особенностей и условий эксплуатации устройств. Создание математической модели движения частицы пыли в потоке, закрученном внутри циклонных элементов, позволяет оценить влияние различных факторов на эффективность улавливания пыли в мультициклонах [2].

За исходную геометрическую модель концепта первой ступени очистки КВОУ приняты первые ряды циклонных элементов серийного мультициклона ЦБ-16 Бийского котельного завода диаметром 245 мм с полуулиточным подводом газа.

Построение геометрической модели выполнено средствами препроцессора Gambit: построена двумерная 2D модель и конечно-элементная сетка на базе квадратных элементов; разбиение расчетной области на конечные элементы выполнено полуавтоматическим методом; идентифицированы границы расчетной области, на которых в солвере будут установлены граничные условия.

После экспорта сетки в программном комплексе Fluent были проверены качество, масштабирование и адаптация сетки конечных элементов (для обеспечения правильности решения необходимо, чтобы геометрические размеры модели соответствовали масштабу 1:1). Для расчетов был выбран решатель на базе давления с «неявной» схемой решения нестационарной задачи.

При настройке решения задачи задавались параметры непрерывной и дискретной фаз. Для решения задачи в солвере были установлены следующие граничные условия для гомогенной фазы: Velocity Inlet – равномерное распределение скорости на входе в канал; Pressure-Outlet – атмосферное давление на выходе из канала; Wall – граничное условие стенки, циклонных элементов. Постановка граничных условий для дисперсной фазы имела следующую особенность. Непроницаемые поверхности циклонных элементов выполняли функцию улавливания частиц, а стенки корпуса – функцию их отражения. Поэтому для настройки граничных условий дискретной фазовой модели как для препятствий, так и для стенок мультициклона создано граничное условие «Wall». Тип распределения дисперсной фазы по размерам частиц принимался в соответствии с уравнением Розина – Раммлера с числом фракций (числом диаметров) 10 и с параметром дисперсии (параметром разброса) 2,5.

В данном исследовании проведены численные исследования движения двухфазного потока (первая фаза – воздух при стандартных атмосферных условиях, вторая фаза – пыль антрацита [3]) в мультициклоне, геометрия которого представлена четырьмя рядами серийного мультициклона. В расчетах применена модель турбулентности RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes – осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса) с двухпараметрической моделью замыкания k-ε и стандартными пристенными функциями.

С целью оптимизации расположения циклонных элементов в корпусе мультициклона и оценки эффективности КВОУ проведен ряд численных экспериментов с различными вариантами расстановки полуулиточных циклонных элементов. Для этого вначале были определены аэродинамические характеристики течения в модели только с газовой фазой (воздухом).

Были рассмотрены варианты расположения циклонных элементов по отдельности во всех рядах КВОУ. Затем для дислокации с наилучшим показателем по объему воздуха, захватываемого элементами, выполнялась инъекция частиц в поток. На рис. 1 можно видеть, что минимумы скорости наблюдаются в теневых

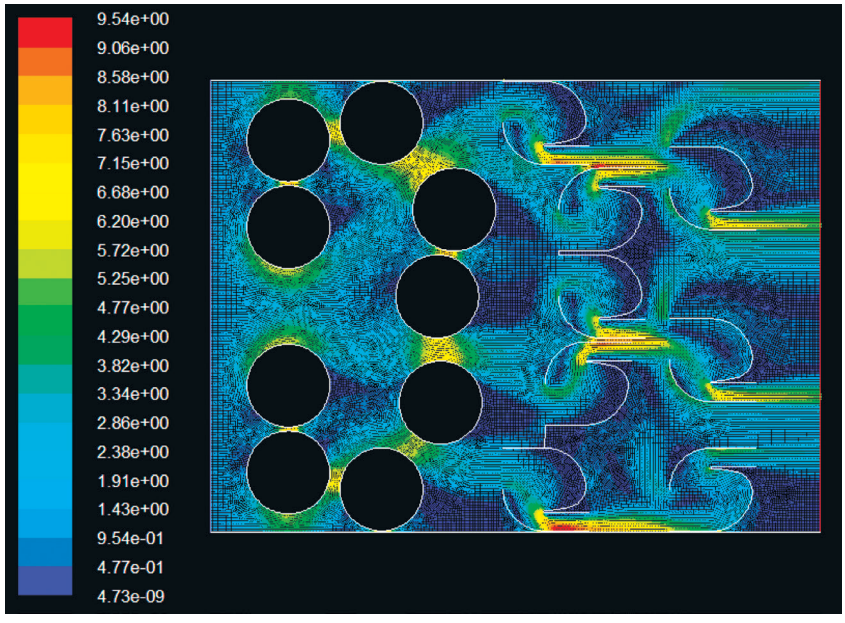


Рис. 1. Эпюры скоростей в мультициклоне

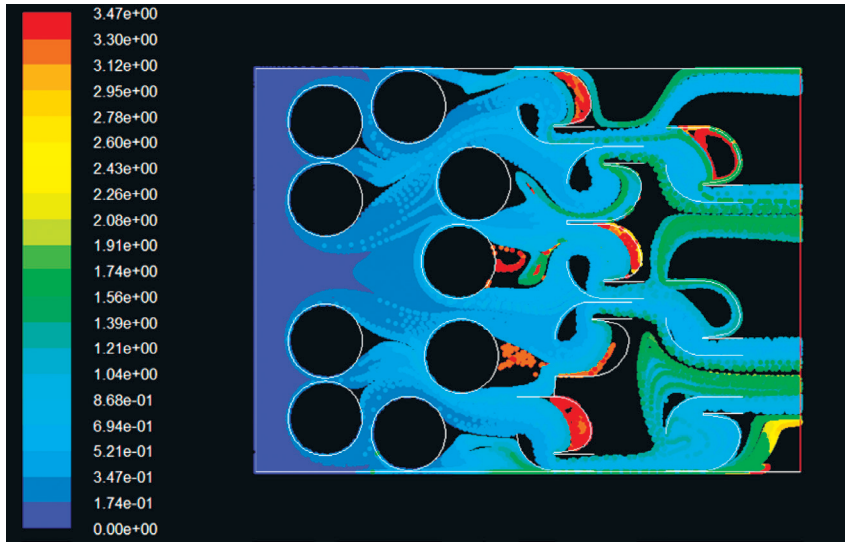


Рис. 2. Следы частиц, проходящих через мультициклон

областях циклонных элементов, а максимального значения скорость потока 9,54 м/с достигается в зонах между сплошными элементами круглого сечения в первом ряду, что соответствует предыдущим опытам [3].

Расчеты показывают корректность использованного в работе приема замены предыдущего ряда сквозных полуулиточных элементов сплошными круглыми элементами такого же диаметра.

На рис. 2 представлены следы частиц, проходящих через мультициклон. Эффективность улавливания пыли вследствие инерционного эффекта определена исходя из отчета по процедуре отслеживания частиц, показывающей количество частиц, вышедших из канала.

Заключение. В численных исследованиях получены аэродинамические характеристики дисперсных течений в корпусе мультициклона и определена схема размещения циклонических элементов и локализации их входов. Получена эффективность инерционного осаждения частиц: для первого ряда 36 % и для второго ряда 99 %. Так как задачей исследования являлось улавливание частиц размерами до 0,5 мкм, далее в корпусе КВОУ до переходного короба предполагается установить необходимое количество пористых (рукавных) фильтров и также провести исследование их эффективности методами вычислительной гидродинамики. Полученная в результате численных исследований геометрия элементов в мультициклоне обеспечила суммарную степень инерционного осаждения взвеси до 99 %. Представленный в работе метод оптимизации расположения циклонных элементов и их входов позволяет более точно учитывать величину сопротивления аппаратов и энергозатраты на очистку газовых и воздушных потоков в энергосистемах от взвешенных веществ. Он может использоваться и для других типов очистных элементов с целью существенного повышения эффективности их осаждения при неизменном аэродинамическом сопротивлении аппаратов.

Список использованных источников

1. Balestrin, E. An alternative for the collection of small particles in cyclones: experimental analysis and CFD modeling / E. Balestrin [et al.] // Separation and Purification Technology. – 2017. – Vol. 184. – P. 54–65.

2. Октябрьский, М. Л. Оборудование для очистки воздушной среды рабочей зоны [Электронный ресурс] / М. Л. Октябрьский // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2006. – № 16. – Режим доступа : https://cyberleninka.ru/article/n/oborudovanie-dlya-ochistki-vozdushnoy-sredy-rabochey-zony. – Дата доступа : 22.02.2022.

3. Belyaeva, G. Numerical and experimental studies of gas cleaning in multicyclone elements with filter inserts / G. Belyaeva, A. Zamalieva, M. Ziganshin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 481. – P. 5.

References

1. Balestrin, E. An alternative for the collection of small particles in cyclones: experimental analysis and CFD modeling / E. Balestrin [et al.] // Separation and Purification Technology. – 2017. – Vol. 184. – S. 54–65.

2. Oktyabr'skij, M. L. Oborudovanie dlya ochistki vozdushnoj sredy rabochej zony [Electronic resource] / M. L. Oktyabr'skij // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. – 2006. – № 16. – Mode of access : https://cyberleninka.ru/article/n/oborudovanie-dlya-ochistki-vozdushnoy-sredy-rabochey-zony. – Date of access : 22.02.2022.

3. Belyaeva, G. Numerical and experimental studies of gas cleaning in multicyclone elements with filter inserts / G. Belyaeva, A. Zamalieva, M. Ziganshin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 481. – P. 5.

УДК 519.2

И. К. Будникова

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ РЕГИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Аннотация. Работа направлена на решение задач, связанных с существующими проблемами надежности Муслюмовских районных сетей (МРЭС) Татарстана. Разработана программа для ЭВМ, на основе которой выполнен компьютерный эксперимент по моделированию показателей надежности для нескольких схем МРЭС и рассчитан ущерб от недоотпуска электроэнергии.
Ключевые слова: электрические сети, надежность, моделирование, показатели надежности.

I. K. Budnikova

MODELING AND ANALYSIS OF RELIABILITY OF REGIONAL POWER SUPPLY SYSTEMS

Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Annotation. The work is aimed at solving problems related to the existing reliability problems of Muslyumovsky district networks (MRES) Tatarstan. A computer program has been developed, on the basis of which a computer experiment was performed to simulate reliability indicators for several MRES schemes and the damage from non-start-up of electricity was calculated.
Keywords: electrical networks, reliability, modeling, reliability indicators.

Введение. На современном этапе развития электроэнергетики наряду с вопросами совершенствования технологий все большую актуальность приобретают вопросы рациональной организации эксплуатации, управления функционированием и развитием электрических сетей. Речь идет о задачах управления надежностью электроснабжения потребителей энергии, о мерах, направленных на сокращение потерь электроэнергии и предотвращение возникновения аварийных ситуаций [1].

Кроме того, в современных рыночных условиях надежность электроснабжения неразрывно связана с экономическими показателями и энергетической безопасностью промышленных предприятий.

Надежность участка сети определяется надежностью и параметрами входящих в ее состав элементов (трансформаторов, коммутационной аппаратуры, линий электропередачи и др.), а также схемой их соединения [2]. Методы расчета, которые применяются для оценки надежности технических объектов, весьма разнообразны. Традиционно частота отключений (количество отключений в год) рассматривается как постоянная величина (константа) для каждого компонента сети.

На практике оказывается, что эксплуатационные нагрузки, условия окружающей среды и срок службы оказывают индивидуальное влияние на частоту отключений каждого компонента сети.

Для обеспечения безопасной и эффективной работы в режимах эксплуатации и ремонта электрооборудования необходимо знать фактический уровень его надежности с учетом воздействия реальных эксплуатационных факторов.

Поэтому актуальной задачей является разработка методов и математических моделей количественной оценки показателей эксплуатационной надежности и эффективности работы электрооборудования, позволяющих учесть основные влияющие факторы.

Материалы и методы исследования. Объектом исследований в данной работе являются Муслюмовские районные электрические сети (МРЭС), которые входят ОАО «Сетевая компания» Татарстана. Сегодня в зоне обслуживания МРЭС находится 6 подстанций (ПС).

Цель работы – разработка программного обеспечения для автоматизации процесса моделирования показателей надежности работы электрических подстанций.

Для практических расчетов в системах электроснабжения применяют количественные характеристики надежности, полученные методами теории вероятностей и математической статистики: частоту кратковременных отключений, коэффициент аварийного простоя для каждого элемента, частоту длительных отключений, коэффициент аварийного простоя подстанции [3, 4].

Задача обеспечения надежности систем электроснабжения включает в себя целый комплекс технических, экономических и организационных мероприятий, направленных на сокращение ущерба от нарушения нормального режима работы потребителей электроэнергии, таких как:

выбор критериев и количественных характеристик надежности;

испытания на надежность и прогнозирование показателей надежности действующего оборудования;

выбор оптимальной структуры проектируемых (реконструируемых) систем электроснабжения по критерию надежности;

обеспечение заданных технических и эксплуатационных характеристик работы потребителей;

разработка наиболее рациональной с точки зрения обеспечения надежности, программы эксплуатации системы (обоснование режимов профилактических работ, количества запасных элементов и методов отыскания неисправностей).

Применительно к системам электроснабжения необходимо учитывать их большую размерность (по числу элементов и взаимосвязей между ними), зависимость от смежных технических систем (топливно-энергетического комплекса и технологии предприятия потребителя), а также неразрывность во времени процессов производства, распределения и потребления электроэнергии.

Поэтому создание новых систем электроснабжения требует применения таких методов анализа и расчета надежности, которые позволили бы объективно учесть опыт эксплуатации, данные экспериментов, рассчитать надежность, проанализировать варианты по обеспечению надежности, обосновать ее повы-

шение, прогнозировать и исключать возможность катастрофического исхода аварий для людей и окружающей среды [5, 6].

Результаты исследования и их обсуждение. На основании схем электрических соединений подстанций составлены расчетные схемы для каждой подстанции (ПС). Расчетная схема отражает логику связей элементов с точки зрения надежности работы всей установки или с точки зрения отказа всей установки.

При составлении расчетной схемы сделаны некоторые допущения.

Одновременные отключения цепи из двух параллельных элементов в плановый период не допускаются.

За время отключения элемента с большой длительностью ремонта может быть произведен ремонт других элементов (с относительно меньшей длительностью ремонта).

Перерывы электроснабжения, ликвидируемые работой автоматики (АПВ, АВР), не учитываются. Устройства релейной защиты считаются действующими безотказно.

Кратковременные отключения (производство переключений вручную) подсчитываются отдельно.

Длительность перерывов электроснабжения при кратковременных отключениях принимается 20–30 мин. Расчетная схема для кратковременных отключений содержит только элементы, соединенные последовательно.

Для длительных отключений (ремонт элементов) рассматриваются также отказы параллельных цепей, вызванные наложениями повреждений одного элемента на аварийное восстановление другого и аварийных повреждений на плановые отключения.

Расчетные схемы для всех видов отключений составляются отдельно для каждого потребителя или (и) групп потребителей.

Поток отказов элементов на расчетном промежутке – простейший, пуассоновский, а закон распределения вероятности восстановления – экспоненциальный.

При анализе и составлении математического описания различают три основных вида режимов электрических систем:

нормальный установившийся режим, применительно к которому проектируется электрическая система и определяются технико-экономические характеристики;

послеаварийный установившийся режим после аварийного отключения какого-либо элемента или ряда элементов системы. Параметры этих режимов не изменяются во времени и связи между ними представляются алгебраическими уравнениями;

переходный режим, во время которого система переходит от одного состояния к другому. Для него характерно изменение всех его параметров во времени и описание его дифференциальными уравнениями.

На рис. 1 представлен интерфейс стартового окна программы [7].

Программа предназначена для моделирования различных режимов работы электрических сетей и определения количественных показателей их

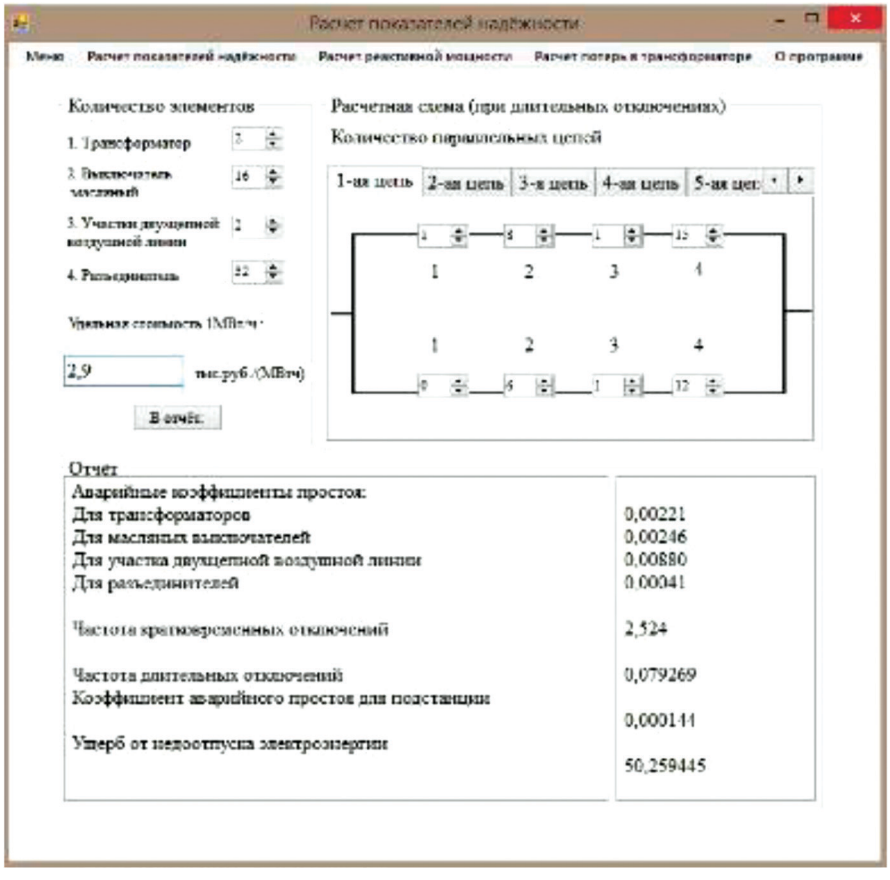


Рис. 1. Скриншот окна программы

надежности в реальных условиях с целью принятия решений, направленных на повышение эффективности эксплуатации, а также расчета возможного ущерба от недоотпуска электроэнергии в случае аварийных ситуаций.

В соответствии с поставленной целью, программа для ЭВМ, позволяет в зависимости от технологических условий рассчитывать следующие показатели надежности [7, 8]:

аварийные коэффициенты простоя для элементов сети;

частоту кратковременных отключений сети;

частоту длительных отключений сети;

коэффициенты аварийных простоев для подстанции;

ущерб от недоотпуска электроэнергии из-за аварийных ситуаций.

По результатам компьютерного моделирования показателей надежности работы для разных подстанций МРЭС составляется сводный отчет. Подробный анализ отчета позволяет выбрать дальнейшую траекторию исследований в зависимости от поставленных задач, а также моделировать возможные аварийные ситуации, чтобы оценить ущерб от недоотпуска электроэнергии из-за последних.



Рис. 2. Коэффициенты аварийных простоев для элементов сети

По графику (рис. 2) наглядно можно определить, какие элементы сети являются более уязвимыми. Основную составляющую в общем числе показаний дают аварийные отключения воздушных линий.

Заключение. Практическое применение результатов исследования заключается в создании обоснованных предпосылок определения основных показателей надежности электрических систем при воздействии различных факторов. Полученные результаты позволят: прогнозировать показатели надежности электрооборудования в зависимости от условий эксплуатации; оценить степень опасности и установить «узкие места» электрических систем, а также разработать мероприятия по повышению эффективности функционирования электрооборудования.

Список использованных источников

1. Шилин, А. Н. Надежность электроснабжения : учеб. пособие / А. Н. Шилин, А. Г. Сошинов, О. И. Елфимова. – Волгоград : ВГТУ, 2019. – 104 с.

2. Хорольский, В. Я. Эксплуатация электрооборудования : учеб. пособие / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов, В. Н. Шемякин. – СПб. : Лань, 2021. – 268 с.

3. Математические задачи энергетики : учеб. пособие / Г. Б. Белых [и др.]. – Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2019. – 176 с.

4. Голубева, Н. В. Математическое моделирование систем и процессов : учеб. пособие / Н. В. Голубева. – 2-е изд. – СПб. : Лань, 2013. – 192 с.

5. Будникова, И. К. Применение автоматизированных информационных систем в электроэнергетике / И. К. Будникова, Е. В. Приймак, А. О. Сокова // Вестн. техн. ун-та. – 2016. – Т. 19, № 22. – С. 106–108.

6. Будникова, И. К. Компьютерное моделирование параметров распределительной электрической сети / И. К. Будникова, Е. С. Белашова // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – № 9–10. – С. 75–81.

7. Будникова, И. К. Программное моделирование надежности систем электроснабжения / И. К. Будникова, Р. Ф. Галиева // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике : материалы докладов X открытой молодежной науч.-практ. конф., Казань, 28–30 окт. 2015 г. / Казан. гос. энергет. ун-т. – Казань, 2017. – С. 121–125.

8. Моделирование режимов работы электроэнергетических систем : учеб. пособие / И. А. Муратаев [и др.]. – Казань : КГЭУ, 2019. – 94 с.

References

1. Shilin, A. N. Nadezhnost' elektrosnabzheniya : ucheb. posobie / A. N. Shilin, A. G. Soshinov, O. I. Elfimova. – Volgograd : VGTU, 2019. – 104 s.

2. Horol'skij, V. Ya. Ekspluataciya elektrooborudovaniya : ucheb. posobie / V. Ya. Horol'skij, M. A. Taranov, V. N. Shemyakin. – SPb. : Lan', 2021. – 268 s.

3. Matematicheskie zadachi energetiki : ucheb. posobie / G. B. Belyh [et al.]. – Magnitogorsk : MGTU im. G. I. Nosova, 2019. – 176 s.

4. Golubeva, N. V. Matematicheskoe modelirovanie sistem i processov : ucheb. posobie / N. V. Golubeva. – 2-e izd. – SPb. : Lan', 2013. – 192 s.

5. Budnikova, I. K Primenenie avtomatizirovannyh informacionnyh sistem v elektroenergetike / I. K. Budnikova, E. V. Prijmak, A. O. Sokova // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. – 2016. – T. 19. – № 22. – S.106–108.

6. Budnikova, I. K. Komp'yuternoe modelirovanie parametrov raspredelitel'noj elektricheskoj seti / I. K. Budnikova, E. C. Belashova // Izv. vysshih ucheb. zavedenij. Problemy energetiki. – 2014. – № 9–10. – S. 75–81.

7. Budnikova, I. K. Programmnoe modelirovanie nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya / I. K. Budnikova, R. F. Galieva // Dispetcherizaciya i upravlenie v elektroenergetike : materialy dokladov X otkrytoj molodezhnoj nauch.-prakt. konf., Kazan', 28–30 okt. 2015 g. / Kazan. Gos. energet. un-t. – Kazan', 2017. – S. 121–125.

8. Modelirovanie rezhimov raboty elektroenergeticheskih sistem : ucheb. posobie / I. A. Murataev [et al.]. – Kazan' : KGEU, 2019. – 94 s.

УДК 539

Р. Ш. Гимадиев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРОВОДА ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УЧЕТОМ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТИ

Доктор технических наук, профессор, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Аннотация. На основе модели деформирования провода электропередачи исследуется влияние изгибной жесткости провода на напряженно-деформированное состояние.

Ключевые слова: провод, электропередача, моделирование, изгибная жесткость, провис.

R. Sh. Gimadiev

MODELING THE DEFORMATION OF A POWER WIRE TAKING INTO ACCOUNT FLEXURAL STIFFNESS

Doctor of Engineering Science, professor, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Annotation. Based on the deformation model of a power transmission wire, the influence of the bending stiffness of the wire on the stress-strain state is investigated.

Keywords: wire, power transmission, modeling, bending stiffness, sag.

Введение. Уравнения динамики движения, деформированного состояния провода высоковольтной линии (ВЛ) и алгоритм численного решения в пространственной постановке разработаны в [1, 2], где модель провода принималась за абсолютно гибкую систему с учетом растяжения и сжатия. Опоры ВЛ считались абсолютно жесткими. Уравнения динамики движения решаются на основе метода конечных разностей по явной схеме. По истечении времени система выходит на стационарное состояние. В задачах, посвященных исследованию взаимодействия протекающей жидкости в деформируемой трубе [3–4], изгибная жесткость является одним из основных факторов. Возникает вопрос, какое влияние оказывает изгибная жесткость провода на напряженно-деформированное состояние. Учет влияния сил, действующих на тросы, взаимодействующих с водной средой, изучено в работе [5]. Вопросы проектирования электроэнергетических систем и сетей рассмотрены в работах [6–8].

Очевидно, уменьшая длину провода и модуля упругости, можно найти условия, при которых изгибная жесткость будет влиять на деформированное состояние провода. На основании численных расчетов и для «текстильной» нити можно найти длину, при которой нужно учитывать изгибную жесткость нити.

Материалы и методы исследования. 1. Постановка задачи. Моделирование динамики ВЛ электропередачи проводится на основе работ [1, 2] по модели абсолютно гибкой системы. Под абсолютно гибкими системами мы понимаем физические объекты, которые пренебрежимо слабо воспринимают изгибные напряжения, т. е. работают только на растяжение и сжатие. К ним можно отнести: протяженные линии передачи энергий, линии оптико-волоконной связи, тросы, находящиеся в потоке жидкости [5] и т. д. Опоры ВЛ принимаются за абсолютно жесткие.

Абсолютно гибкая система в поле силы тяжести с линейной плотностью $\rho_0(s)$, перемещается в пространстве под действием распределенной погонной нормальной нагрузки F_n и распределенной погонной касательной нагрузки F_τ. Деформация гибкой системы характеризуется степенью удлинения $\lambda = ds / ds_0 = 1 + e$, где ds_0 и ds – длины элементов гибкой системы в недеформированном и деформированном состоянии; e – относительное удлинение. Для элемента гибкой системы с массой dm в соответствии с законом сохранения массы имеем $dm = \rho_0 ds_0 = \rho ds$.

2. Метод и построение решения. Векторное уравнение, описывающее движение упругой весомой гибкой системы под действием погонных нагрузок F_n, F_τ, натяжением T, в поле силы тяжести с ускорением свободного падения g, имеет вид:

$$\rho_0 \partial^2 r / \partial t^2 = \partial T / \partial s_0 + F_n + F_\tau + g\rho_0. \quad (1)$$

Рассматривается векторное уравнение движения в проекциях на оси декартовой системы координат $Ox_1x_2x_3$, ускорение g направлено вниз вдоль оси Ox_3.

Пусть угол между элементом ds гибкой системы и осями координат Ox_1, Ox_2, Ox_3 составляет соответственно α, β, γ.

Распределенная касательная нагрузка с интенсивностью F_τ действует вдоль элемента *ds* гибкой системы. Действующий вектор нормальной нагрузки с интенсивностью F_n составляет угол φ к плоскости OAB содержащий провод. Дополнительно вводится угол α_1 между осью Ox_1 и плоскостью OAB. Учитывая, что

$$|F_n| = F_n,\ |F_\tau| = F_\tau,\ |T| = T,\ |g| = g,\ \partial^2 r/\partial t^2 = \partial v/\partial t$$

и проектируя векторное уравнение движения на декартовы оси координат получено:

$$\rho_0 \frac{\partial v_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s_0}(T\cos\alpha) - F_n\lambda\cos\varphi\cos\gamma\cos\alpha_1 + F_\tau\lambda\cos\alpha,$$

$$\rho_0 \frac{\partial v_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s_0}(T\cos\beta) - F_n\lambda\cos\varphi\cos\gamma\sin\alpha_1 + F_\tau\lambda\cos\beta,$$

$$\rho_0 \frac{\partial v_3}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s_0}(T\cos\alpha) - F_n\lambda\cos\varphi\sin\gamma + F_\tau\lambda\cos\gamma - \rho_0 g,$$

где v_1, v_2, v_3 – проекции скорости элементов на координатные оси.

Так как $(\partial x_1)^2 + (\partial x_2)^2 + (\partial x_3)^2 = (\lambda\partial s_0)^2$, то

$$\cos\alpha = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_1}{\partial s_0},\ \cos\beta = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_2}{\partial s_0},\ \cos\gamma = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_3}{\partial s_0},$$

$$tg\alpha_1 = \frac{\partial x_2}{\partial x_1} = \left(\frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_2}{\partial s_0}\right)\Big/\left(\frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_1}{\partial s_0}\right) = \frac{\cos\beta}{\cos\alpha},$$

$$\cos\alpha_1 = \cos\alpha\Big/\sqrt{\cos^2\alpha + \cos^2\beta},$$

$$\sin\alpha_1 = \cos\beta\Big/\sqrt{\cos^2\alpha + \cos^2\beta}.$$

В дальнейшем индекс нуль в координате s_0 можно опускать и понимать *S* как лагранжеву координату (т. е. связанную с гибкой системой).

Учитывая, что

$$\cos\alpha = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_1}{\partial s},\ \cos\beta = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_2}{\partial s},\ \cos\gamma = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_3}{\partial s},$$

тогда уравнения движения гибкой системы в декартовой системе координат $Ox_1x_2x_3$ примут вид:

$$\rho_0 \frac{\partial v_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{T}{\lambda}\frac{\partial x_1}{\partial s}\right) - F_n\cos\varphi\cos\alpha_1\frac{\partial x_3}{\partial s} + F_\tau\frac{\partial x_1}{\partial s},$$

$$\rho_0 \frac{\partial v_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{T}{\lambda}\frac{\partial x_2}{\partial s}\right) - F_n\cos\varphi\sin\alpha_1\frac{\partial x_3}{\partial s} + F_\tau\frac{\partial x_2}{\partial s},$$

$$\rho_0 \frac{\partial v_3}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{T}{\lambda}\frac{\partial x_3}{\partial s}\right) - F_n\cos\varphi\sin\gamma + F_\tau\frac{\partial x_3}{\partial s} - \rho_0 g. \qquad (2)$$

Уравнения движения в вертикальной плоскости Ox_1x_2, ось Ox_2 направлена вертикально. В этом случае для (2) надо положить:

$$\alpha = \frac{\pi}{2},\ \alpha_1 = \frac{\pi}{2},\ \gamma + \beta = \frac{\pi}{2},\ \varphi = 0,\ \sin\gamma = \cos\beta = \frac{1}{\lambda}\frac{\partial x_2}{\partial s}$$

и провести замену индексов 2 → 1 и 3 → 2:

$$\rho_0 \frac{\partial v_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{T}{\lambda}\frac{\partial x_1}{\partial s}\right) - F_n \frac{\partial x_2}{\partial s} + F_\tau \frac{\partial x_1}{\partial s},$$

$$\rho_0 \frac{\partial v_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{T}{\lambda}\frac{\partial x_2}{\partial s}\right) + F_n \frac{\partial x_1}{\partial s} + F_\tau \frac{\partial x_2}{\partial s} - \rho_0 g, \qquad (3)$$

где v_1 и v_2 – проекции вектора скорости V на оси координат x_1, x_2.

3. Учет влияния изгибной жесткости. Очевидно, изгибная жесткость должна уменьшать прогиб провода по сравнению с абсолютно гибким проводом, встает вопрос: на сколько? Ниже проведено сравнительные расчеты напряженнодеформированного состояния (НДС) провода с учетом изгибной жесткости и абсолютно гибкой модели провода. Важным фактором оказывается, является длина провода и модуль упругости.

Предельное решение динамической задачи дает решение НДС стационарного состояния провода.

Уравнения движения провода ВЛ с учетом изгибной жесткости для плоской задачи (3) в безразмерном виде можно записать в виде:

$$\frac{\rho}{A_N}\frac{\partial v_k}{\partial \tau} + \frac{\rho}{A_N}\left(EI_z \frac{\partial^4 \omega}{\partial x_1^4} + g\right)(k-1) =$$
$$= \frac{\partial}{\partial s}\left(\frac{T}{1+e}\frac{\partial x_k}{\partial s}\right) + (-1)^k f_n \frac{\partial x_{3-k}}{\partial s} + f_\tau \frac{\partial x_k}{\partial s}, \qquad (4)$$

где k = 1, 2; а EI_z – изгибная жесткость провода; $I_z = \rho r^4/4$ – момент инерции сечения провода с радиусом r; T – натяжение в проводе; E – модуль упругости провода; v_k – составляющие скорости элемента гибкой системы в проекции вектора скорости $\overline{V}$ на оси координат x_k; $\omega = x_2^0 - x_2$ – прогиб провода, начальная координата точек пролета x_2^0 и x_2 – координата провиса; ρ – линейная плотность; e – относительное удлинение; S – лагранжева координата; g – ускорение свободного падения.

Уравнения движения (4) записаны в безразмерном виде и введены параметры:

$$\overline{v}_k = v_k/U_\infty,\ f_n = 2F_n/(\rho U_\infty^2 L_0),\ f_\tau = 2F_n/(\rho U_\infty^2 L_0),\ \overline{\rho} = \rho L_0/M_0$$
$$\overline{T} = T/T_0,\ \overline{E} = E/T_0,\ \tau = tU_\infty/L_0,\ \overline{g} = gL_0/U_\infty^2, \qquad (5)$$

где v_k – скорость элемента провода; L_0 – длина пролета провода; $M_0 = \rho_0 L_0$ – масса пролета провода; L_m – монтажная длина провода; E – приведенный модуль упругости материала провода; $T_0 = \rho U_\infty^2 L_0^2/2$ – характерное натяжение

провода и U_∞ – характерная скорость; t – время; $A_N = \rho L_0^3/(2M_0)$ – параметр Ньютона. При решении в обозначениях черточки над параметрами опушены.

Численное решение. Для решения уравнения (3.1) используется метод конечных разностей и в рассмотрение вводится дискретная область:

$$s_i = i\Delta s,\ \tau_n = n\Delta\tau\ \ (n = 0,1,...,\tau/\Delta\tau - 1,\ i = 1,\ 2,...,s/\Delta s).$$

При решении уравнений используется для аппроксимации производных центральные разности на сдвинутой на полшага сетке и явная конечно-разностная схема [1].

Кинематические соотношения для (4) определяются выражениями $\partial x_k/\partial\tau = v_k$, а геометрическое соотношение формулой:

$$(\partial x_1/\partial s)^2 + (\partial x_2/\partial s)^2 = \lambda^2,\ \ \lambda = 1 + e. \tag{6}$$

Физическое соотношение принимается в виде выражения Кельвина – Фойгта:

$$T = Ee + \eta\dot{e}, \tag{7}$$

где $\dot{e}$ – скорость деформации; η – коэффициент внутреннего трения в материале.

Начальные и граничные условия задачи имеют вид:

$$\begin{gathered} x_k(0,s) = f_k(s),\ \ v_k(0,s) = \varphi_k(s), \\ x_k(\tau,0) = f_k^\circ(\tau),\ \ v_k(\tau,0) = \varphi_k^0(\tau), \\ x_k(\tau,s_l) = f_k^s(\tau),\ \ v_k(\tau,s_l) = \varphi_k^s(\tau),\ \ k = 1,2. \end{gathered} \tag{8}$$

Результаты решения задачи на шаге интегрирования n служат в качестве начальных и граничных условий для следующего шага интегрирования.

Равновесное состояние гибкого провода получается как предельное решение динамической задачи. Выбор коэффициента корректировки скоростей и коэффициента устойчивости численного решения осуществляется путем проведения численных экспериментов на модельных задачах [1].

Движения провода с учетом изгибной жесткости. Для расчета по (3.1) примем следующие параметры: длина пролета между опорами l = 160 [м]; линейная плотность электрических проводов из алюминия ρ = 0,5149 [кг/м]; модуль упругости провода с диаметром d = 0,01553 [м] составляет $E = 11840\cdot10^3$ [Н]. Расчет равновесного состояние провода проведено с монтажной длиной $L_м$ = 160,6 [м]. Монтажная длина обеспечивает некоторый начальный провис. Практический невозможно подвесить провод длиной L = 160 [м] строго по прямой линии, так как малое перемещение точек абсолютно жесткого провода около прямой линии должно вызывать бесконечное натяжение.

Расчет равновесного состояния провода проводится с общим весом 82, 69 кг и монтажной длиной 160,6 [м] без учета изгибной жесткости $EI_z = 0$ и с учетом EI_z. В расчетах для определения координат узловых точек разностной сетки длина провода разбита равномерным шагом на 40 элементов. На значение мак-

симального прогиба $f = 6{,}19$ м посредине пролета изгибная жесткость EI_z не повлияла. Из расчета по приведенной методики следует, чтобы поднять провод с таким провисом, на опоре необходимо приложить усилие $T = 2574$ [Н].

В соответствии с расчетами, изгибная жесткость проводов не оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние длинных проводов порядка 160 м.

Ставится вопрос: при уменьшении длины провода и модуля упругости надо ли учитывать изгибную жесткость и влияет ли это на провис провода?

Ниже приводится расчет прогиба провода длиной $L_1 = 1{,}0$ м с учетом изгибной жесткости EI_z. При следующих значениях размерных параметров: длина провода $L_1 = 1{,}0$ м; диаметр $d = 0{,}01553$ м; модуль упругости $E = 8073$ Н; погонная масса $\rho = 0{,}5127$ кг/м, значения безразмерных параметров при этом равны:

$$E = 32{,}917,\ T_0 = 245{,}25,\ M_0 = 0{,}5127,\ A_N = 1{,}1959,\ EI_z = 0{,}241.$$

По результатам проведенных расчетов, следует: прогиб без учета изгибной жесткости $EI_z = 0$ равен $f = 0{,}0308$ м, а с учетом изгибной жесткости $EI_z = 0{,}241$ прогиб составил $f = 0{,}0242$ м. Следовательно, при малых длинах проводов необходимо учитывать изгибную жесткость провода в расчетах напряженно-деформированного состояния провода.

Заключение. Исследования динамики нагружения провода с учетом изгибной жесткости показали, что изгибная жесткость не оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние длинных проводов порядка 160 м. А при малой длине провода порядка 1 м необходимо учитывать изгибную жесткость при моделировании деформирования провода.

Список использованных источников

1. Гимадиев, Р. Ш. Динамика деформирования провода электропередачи / Р. Ш. Гимадиев // Изв. РАН МТТ. – 2019. – № 4. – С. 63–75.

2. Gimadiev, R. Sh. Electric transmission line wire deformation dynamics / R. Sh. Gimadiev // AIP Conf. Proceedings. – 2018. – Vol. 2027, iss. 1. – P. 1–5.

3. Ильгамов, М. А. Взаимодействие неустойчивостей в гидроупругой системе / М. А. Ильгамов // Прикладная математика и механика. – 2016. – Т. 80, вып. 5. – С. 566–579.

4. Ильгамов, М. А. Положения динамического равновесия изогнутого трубопровода с вибрирующими опорами / М. А. Ильгамов, М. М. Шакирьянов // Докл. Рос. акад. наук. Физика, техн. науки. – 2021. – Т. 496, № 1. – С. 55–59.

5. Девнин, С. И. Гидроупругость конструкций при отрывном обтекании / С. И. Девнин. – Л. : Судостроение, 1975. – 192 с.

6. Бацева, Н. Л. Специальные вопросы проектировани электроэнергетических систем и сетей : учеб. пособие / Н. Л. Бацева. – Томск : Томск. политехн. ун-т, 2008. – 254 с.

7. Шевченко, Е. В. Определение редуцированного натяжения при обрыве провода / Е. В. Шевченко, В. А. Митраков, А. В. Танасогло // Металлические конструкции. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 189–198.

8. Ryan, Hugh M. High Voltage Engineering and Testing / Hugh M. Ryan. – IET, 2001. – 192 p.

References

1. Gimadiev, R. Sh. Dinamika deformirovaniya provoda elektroperedachi / R. Sh. Gimadiev // Izvestiya RAN MTT. – 2019. – № 4. – S. 63–75.

2. Gimadiev, R. Sh. Electric transmission line wire deformation dynamics / R. Sh. Gimadiev // AIP Conf. Proceedings. – 2018. – Vol. 2027, iss. 1. – P. 1–5.

3. Il'gamov, M. A. Vzaimodejstvie neustojchivostej v gidrouprugoj sisteme / M. A. Il'gamov // Prikladnaya matematika i mekhanika. – 2016. – T. 80, iss. 5. – S. 566–579.

4. Il'gamov, M. A. Polozheniya dinamicheskogo ravnovesiya izognutogo truboprovoda s vibriruyushchimi oporami / M. A. Il'gamov, M. M. SHakir'yanov // Dokl. ros. akad. nauk. Fizika, tekhn. nauki. – 2021. – T. 496, № 1. – S. 55–59.

5. Devnin, S. I. Gidrouprugost' konstrukcij pri otryvnom obtekanii / S. I. Devnin. – L. : Sudostroenie, 1975. – 192 s.

6. Baceva, N. L. Special'nye voprosy proektirovani elektroenergeticheskih sistem i setej: ucheb. posobie / N. L. Baceva. – Tomsk : Tomsk. politekhn. un-t, 2008. – 254 s.

7. Shevchenko, E. V. Opredelenie reducirovannogo natyazheniya pri obryve provoda / E. V. Shevchenko, V. A. Mitrakov, A. V. Tanasoglo // Metallicheskie konstrukcii. – 2010. – T. 16, № 3. – S. 189–198.

8. Ryan, Hugh M. High Voltage Engineering and Testing / Hugh M. Ryan. – IET, 2001. – 192 p.

УДК 536.25

Г. С. Маршалова[1], М. С. Лира[2], Е. С. Данильчик[3]

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО ШАГА НА ТЕПЛООТДАЧУ ДВУХРЯДНЫХ ТРУБНЫХ ПУЧКОВ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В РЕЖИМЕ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

[1]Кандидат технических наук, Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь
[2]Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
[3]Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье представлены результаты численного моделирования теплоотдачи двухрядных оребренных трубных пучков аппаратов воздушного охлаждения при различных поперечных шагах установки труб, позволившие визуализировать течение в пучке и рекомендовать к использованию разреженные пучки с повышенным коэффициентом оребрения.

Ключевые слова: свободная конвекция, аппарат воздушного охлаждения, трубный пучок, поперечный шаг, *k*–ω модель турбулентности, число Нуссельта.

G. S. Marshalova[1], M. S. Lira[2], E. S. Danil'chik[3]

NUMERICAL SIMULATION OF THE TRANSVERSE TUBE INSTALLATION STEPS EFFECT ON THE HEAT TRANSFER OF AIR-COOLED APPARATUSES CONSISTING ON DOUBLE-ROW TUBE BUNDLES UNDER FREE CONVECTION

[1]Ph. D. in Engineering Science, Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus
[2]A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
[3]Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The article presents the results of numerical simulation of heat transfer in air-cooled apparatus consisting on double-row finned tube bundles at various transverse tube installation steps, which made it possible to visualize the flow in the bundle and recommend the use of sparse bundle with an increased finning coefficient.

Keywords: free convection, air-cooled apparatus, tube bundle, transverse pitch, k–ω turbulence model, Nusselt number.

Введение. Аппараты воздушного охлаждения (АВО) являются составной частью оборудования тепло-технологических процессов в нефтеперерабатывающей, химической, нефтехимической, газовой и пищевой промышленности [1], в тепло- и электроэнергетике [2], в холодильной технике и вентиляции [3], в деревообрабатывающей промышленности [4], на атомных станциях [5]. По данным работы [6], в странах Евразийского экономического союза в настоящее время работает около 52 000 АВО с установленной мощностью $1{,}93 \cdot 10^6$ кВт.

Аппараты воздушного охлаждения в основном эксплуатируются в режиме вынужденной конвекции, из-за чего на привод вентиляторов необходимо большое количество электрической энергии. В работах [7–8] для повышения эффективности АВО предлагается перевод их в режим свободной конвекции с полным или частичным отключением электропривода вентиляторов при понижении температуры охлаждающего воздуха до определенных значений, обеспечивая при этом заданный тепловой режим. Однако недостатками такого режима являются малые коэффициенты теплопередачи и существенные массо-габаритные характеристики. Поэтому важными являются научные исследования, посвященные разработке методов интенсификации теплообмена, которые позволят изменить геометрию теплопередающей поверхности и ее компоновочные характеристики.

За последние десятилетия в промышленности использовались АВО с различными компоновочными параметрами пучков. Пучки ТВО первого поколения характеризовались компактностью и для труб с коэффициентом оребрения φ = 9,3 использовались шаги $S_1 = S_2' = 0{,}052$ м, а для труб с φ = 14,6; 15,2 – $S_1 = S_2' = 0{,}058$ м. В пучках ТВО второго поколения с целью увеличения тепловой мощности аппарата было освоено производство труб с φ = 20–22. В связи с энергетической целесообразностью применения тесных компоновок

характер расположения труб не изменился (шахматная разбивка труб с шагами $S_1 = S_2' = 0{,}058$ м). При промышленной реализации этого решения возникли значительные затруднения ввиду малого значения зазора в 0,001 м, которые при изготовлении и последующем использовании приводили к деформации поверхности оребрения. В современных пучках ТВО являющихся третьем поколением для φ = 15,2; 20–22 рекомендуется разбивка труб по вершинам равностороннего треугольника с шагами $S_1 = S_2' = 0{,}064$ м [9, 10]. В настоящее время в промышленности применяются в основном аппараты первого и второго поколений, и происходит постепенный переход на теплообменники третьего поколения.

Влиянию компоновочных параметров труб в пучке при свободной конвекции посвящены исследования [11], где изучались шахматные пучки труб с числом рядов z = 1–3 и φ = 14,5 для шагов $S_1 = S_2' = 0{,}072$–$0{,}15$ м. В [7] исследованы шахматные пучки труб с z = 1–5 и φ = 16,8 и установлен рост теплоотдачи при $S_1 = S_2' = 0{,}058$–$0{,}07$ м и снижение темпа роста с дальнейшим увеличением шага. В работе [8] изучен однорядный шахматный оребренный пучок с φ = 21, где максимальной теплоотдаче соответствуют шаги $S_1 = S_2' = 0{,}062$–$0{,}064$ м; а в [4] – коридорные пучки труб (z = 1–5) с φ = 16,8 и шагами $S_1 = S_2' = 0{,}058$–$0{,}12$ м, $S_2 = 0{,}058$–$0{,}1$ м.

В [12] проведено экспериментальное исследование эффективности ребра для однорядного пучка, состоящего из биметаллических оребренных труб следующих параметров: $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times l = 0{,}056 \times 0{,}0268 \times 0{,}0146 \times 0{,}0025 \times$ $\times\, 0{,}0005 \times 0{,}3$ м, φ = 19,3. Ребра труб стачивались путем шлифования с образованием новых типов труб. В результате установлено, что увеличение угла наклона и высоты оребрения труб в целом сопровождается снижением теплоотдачи. По габаритным и металлоемким характеристикам наиболее выгодным является однорядный пучок с высотой оребрения 2 мм.

Таким образом, установлена целесообразность исследований теплоотдачи пучков с различными геометрическими характеристиками шахматной компоновки при шагах $S_1 = S_2' = 0{,}058$–$0{,}070$ м в режиме свободной конвекции воздуха, которые наиболее распространены в промышленности благодаря их высоким тепловым показателям.

Также необходимо отметить, что проведение экспериментальных исследований по изучению теплоотдачи в режиме свободной конвекции требует значительных денежных и временных затрат. Поэтому предлагается расширять границы эксперимента с помощью применения численного моделирования для решения данных задач.

Цель работы – численное изучение влияния поперечного шага на теплоотдачу двухрядных оребренных трубных пучков аппаратов воздушного охлаждения в режиме свободной конвекции при различных высотах ребра.

Материалы и методы исследования. Численные исследования проводились для шахматного двухрядного пучка, состоящего из оребренных труб следующих

параметров: наружный диаметр трубы с оребрением d = 0,0264–0,0568 м; высота ребра h = 0–0,0152 м; межреберный шаг s = 0,00243 м; диаметр трубы по основанию d_0 = 0,0264 м; толщина ребра Δ = 0,00055 м; коэффициент оребрения φ = 1–21, относительная высота ребра h/s = 0–6,25. Исследования проводились для различных относительных поперечных шагов $\sigma_1 = S_1/d$ = 1,02–1,23; $\sigma_2 = S_2/d$ = 0,88–1,07.

Для подготовки расчетной сетки был использован пакет Ansys Meshing, который позволяет разработать сетку необходимого качества и с достаточным количеством конечных элементов. Численное моделирование проводилось при помощи пакета Ansys Fluent 19.1. Среднее время расчета на распараллеленной версии составляло порядка 2 ч.

Для численного моделирования была осуществлена трехмерная постановка задачи. Размеры расчетной области составляли 8,38×2,5848×0,00972 м. Расчет осуществлялся на неструктурированной сетке. Для описания расчетной области потребовалось около 3 517 477 ячеек.

В начале расчета по всей расчетной области установлены статическое давление P = 101325 Па и температура воздуха $T_{вх} = t_0$. Для моделирования теплопередачи от ребер труб к воздуху решалась сопряженная задача.

Зависимости теплофизических характеристик газа – воздуха (плотность, теплопроводность и динамическая вязкость) от температуры задавались в виде законов: для плотности – по закону идеального газа, для теплопроводности – полиномом, динамическая вязкость рассчитывалась по Сазерленду.

В процессе решения сходимость задачи контролировалась уровнем погрешности: для давления и скоростей (уравнения Навье – Стокса и неразрывности) минимальный уровень погрешности составлял 10^{-3}, для температуры (уравнение энергии) – 10^{-5}. Обычно расчеты прекращались по достижению погрешности для поправок давления 10^{-4}, для температуры (уравнение энергии) – 10^{-8}.

В экспериментальных исследованиях трубы обогревались электрическим током, а тепловая мощность определялась как произведение напряжения на силу тока. Для согласования с экспериментом задавалось значение теплового потока на внутренней поверхности трубы и изменялось в диапазоне q = 200–11 000 Вт/(м^{2}К).

Верификация модели проводилась по температуре ребра нагреваемой трубы в каждом ряду пучка T_i (рис. 1).

В целом полученные результаты численного моделирования согласуются с опытными данными в пределах 5–10 %, что позволяет принять разработанную модель для дальнейших исследований.

Численное моделирование позволило визуализировать распределение температур (рис. 2) и скоростей (рис. 3) на оребренном пучке.

Как видно из рис. 2, первый ряд охлаждается лучше, так как температура набегающего на трубы воздуха имеет наименьшее значение. Так как пучок является разреженным, т. е. шаг установки труб большой, то холодный воздух

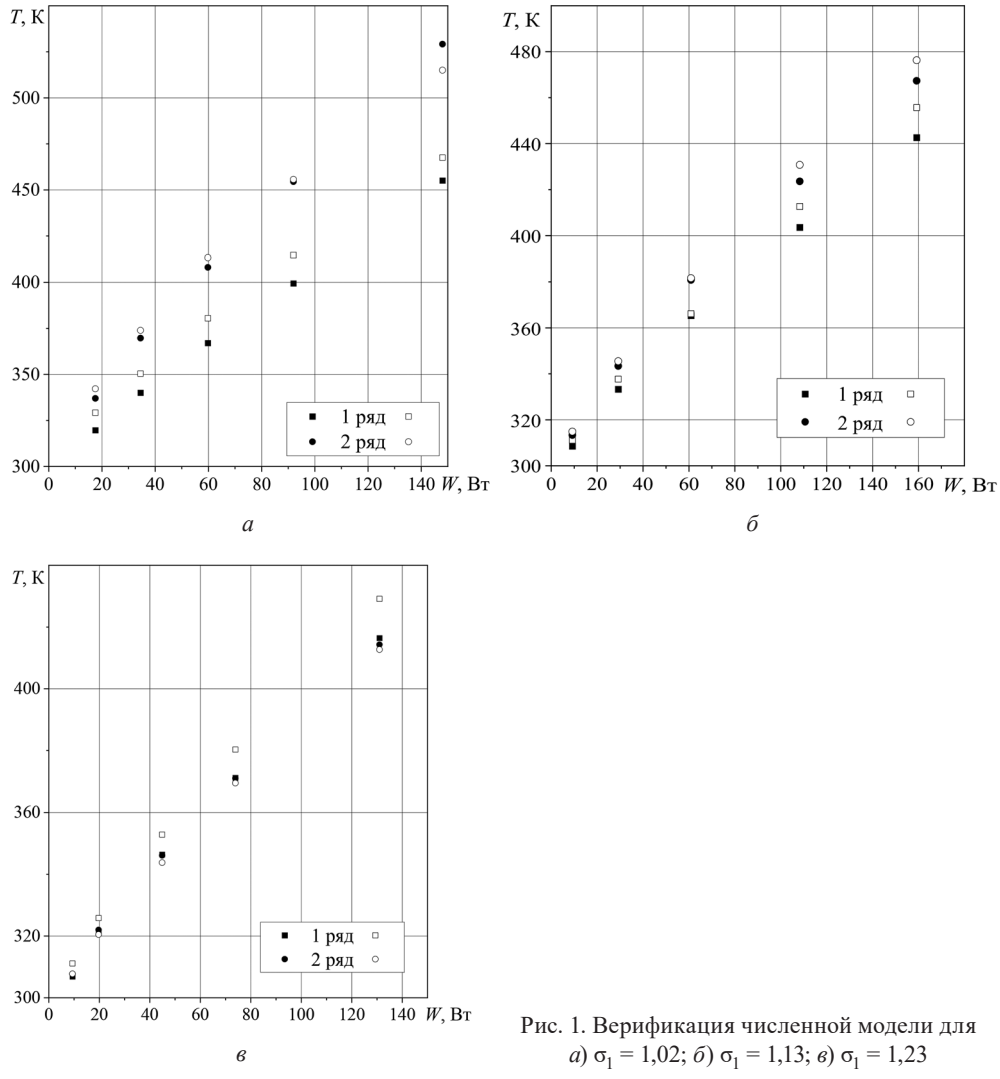


Рис. 1. Верификация численной модели для *а*) $\sigma_1 = 1{,}02$; *б*) $\sigma_1 = 1{,}13$; *в*) $\sigma_1 = 1{,}23$

за счет разности температур засасывается в пучок, огибая носовую часть труб. В межтрубном сечении пучка наблюдается значительное увеличение скорости воздушного потока, связанное с резким сужением проходного сечения в межтрубном пространстве. В межреберном пространстве скорость воздуха также увеличивается, однако при этом примерно в два раза меньше скорости в проходном сечении.

Результаты исследования и их обсуждение. Численное изучение эффективности теплоотдачи и следа за пучками в режиме свободной конвекции проведено для пяти типов двухрядных шахматных пучков при относительных шагах $\sigma_1 = S_1/d = 1{,}02$; 1,13; 1,23 с различной высотой ребра труб $h = 0$–15,2.

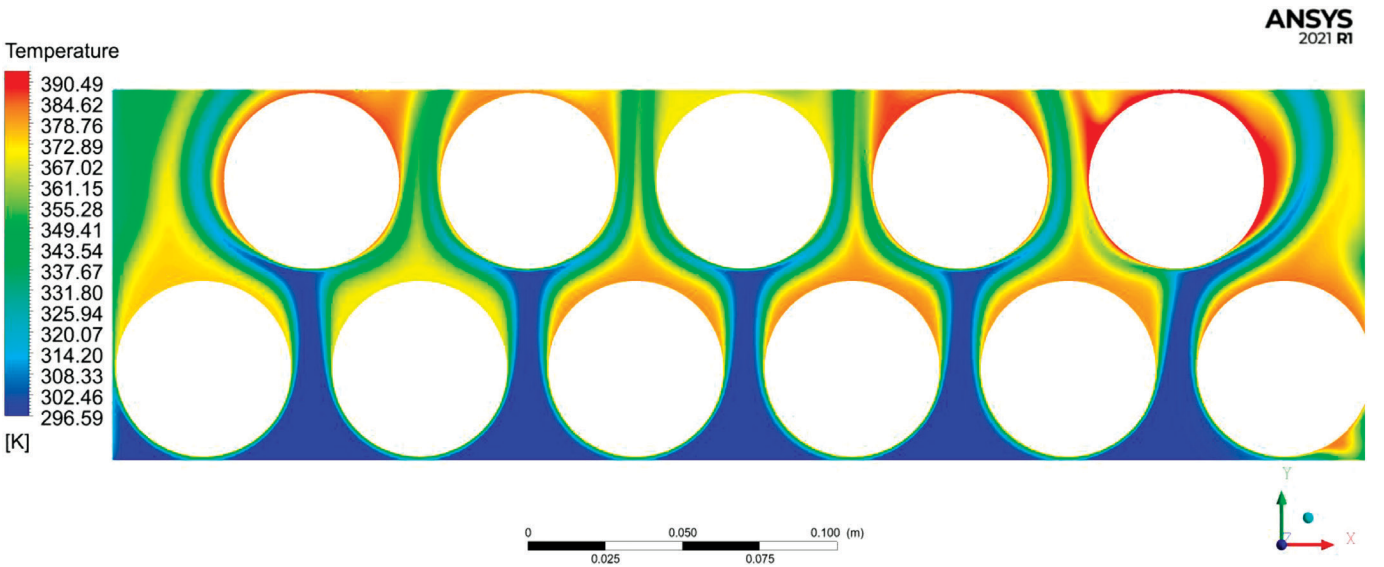


Рис. 2. Распределение температур на двухрядном пучке с $\sigma_1 = 1{,}23$ и $h = 0{,}0152$ м при $q = 3503$ Вт / (м^2 К)

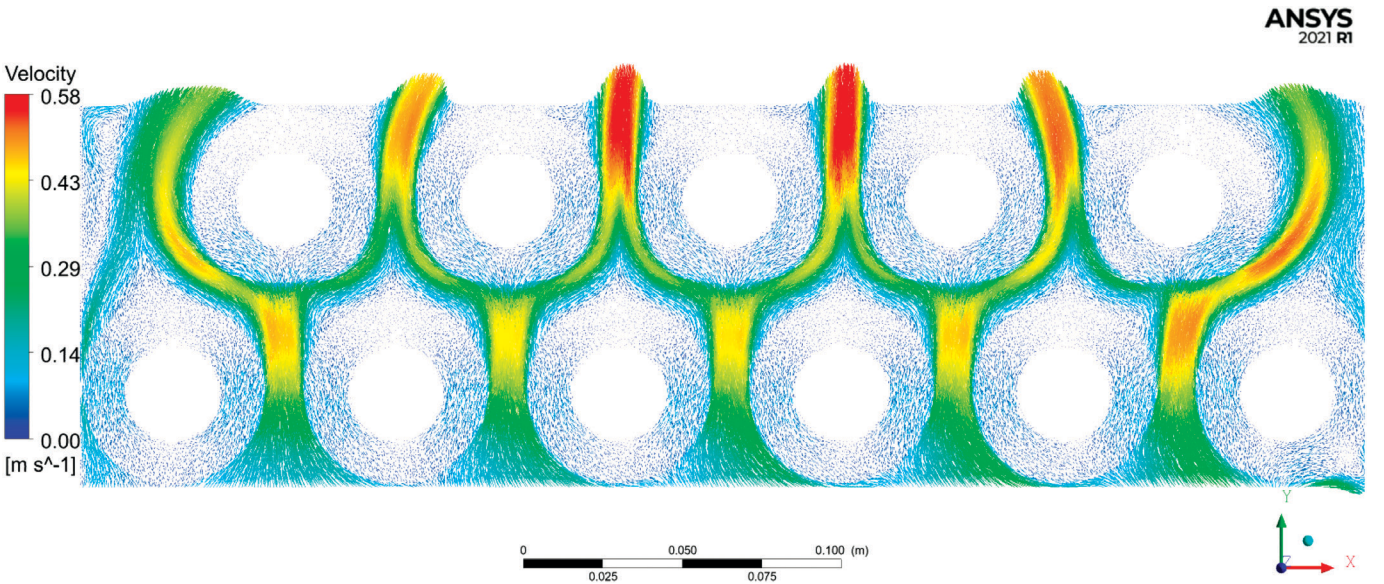


Рис. 3. Распределение скоростей на двухрядном пучке с $\sigma_1 = 1{,}23$ и $h = 0{,}0152$ м при $q = 3503$ Вт / (м^2 К)

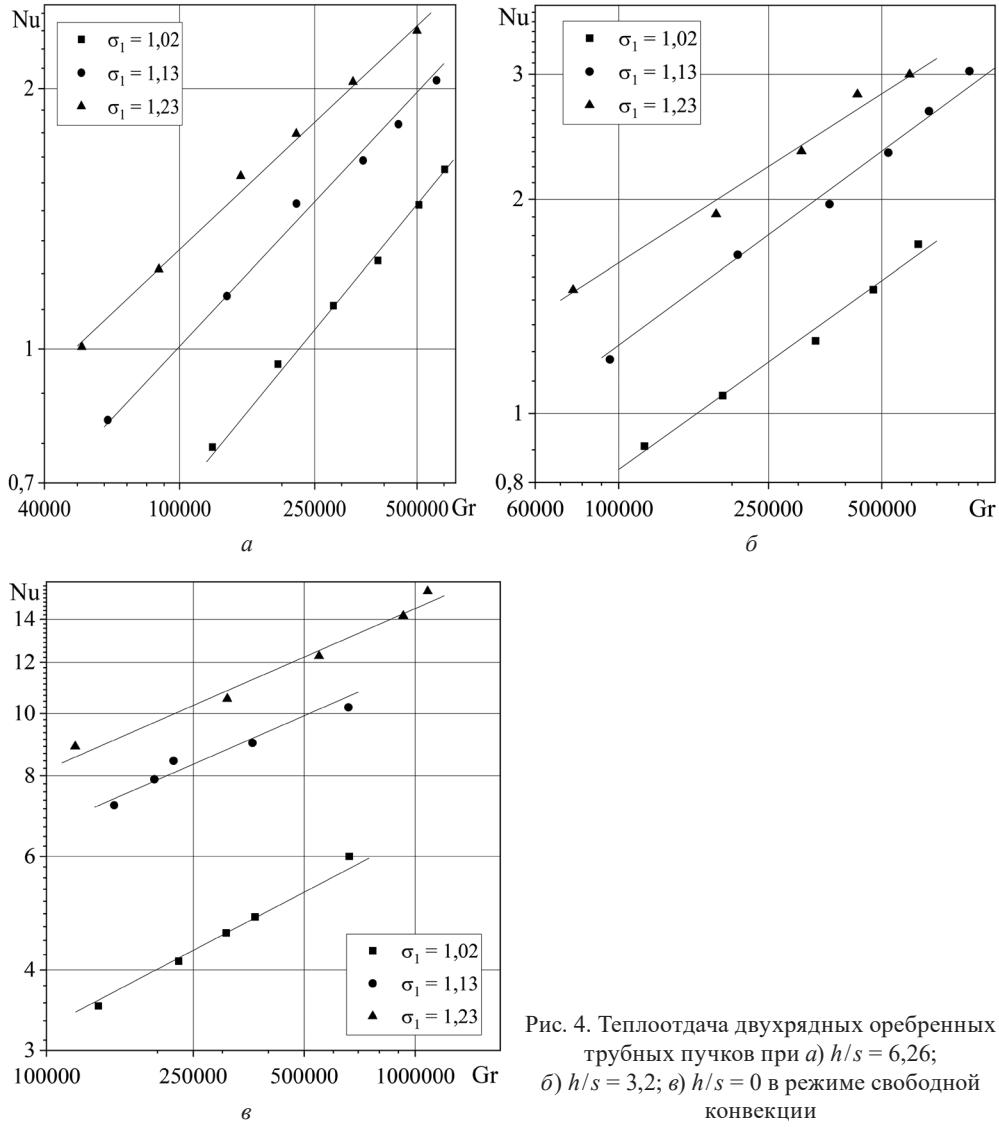


Рис. 4. Теплоотдача двухрядных оребренных трубных пучков при *а*) h/s = 6,26; *б*) h/s = 3,2; *в*) h/s = 0 в режиме свободной конвекции

Анализ полученных данных по теплоотдаче двухрядного пучка при различных поперечных шагах установки труб проводился с помощью зависимости Nu = *f*(Gr) (рис. 4):

$$Nu = \frac{\alpha d_0}{\lambda}, \tag{1}$$

$$\mathrm{Gr} = \frac{g\beta(t_{\mathrm{ст}} - t_0)\, d_0^3}{\nu^2}, \tag{2}$$

где Nu – число Нуссельта; α – коэффициент теплоотдачи пучка, Вт/(м^2 °С); λ – теплопроводность, Вт/(м°С); Gr – число Грасгофа; *g* – ускорение свободного

падения, м/с^2; β – коэффициент объемного расширения, °С –1; $t_{ст}$ – температура стенки калориметрической трубы у основания трубы, °С; t_0 – температура окружающего воздуха, °С; ν – коэффициент кинематической вязкости м^2/с.

Для всех изученных параметров пучков наблюдается повышение теплоотдачи с увеличением поперечного шага установки труб. Это связано со снижение аэродинамического сопротивления и усилением разгона воздуха в межтрубном пространстве.

Также из рис. 4 видно, что снижение относительной высоты ребра ведет к увеличению влияния поперечного шага. Так, при h/s = 6,26 теплоотдача пучка с σ_1 = 1,02 , что в 1,54 раза меньше, чем для σ_1 = 1,23, а при h/s = 0 теплоотдача пучка с σ_1 = 1,02 уже в 1,94 раза меньше, чем для σ_1 = 2,4.

Для наглядной демонстрации влияния поперечного шага на теплоотдачу различных пучков на рис. 5, *а* представлены зависимости Nu = $f(\sigma_1)$. А также так как тепловая эффективность пучка определяется не только теплоотдачей, но и площадью теплообменной поверхности, для оценки влияния относительного поперечного шага на интенсивность теплоотдачи двухрядного пучка в режиме свободной конвекции и сопоставления различных типов пучков по тепловой эффективности при постоянном числе Грасгофа Gr = 250 000, были построены зависимости (Nu φ) = $f(\sigma_1)$, представленные на рис. 5, *б*.

Данные, представленные на рис. 5, *а*, говорят о том, что наибольшее влияние изменение поперечного шага оказывают на теплоотдачу гладких пучков (h/s = 0). При этом данные пучки обладают самой высокой общей теплоотдачей. С повышением высоты оребрения влияние шага снижается.

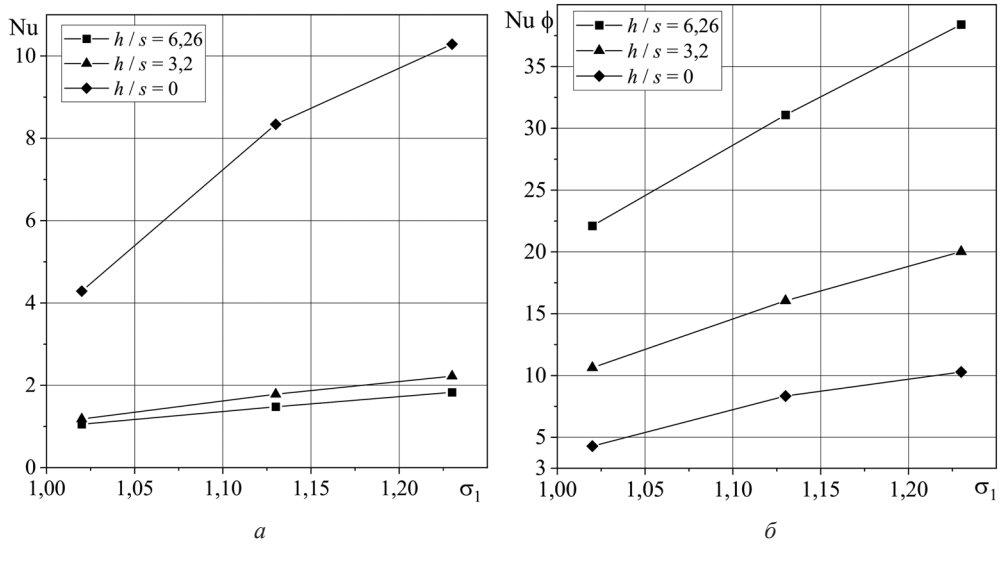


Рис. 5. Влияние относительного шага на интенсивность теплоотдачи двухрядного пучка в режиме свободной конвекции: отнесенной к полной оребренной поверхности труб (*а*) и к поверхности труб по основанию ребер (*б*)

На рис. 1, *б* показано, что наибольшей теплоотдачей, отнесенной к площади теплообменной поверхности, обладают пучки с наибольшей высотой оребрения (h/s = 6,26). Также влияние поперечного шага наиболее значительно для данных пучков и снижается с уменьшением высоты оребрения.

Заключение. Таким образом, для исследованных пучков в режиме свободной конвекции АВО рекомендуется использовать разреженные пучки с повышенной высотой оребрения.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проекты Т21РМ-019 и Ф21МС-011 и Российского фонда фундаментальных исследований, проект 20-58-04002.

Список использованных источников

1. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения : справ. / А. Н. Бессонный [и др.] ; под ред. А. Н. Бессонного, В. Б. Кунтыша. – СПб. : Недра, 1996. – 512 с.

2. О комбинированных системах охлаждения ТЭЦ / И. И. Королев [и др.] // Теплоэнергетика. – 1996. – № 11. – С. 49–55.

3. Теплотехника, отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха / В. М. Гусев [и др.]. – Л. : Стройиздат, 1981. – 343 с.

4. Позднякова А. В. Совершенствование характеристик и разработка методики расчета промежуточных калориферов лесосушильных камер: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.21.05 / А. В. Позднякова ; Арханг. гос. техн. ун-т. – Архангельск, 2003. – 19 с.

5. Зорин, В. М. Атомные электростанции: уч. пособие / В. М. Зорин. – М. : МЭИ, 2012. – 672 с.

6. Инженерный метод теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободно-конвективного теплообмена / В. Б. Кунтыш [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 12. – С. 3–6.

7. Самородов, А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / А. В. Самородов. – Архангельск, 1999. – 176 с.

8. Маршалова, Г. С. Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Г. С. Маршалова. – Минск, 2019. – 153 л.

9. Кунтыш, В. Б. Основные способы энергетического совершенствования аппаратов воздушного охлаждения / Кунтыш В. Б. [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 1997. – № 4. – С. 43–44.

10. Трубный пучок аппарата воздушного охлаждения: полез. модель BY 10161 / В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, А. Э. Пиир, А. Ш. Миннигалеев. – Опубл. 30.06.2014.

11. Волков, А. В. Повышение эффективности сушки длительносохнущих пиломатериалов в камерах периодического действия: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05 / А. В. Волков. – Архангельск, 2003. – 154 л.

12. Данильчик, Е. С. Экспериментальные исследования эффективности однорядного пучка из биметаллических оребренных труб с различной высотой оребрения при свободно-конвективном теплообмене с воздухом / Е. С. Данильчик, А. Б. Сухоцкий, В. Б. Кунтыш // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 5. – С. 128–141.

References

1. Osnovy rascheta i proektirovaniya teploobmennikov vozdushnogo ohlazhdeniya: sprav. / A. N. Bessonnyj [et al.] ; pod red. A. N. Bessonnogo, V. B. Kuntysha. – SPb. : Nedra, 1996. – 512 s.

2. O kombinirovannyh sistemah ohlazhdeniya TEC / I. I. Korolev [et al.] // Teploenergetika. – 1996. – № 11. – C. 49–55.

3. Teplotekhnika, otoplenie, ventilyaciya i kondicionirovanie vozduha / V. M. Gusev [et al.]. – L. : Strojizdat, 1981. – 343 s.

4. Pozdnyakova A. V. Sovershenstvovanie harakteristik i razrabotka metodiki rascheta promezhutochnyh kaloriferov lesosushil'nyh kamer: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.21.05 / A. V. Pozdnyakova ; Arhang. gos. tekhn. un-t. – Arhangel'sk, 2003. – 19 s.

5. Zorin, V. M. Atomnye elektrostancii: uch. posobie / V. M. Zorin. – M. : MEI, 2012. – 672 s.

6. Inzhenernyj metod teplovogo rascheta apparata vozdushnogo ohlazhdeniya v rezhime svobodno-konvektivnogo teploobmena / V. B. Kuntysh [et al.] // Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. – 2013. – № 12. – S. 3–6.

7. Samorodov, A. V. Sovershenstvovanie metodiki teplovogo rascheta i proektirovaniya apparatov vozdushnogo ohlazhdeniya s shahmatnymi orebrennymi puchkami: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.14.14 / A. V. Samorodov. – Arhangel'sk, 1999. – 176 s.

8. Marshalova, G. S. Teplovoj raschet i proektirovanie apparatov vozdushnogo ohlazhdeniya s vytyazhnoj shahtoj: dis. ... kand. tekhn. nauk: 01.04.14 / G. S. Marshalova. – Minsk, 2019. – 153 l.

9. Kuntysh, V. B. Osnovnye sposoby energeticheskogo sovershenstvovaniya apparatov vozdushnogo ohlazhdeniya / V. B. Kuntysh [et al.] // Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. – 1997. – № 4. – S. 43–44.

10. Trubnyj puchok apparata vozdushnogo ohlazhdeniya: polez. model' BY 10161 / V. B. Kuntysh, A. B. Suhockij, A. E. Piir, A. SH. Minnigaleev. – Opubl. 30.06.2014.

11. Volkov, A. V. Povyshenie effektivnosti sushki dlitel'nosohnushchih pilomaterialov v kamerah periodicheskogo dejstviya: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.21.05 / A. V. Volkov. – Arhangel'sk, 2003. – 154 l.

12. Danil'chik, E. S. Eksperimental'nye issledovaniya effektivnosti odnoryadnogo puchka iz bimetallicheskih orebrennyh trub s razlichnoj vysotoj orebreniya pri svobodno-konvektivnom teploobmene s vozduhom / E. S. Danil'chik, A. B. Suhockij, V. B. Kuntysh // Izv. vys. ucheb. zavedenij. Problemy energetiki. – 2020. – T. 22, № 5. – S. 128–141.

УДК 621.316

И. В. Новаш[1], Ф. А. Романюк[2], В. Ю. Румянцев[3], Ю. В. Румянцев[4]

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

[1]Кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

[2]Доктор технических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

[3]Кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

[4]Кандидат технических наук, Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены вопросы моделирования режимов энергосистемы с помощью компьютерных симуляторов в режиме реального времени, предложения для дальнейшего развития вычислительного эксперимента при анализе режимов Белоруской энергосистемы.

Ключевые слова: энергосистема, моделирование, вычислительный эксперимент, компьютерные программные комплексы, симуляторы реального времени.

I. V. Novash[1], F. A. Romanyuk[2], V. Yu. Rumyantsev[3], Yu. V. Rumyantsev[4]

REAL-TIME SIMULATION OF POWER SYSTEM MODES AS A RESEARCH TOOL FOR THE DEVELOPMENT OF THE ENERGY SYSTEM OF THE REPUBLIC OF BELARUS

[1]Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
[2]Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
[3]Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
[4]Ph. D. in Engineering Science, doctoral student, Belarusian National Technical University

Annotation. The issues of modeling the modes of the power system with the help of computer simulators in real time, are considered proposals for further development of the computational experiment in the analysis of the modes of the Belarusian power system.

Keywords: power system, simulation, computational experiment, computer software systems, real-time simulators.

Введение. На кафедре «Электрические станции» Белорусского политехнического института (БПИ) в 1967 г. была создана доктором технических наук, профессором В. И. Новашем научная школа в области разработки, информационного и математического обеспечения микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем. На протяжении многих десятилетий коллективом учеников В. И. Новаша под руководством члена-корреспондента НАН Беларуси, доктора технических наук, профессора Ф. А. Романюка в рамках существующей научной школы в Белорусском национальном техническом университете (БНТУ) проводятся исследования в области разработки и совершенствования математических моделей электроэнергетического оборудования энергосистем. Основным методом исследования режимов работы электрооборудования принят метод математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Необходимость совершенствования устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) и установления общих закономерностей в их поведении при разнообразных видах повреждений в энергосистеме требует усиления качественного и количественного анализа аварийных режимов защищаемых электроэнергетических объектов. Наиболее совершенным методом количественного анализа также является вычислительный эксперимент, позволяющий провести исследование поведения устройств РЗА с учетом возникающих повреждений.

Для проведения исследований методом вычислительного эксперимента на кафедре «Электрические станции» БНТУ разработаны математические модели синхронных генераторов, силовых трансформаторов, синхронных и асинхронных двигателей, линий электропередачи и на их основе созданы компьютерные программные комплексы (КПК) для исследования рабочих и аварийных режимов основного электроэнергетического оборудования [1, 2].

На рис. 1–3 представлены примеры диалоговых интерактивных окон КПК, разработанных на кафедре «Электрические станции».

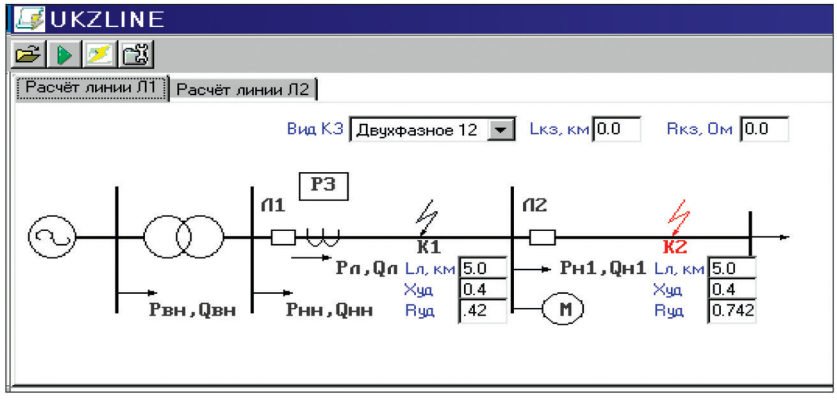


Рис. 1. Диалоговое окно КПК для расчета аварийных режимов на линиях электропередачи

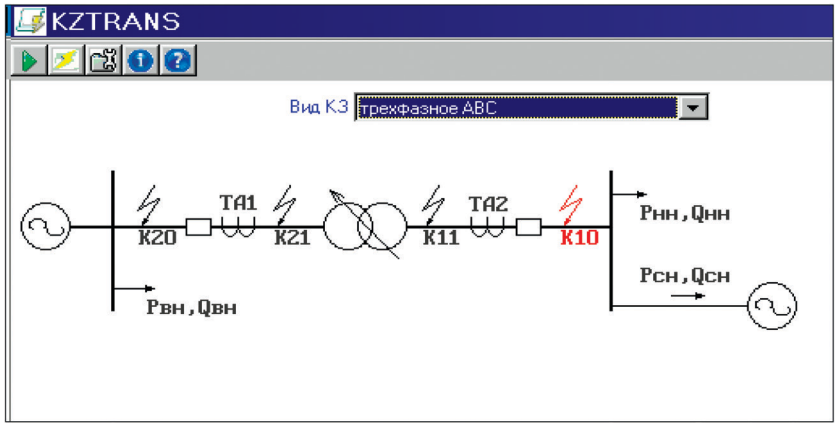


Рис. 2. Диалоговое окно КПК для расчета аварийных режимов двухобмоточного трехфазного трансформатора

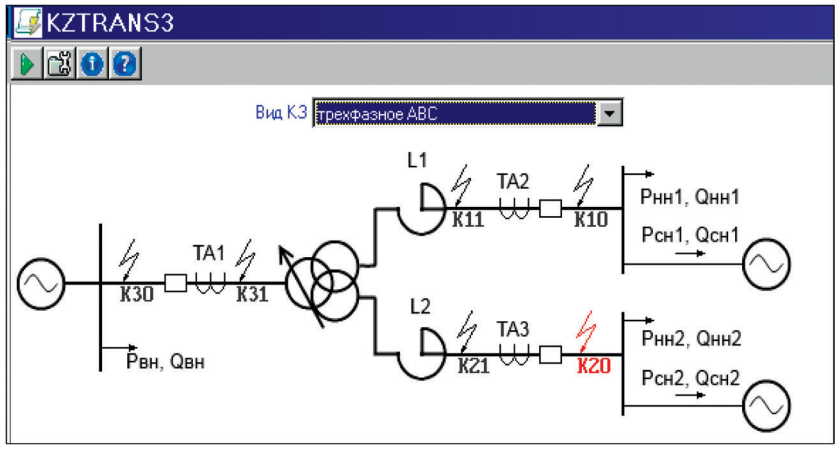


Рис. 3. Диалоговое окно КПК для расчета аварийных режимов трехфазного трансформатора с расщепленной вторичной обмоткой

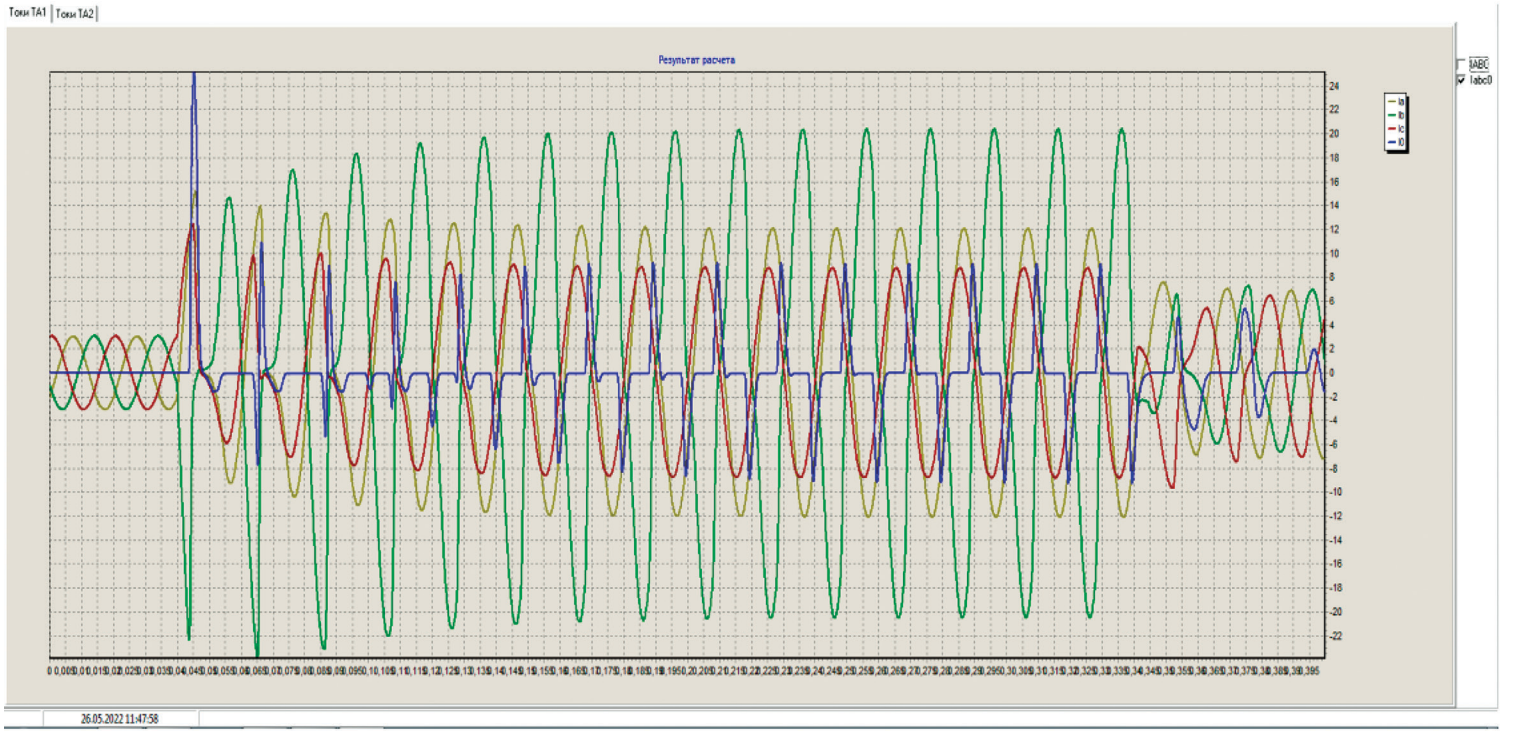


Рис. 4. Графики расчетных вторичных токов трехфазной группы ТТ

Основным достоинством представленных КПК является то, что они позволяют выполнять расчеты вторичных токов трансформаторов тока с учетом их несинусоидальных форм, обусловленных наличием в энергосистеме нелинейных элементов, и насыщением магнитопроводов силового и измерительных трансформаторов тока (рис. 4), что соответствует реальным условиям аварийных режимов [3].

Результаты расчетов таких КПК могут быть использованы в качестве входных сигналов для КПК, реализующих модель исследуемой защиты. Сохраненные в формате COMTRADE [4] эти же результаты могут быть использованы в качестве тестовых сигналов, подаваемых через аппаратную часть аппаратно-программных испытательных комплексов на испытуемое устройство релейной защиты.

Материалы и методы исследования. Проведение вычислительного эксперимента требует разработки КПК, в состав программно-информационного обеспечения которых входят исходные данные о режимах объекта, математические модели самого электроэнергетического объекта и его устройств защиты, алгоритмы и программы воспроизведения вычислительного эксперимента на компьютере.

Вычислительный эксперимент испытания устройств РЗА с помощью КПК может проводиться одним из двух способов: в режиме разомкнутого контура (open-loop) или в режиме замкнутого контура (closed-loop) (рис. 5).

В режиме разомкнутого контура вычислительный эксперимент проводится в случае, если не требуется проверка взаимодействия устройств РЗА между собой и с энергосистемой.

Тестирование в режиме разомкнутого контура – это физическое воспроизведение с помощью проверочной установки (ПУ), к аналоговым выходам которой подключены аналоговые входы тока и (или) напряжения испытуемого устройства РЗА, заранее полученных входных сигналов защиты (осциллограмм аварийного процесса). Управление ПУ обычно осуществляется при помощи компьютера (ноутбука) с установленным на нем специализированным программным обеспечением (ПО) производителя проверочной установки. ПО отвечает за запуск или останов тестирования, конфигурирование ПУ, выбор программы тестирования, просмотр, анализ, а также выбор аварийных осциллограмм для дальнейшего их воспроизведения. Таким образом, ПУ в течение времени воспроизведения аварийной осциллограммы отображает защищаемый объект и протекающие в нем переходные процессы в режиме реального времени.

Разомкнутый цикл проведения испытаний не требует сложных и дорогостоящих испытательных программно-аппаратных комплексов (ИПАК). В состав ИПАК входит компьютер, в котором реализуется модель защищаемого объекта и ПО, управляющее испытательным устройством и режимом проведения испытаний. В качестве испытательного устройства могут быть использованы микропроцессорные ПУ НПП «Динамика» (Россия) типа «РЕТОМ» [4], компании OMICRON [5] или аналогичные комплексы других производителей.

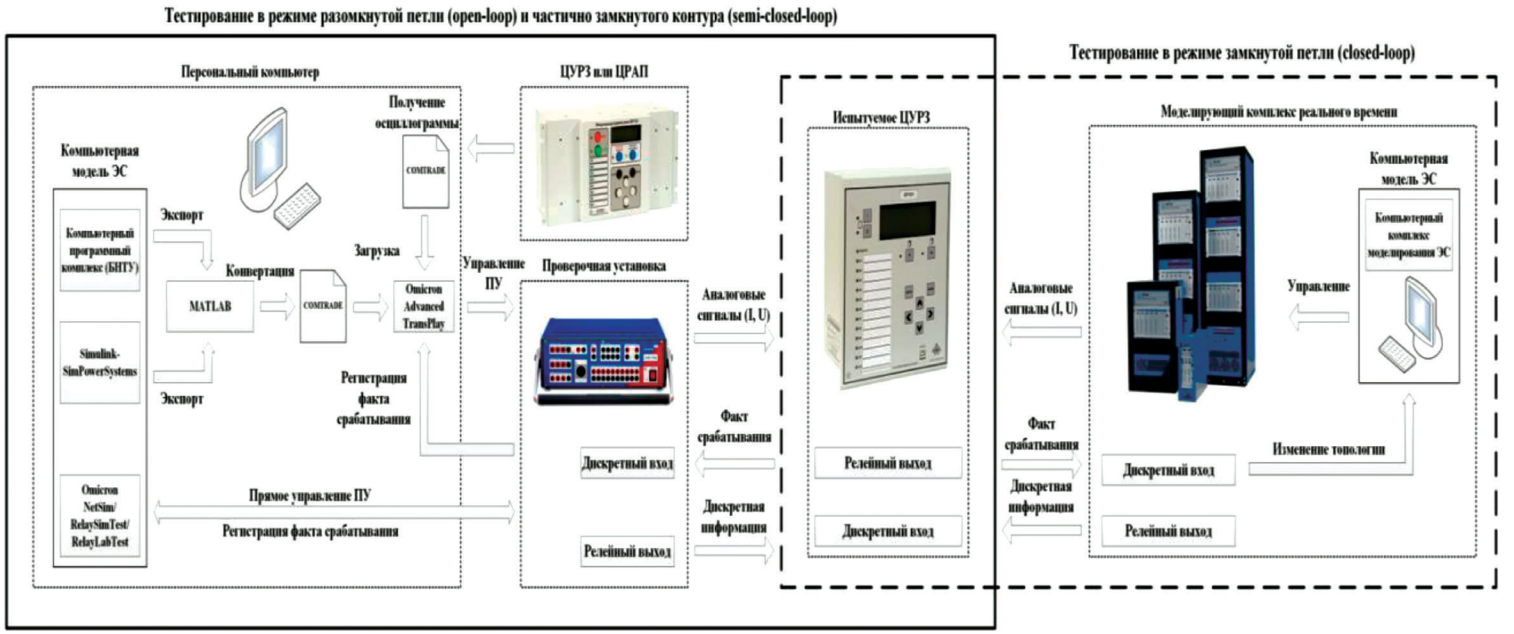


Рис. 5. Способы организации проведения вычислительного эксперимента при тестировании микропроцессорных защит

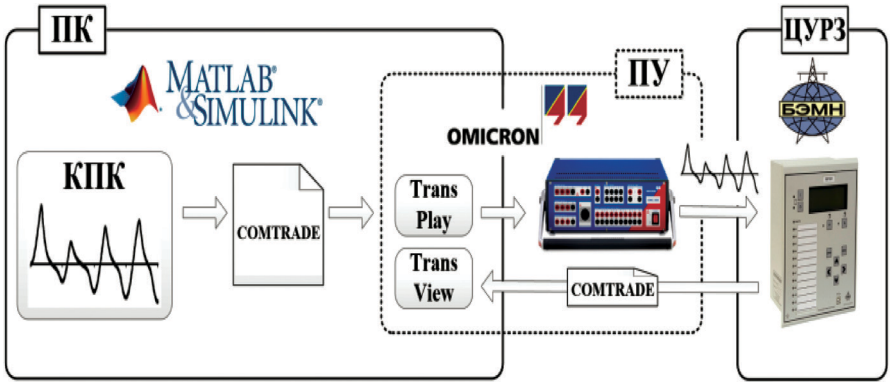


Рис. 6. Испытательный программно-аппаратный комплекс с разомкнутым циклом проведения испытаний

Структура ИПАК с использованием ПУ CMC 356 фирмы OMICRON представлена на рис. 6. Моделирование защищаемого объекта выполняется КПК, который может быть самостоятельным программным продуктом или реализован в системе динамического моделирования MATLAB-Simulink.

В состав ПО испытательных устройств входят специализированные программы, обеспечивающие выбор, воспроизведение и просмотр заранее подготовленных осциллограмм аварийных процессов в формате COMTRADE [6]. Также имеются специализированные программы моделирования элементов энергосистемы. Основными недостатками этих программ является ограниченный и малодокументированный набор математических моделей силового оборудования, что не позволяет в полной мере моделировать различные аварийные режимы элементов энергосистем. Также не предусмотрена возможность создания пользовательских моделей силового оборудования.

Для проведения испытаний устройств РЗ с помощью ИПАК в режиме разомкнутого цикла могут быть использованы разработанные в БНТУ на кафедре «Электрические станции» КПК, позволяющие получать методом вычислительного эксперимента входные информационные сигналы релейных защит силового электрооборудования.

Проведение вычислительного эксперимента в режиме замкнутого контура подразумевает наличие обратной связи между функционирующей в режиме реального времени моделью энергосистемы и испытуемым устройством РЗА. Модель энергосистемы воспроизводится в режиме реального времени в программной части КПК.

Моделирование режимов энергосистемы, при котором расчет параметров системы (мгновенных значений токов, напряжений и др.) в ходе вычислительного эксперимента получается в темпе, соответствующем скорости протекания процессов, называют моделированием в режиме реального времени.

Моделирование энергосистемы в реальном времени с физическим подключением устройств релейной защиты к моделирующей установке на сегодняшний

день является наиболее эффективным методом тестирования вторичного электрооборудования, а также для исследования режимов функционирования энергосистемы в переходных и аварийных режимах.

Исследование устойчивости энергосистемы при изменении режимов генерирующего и потребляющего электрооборудования, состояния устройств релейной защиты требуют проведения испытаний с помощью цифровых симуляторов в режиме замкнутого контура. При этом должны быть смоделированы обратные связи между функционирующей в режиме реального времени моделью энергосистемы и внешними устройствами.

Такой метод моделирования предъявляет очень жесткие требования к аппаратной части моделирующего комплекса по скорости вычислений и передачи данных от модели к испытуемому устройству. Подключаемые к моделирующему комплексу внешние устройства должны функционировать с организацией всех обратных связей между моделью энергосистемы и этими устройствами. При изменении режима модели энергосистемы изменение состояния испытуемой защиты, а также ответная реакция энергосистемы должны происходить максимально приближенно к тому, как это происходит в реальных условиях.

На рис. 7 представлен аппаратно-программный комплекс (симулятор) типа RTDS (Real Time Digital Simulator) [7], используемый для моделирования режимов энергосистемы в реальном времени.

Симулятор RTDS позволяет объединить реальные устройства с виртуальной моделью среды их эксплуатации и проводить комплексные испытания устройств РЗА с полноценной обратной связью и реакцией на изменения их состояния. Также RTDS позволяет проводить исследования энергосистем в статическом и динамическом режимах, выполнять испытания устройств РЗА, включая устройства, работающие по протоколу МЭК61850. С помощью испытательного комплекса можно исследовать работу систем автоматического регулирования и управления, например, систем автоматического регулирования

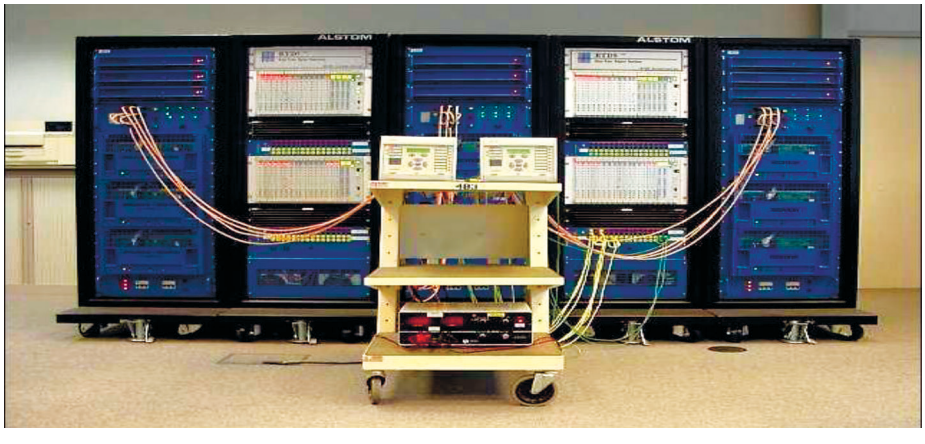


Рис. 7. Цифровой программно-аппаратный комплекс RTDS для моделирования режимов энергосистемы в реальном времени

возбуждения генераторов или контроллеров для силовой электроники; вырабатывать решения для повышения качества электрической энергии; обучать и проводить стажировку персонала.

Комплексов, подобных RTDS, в организациях ГПО «Белэнерго» и тем более в высших учебных заведениях Беларуси, готовящих специалистов в области электроэнергетики, на сегодняшний момент нет. Задачи, которые возникают при интеграции Белорусской атомной станции в Объединенную Белорусскую энергосистему, могли бы быть успешно решены с использованием подобных цифровых симуляторов. Однако чрезмерно высокая стоимость данных комплексов является основной проблемой их применения в проектных, научно-исследовательских и учебных организациях Беларуси.

Заключение. В БНТУ на кафедре «Электрические станции» энергетического факультета решены задачи в области информационного и математического обеспечения компьютерных программных комплексов для проведения исследований методом вычислительного эксперимента в том числе и в режимах реального времени.

Эффективность использования указанных комплексов в Белорусской энергосистеме, в учебном процессе подготовки и повышения квалификации кадров, а также их дальнейшее развитие и совершенствование могут быть обеспечены при создании межотраслевой структуры (центр, лаборатория), оснащенной современными средствами и оборудованием. Кадровое обеспечение указанной структуры должно состоять из опытных, высококвалифицированных энергетиков-практиков и научных работников.

Список использованных источников

1. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем / Ф. А. Романюк, В. И. Новаш. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. – 174 с.

2. Новаш, И. В. Математическое моделирование коммутационных режимов в электроустановках с трансформаторами / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк. – Минск : БНТУ, 2013. – 226 с.

3. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – 168 с.

4. Динамика [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.dynamics.com.ru. – Дата доступа : 08.03.2016.

5. OMICRON [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.omicronenergy.com/ru/. – Дата доступа : 08.03.2016.

6. IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems [Electronic resource] // IEEE Xplore. – Mode of access : https://ieeexplore.ieee.org/document/798772. – Date of access : 13.03.2022.

7. EnnLAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://ennlab.ru/rus. – Дата доступа : 08.03.2016.

References

1. Romanyuk, F. A. Informacionnoe obespechenie vychislitel'nogo eksperimenta v relejnoj zashchite i avtomatike energosistem / F. A. Romanyuk, V. I. Novash. – Minsk : VUZ-YUNITI, 1998. – 174 s.

2. Novash, I. V. Matematicheskoe modelirovanie kommutacionnyh rezhimov v elektroustanovkah s transformatorami / I. V. Novash, F. A. Romanyuk. – Minsk : BNTU, 2013.– 226 s.

3. Ispytaniya mikroprocessornyh tokovyh zashchit: teoriya, modelirovanie, praktika / I. V. Novash [et al.]. – Minsk : BNTU, 2021. – 168 s.

4. Dinamika [Electronic resource]. – Mode of access : http://www.dynamics.com.ru. – Date of access : 08.03.2016.

5. OMICRON [Electronic resource]. – Mode of access : https://www.omicronenergy.com/ru. – Date of access : 08.03.2016.

6. IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems [Electronic resource] // IEEE Xplore. – Mode of access : https://ieeexplore.ieee.org/document/798772. – Date of access : 13.03.2022.

7. EnnLAB [Electronic resource]. – Mode of access : http://ennlab.ru/rus. – Date of access : 08.03.2016.

УДК 338.45:620.9

С. Г. Прусов[1], О. И. Юркевич[2]

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ СИСТЕМ УЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ: ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ, ВЛИЯНИЕ НА УРОВЕНЬ ТАРИФОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ

[1]Кандидат экономических наук, Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь, РУП «Витебскэнерго», Витебск, Республика Беларусь
[2]РУП «Витебскэнерго», Витебск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье приведены результаты пост-анализа эффективности замены индукционных приборов учета на электронные, оценка эффективности влияния цифровизации данного аспекта деятельности РУП-облэнерго и влияние выполнения «Программы модернизации средств учета электрической энергии до 2023 года» на уровень тарифов на энергию. Объектом исследования является РУП «Витебскэнерго».

Ключевые слова: последствия цифровой трансформации, тарифы на электрическую энергию, индукционные и электронные приборы учета, программа модернизации средств учета электрической энергии.

S. G. Prusov[1], O. I. Yurkevich[2]

ECONOMIC CONSEQUENCES OF DIGITALIZATION OF ELECTRICITY METERING SYSTEMS: ECONOMIC EFFICIENCY, IMPACT ON THE LEVEL OF ELECTRICITY TARIFFS

[1]Ph. D. in Economics, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus, RUE «Vitebskenergo», Vitebsk, Republic of Belarus
[2]RUE «Vitebskenergo», Vitebsk, Republic of Belarus

Annotation. The article presents the results of a post-analysis of the effectiveness of replacing induction metering devices with electronic ones, an assessment of the effectiveness of the digitalization of this aspect of RUE-regional energy activities and the impact of the implementation of the «Program

for the modernization of electric energy metering devices until 2023» on the level of energy tariffs. The object of the study is RUE «Vitsebskenergo».

Keywords: consequences of digital transformation, tariffs for electric energy, induction and electronic metering devices, program of modernization of electric energy metering devices.

Введение. В 2010 г. на базе цеха технического обслуживания и ремонта приборов учета электрической энергии (далее – ЦТОиРПУЭЭ) филиала «Энергосбыт» РУП «Витебскэнерго» было проведено исследование, обосновывающее необходимость и целесообразность замены индукционных приборов учета на электронные [1]. В исследовании участвовала выборка из более чем 30 тыс. приборов учета (далее – ПУ), поступивших в ЦТОиРПУЭЭ. В качестве основных аргументов целесообразности осуществления замены индукционных приборов учета электрической энергии на электронные по результатам исследования обозначились следующие.

1. Согласно ГОСТ 6570-96 с изменениями № 1 от 01.09.2004 г. с 01.07.1997 г. прекращен выпуск индукционных счетчиков электроэнергии класса точности 2,5. Их эксплуатация была разрешена данным изменением до истечения первого межповерочного интервала. То есть счетчики класса точности 2,5 должны быть полностью исключены из обращения с 01.09.2012 г.

Согласно письму Комитета по стандартизации, метрологии и сертификации при Совмине Республики Беларусь от 17.04.2006 г. № 03-24/517-р, адресованному ГПО «Белэнерго», было указано на необходимость замены счетчиков класса 2,5 (это, по сути, все счетчики со сроком эксплуатации более 32 лет) после прохождения первого межповерочного интервала после введения данного изменения № 1.

Все счетчики (ГОСТ 6570-96) по достижению ими срока эксплуатации 32 года должны пройти перед их поверкой капитальный ремонт. Плановый ремонт и госповерка данных счетчиков согласно ч. 2 п. 4.7 «Правил пользования электрической энергии» должны лечь на затраты энергосистемы.

В Витебской области на момент исследования индукционные счетчики активной энергии находились в эксплуатации как у юридических лиц, так и у населения.

В типовых договорах на электроснабжения юридических лиц отсутствует пункт об обезличивании принадлежащего Потребителю электросчетчика. Следовательно, филиал «Энергосбыт» РУП «Витебскэнерго» может путем выдачи предписаний произвести замену на счетчик соответствующего класса точности за счет Потребителя (на основании требований ГОСТ 6570-96 с изменениями № 1). Применить данную практику к бытовой группе не представляется возможным из-за наличия в типовых договорах на электроснабжение населения пункта об обезличивании электросчетчиков.

В 2010 г. у населения по Витебской области эксплуатировалось более 500 тыс. шт. электрических счетчиков, их динамика приведена (согласно ведомственному отчету «Сведения о количестве потребителей электрической и тепловой энергии, обслуживаемых филиалом Энергосбыт») на рис. 1.

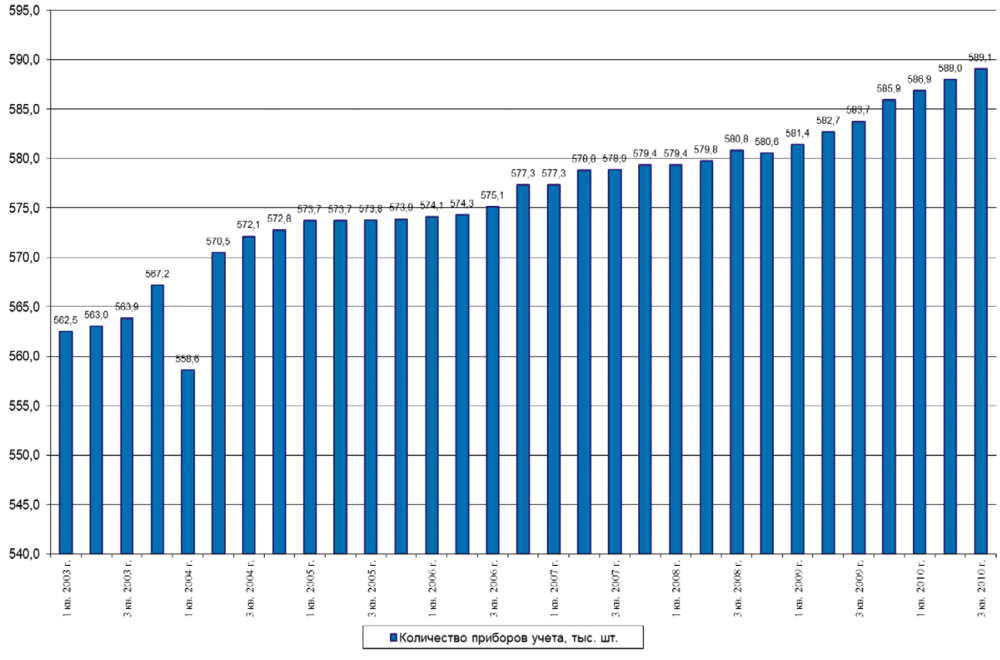


Рис. 1. Динамика количества электрических счетчиков, эксплуатируемых у населения Витебской области к середине 2010 г. [1]

2. Анализ данных о ремонтах счетчиков (приблизительно 82–83 тыс. в год) за 2008 г. – 8 мес. 2010 г., поступивших на ремонт в ЦТОиРПУЭЭ, показал, что более 96 % всех поступающих счетчиков в цех является индукционными, из них более 70 % старше 32 лет. Таким образом, исходя из данных об установленных у населения 589,1 тыс. счетчиков, получилось, что около 414 тыс. эксплуатируемых в быту ПУ (589,1 тыс. шт. × 70,3 %) имели возраст более 32 лет с классом точности, как правило, 2,5 (производились до 1980 г.).

3. Затраты на капитальный ремонт в части переменных затрат на тот момент составляли 91,1 % приобретения нового индукционного счетчика класса точности 2.0, а электронный прибор учета стоил в 3 раза дороже индукционного.

4. Фактическая погрешность приборов, поступивших в ЦТОиРПУЭЭ, составляла на момент исследования 6,8 % вместо заявленных 2,5 % (отклонение 4,3 п. п.). Основной причиной является наличие трущихся деталей (подшипник, подпятник, счетный механизм), которые со временем изнашиваются, устаревание смазки, попадающая пыль и грязь.

Таким образом, окупаемость мероприятия планировалась за счет следующего эффекта:

уменьшение переменных затрат на капитальный ремонт (25 % стоимости электросчетчика) – сразу после замены;

снижение потерь электроэнергии на 1,5 % – сразу после замены;

снижение потерь электроэнергии в течение срока эксплуатации (32 года).

Материалы и методы исследования. Исходными данными для расчета потерь в 2010 г. являлись:

среднее потребление одной точкой учета (с динамикой изменения за один межповерочный интервал) (рис. 2);

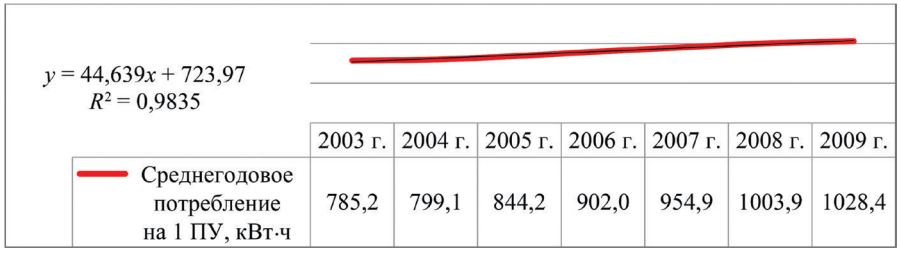
среднеотпускной тариф по населению (с динамикой изменения за один межповерочный интервал) (рис. 3);

величина недоучета одной точкой учета (фиксированная на момент перехода на другой вид счетчика и величина «ухода» индукционного счетчика, рассчитанная по линейной зависимости) (рис. 4).

По результатам расчетов простой срок окупаемости мероприятия должен был составить 7,5 года при эксплуатационном – 32 года.

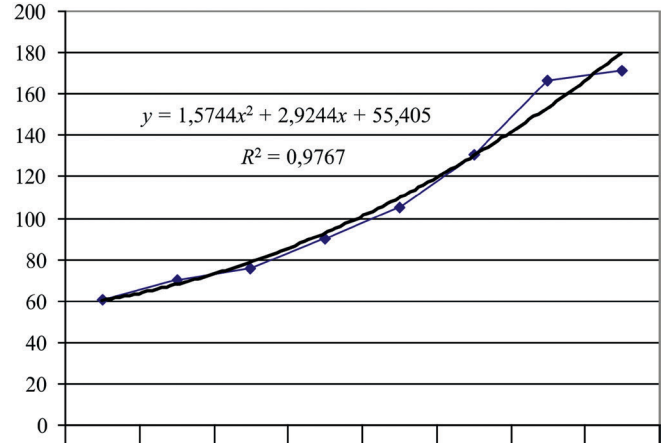
Результаты исследования и их обсуждение. На основании данного ТЭО в РУП «Витебскэнерго» были сделаны следующие выводы.

1. О целесообразности замены индукционных приборов учета на электронные изначально в промышленной группе. Таким образом, была утверждена



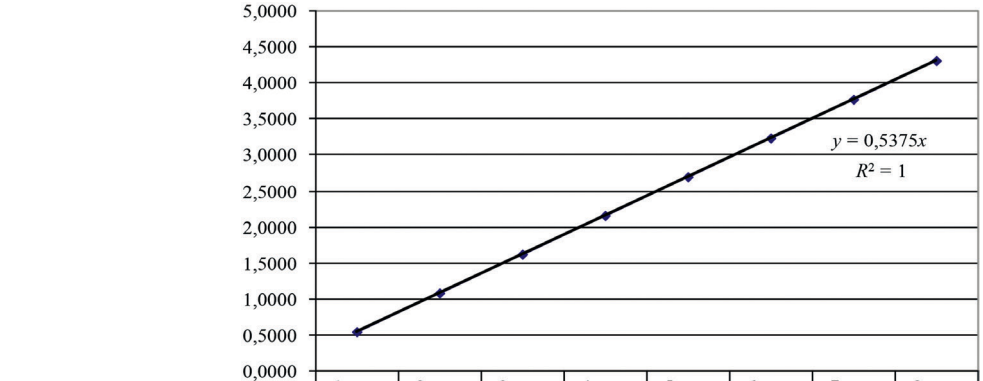
	2003 г.	2004 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.
Среднегодовое потребление на 1 ПУ, кВт·ч	785,2	799,1	844,2	902,0	954,9	1003,9	1028,4

Рис. 2. Динамика среднегодового потребление 1 ПУ, кВт·ч [1]



	2003 г.	2004 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.
Среднеотпускной тариф (быт)	60,5	70,4	75,5	89,8	105,1	130,7	166,7	171,0

Рис. 3. Динамика изменения среднеотпускных тарифов по бытовой группе потребителей в 2010 г. [1]



	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год	6 год	7 год	8 год
Процент недоучета энергии ПУ, кВт·ч за межповерочный интервал (t = 8 лет), %	0,5375	1,0750	1,6125	2,1500	2,6875	3,2250	3,7625	4,3000

Рис. 4. Динамика увеличения процента недоучета энергии ПУ за межповерочный интервал, % [1]

«Программа развития приборного парка учета электроэнергии РУП "Витебскэнерго" на 2011–2012 гг.» [2]. В данной программе был произведен детализированный расчет потребления на 1 ПУ и осуществлена классификация промышленных потребителей по уровням потребления в среднем в месяц и по видам установленных ПУ (1-фазный, 3-фазный): 300–500 кВт·ч; 500–700 кВт·ч; более 700 кВт·ч.

Также были детализированы сроки окупаемости по 6 вышеуказанным направлениям, они составили для 1-фазных приборов учета от 2,2 до 4,5 года, для 3-фазных – от 3,2 до 7,4 года.

2. Отсутствие собственного источника средств для реализации данного мероприятия у потребителей, относимых к населенческой тарифной группе. Данные затраты не были включены в обоснование уровня тарифов на электрическую энергию.

3. Необходимость обоснования целесообразности данного мероприятия в целом по Республике Беларусь, учитывая, что в энергосистеме сложился устойчивый стереотип, основанный на исследованиях данного же подразделения 1980 г., что величина «ухода» индукционного ПУ за межповерочный интервал составляет не более 1,5 %, и, соответственно, счетчики, настроенные в пределах класса точности с величиной +2,5 %, за межповерочный интервал показывали среднее потребление +1 %.

Итогом данной работы стало утверждение в целом по ГПО «Белэнерго» в 2015 г. «Программы модернизации средств учета электрической энергии до 2023 года» [3].

В рамках данной программы осуществляется замена индукционных приборов учета электрической энергии на электронные для возможности последующего их объединения в систему АСКУЭ по следующему графику замены (рис. 5) [3].

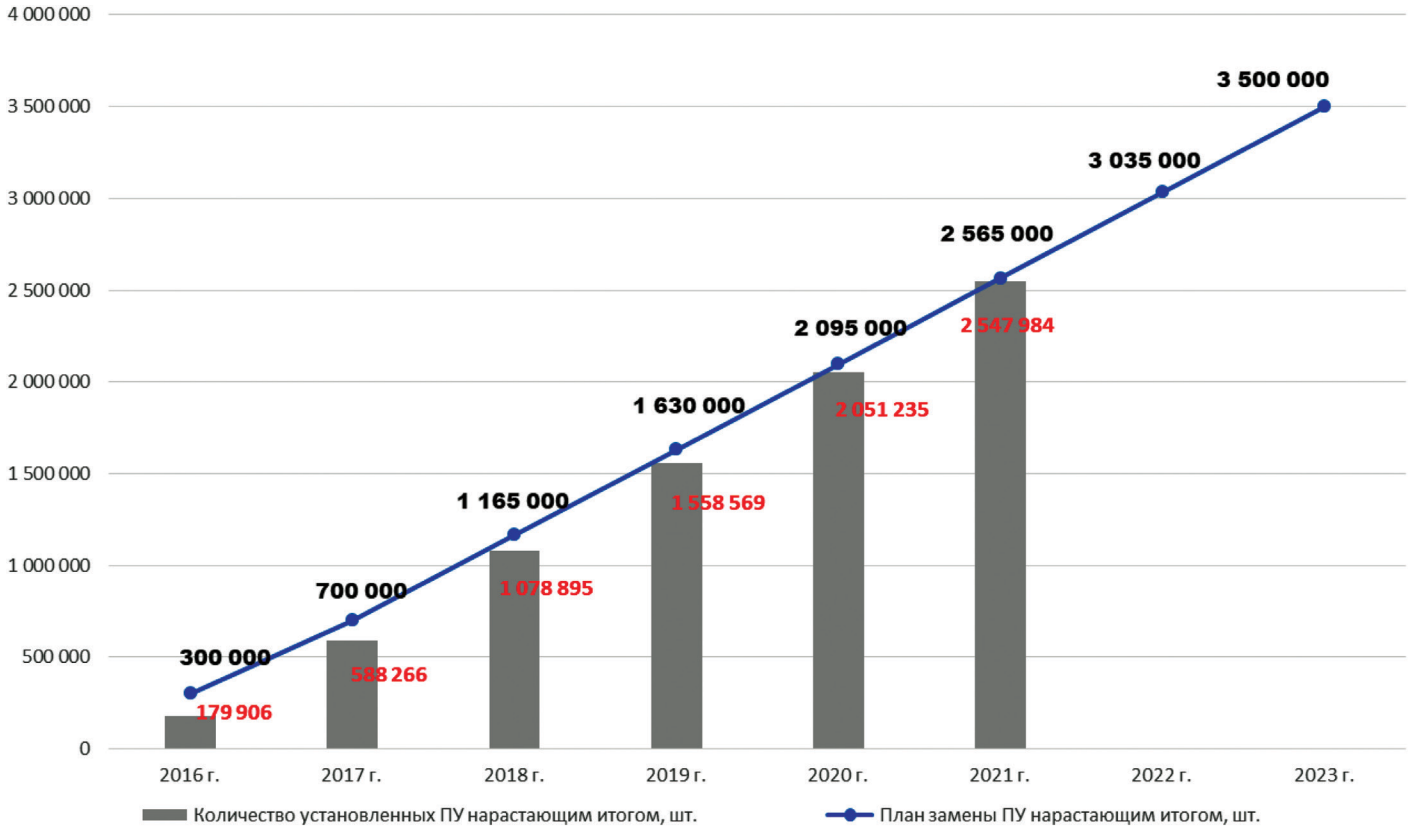


Рис. 5. Реализация программы модернизации средств учета электрической энергии до 2023 г.

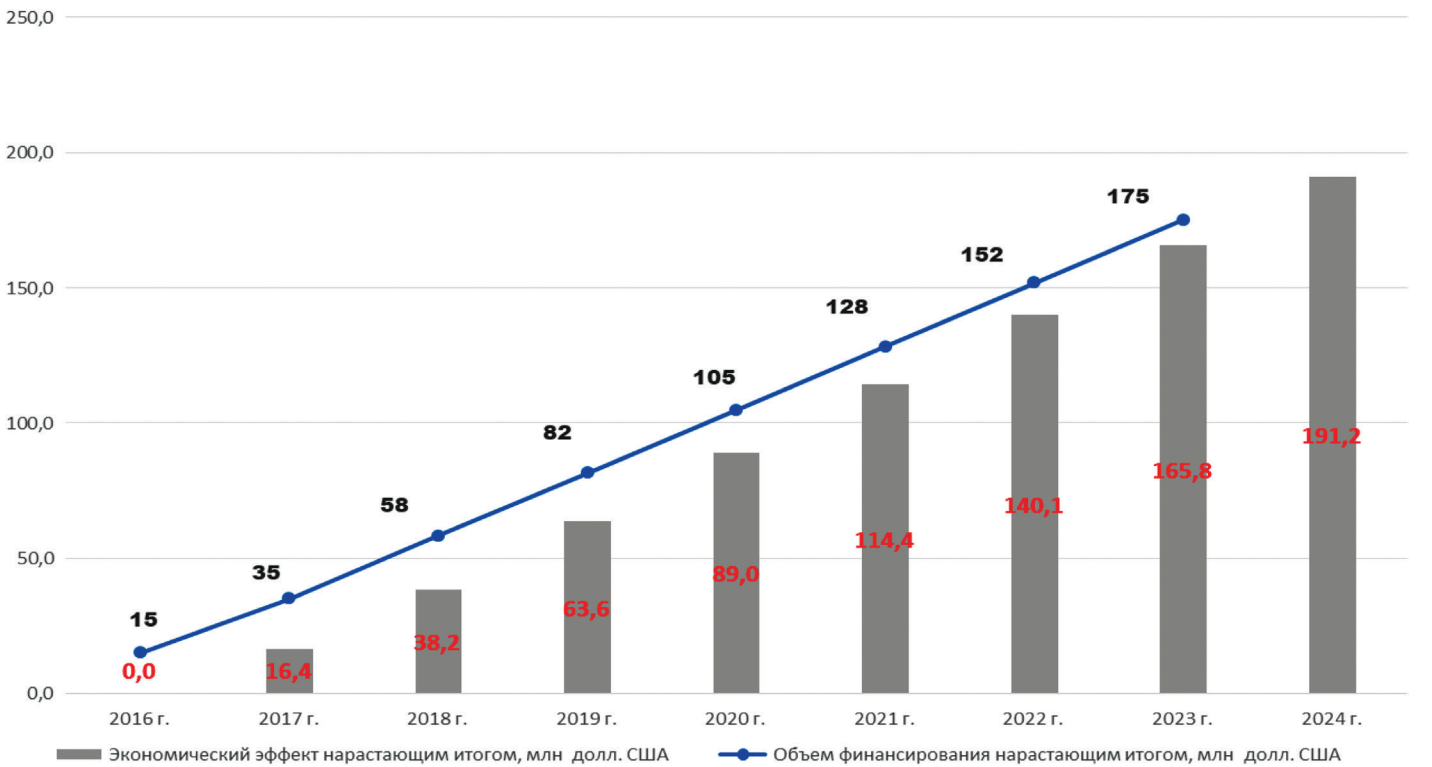


Рис. 6. Объем финансирования программы модернизации средств учета электрической энергии до 2023 г. и ожидаемый эффект от ее реализации к 2024 г.

На финансирование данной программы было предусмотрено 175 млн долл. США с экономическим эффектом от ее реализации к 2024 г. на уровне 191,2 млн долл. США [3] (рис. 6).

В качестве основных факторов получения эффектов рассматривались.

1. Экономия за счет увеличения точности учета. При этом было отмечено, что при нагрузках в 10 и 20 %, при которых в основном идет потребление у населения при проведении контрольных замеров, в целом по республике погрешность индукционных счетчиков по истечении межповерочного интервала составляла не 6,8 % как в исследованиях ЦТОиРПУЭЭ в 2010 г., а 16,8 %. При этом для упрощения в расчете экономической эффективности принималось 10 %.

Среднее потребление принималось на уровне 1344 кВт·ч в год при тарифе для населения 7 цент. США за 1 кВт·ч.

Таким образом, общая экономия по республике должна была составить к 2024 г. с учетом графика замен 141,0259 млн долл. США.

2. Экономия за счет снижения уровня хищений электрической энергии оценивалась на уровне 10 % от годового потребления в бытовом секторе, что эквивалентно 117,7 тыс. долл. США в год и, соответственно, 0,934 млн долл. США по программе.

3. Экономия за счет ремонтов счетчиков должна была составить приблизительно 20 млн долл. США.

4. Экономия за счет фонда оплаты труда электромонтеров, занятых заменой приборов учета электрической энергии, рабочих, занятых ремонтом индукционных приборов учета, а также контролеров оценивалась в 29,218 млн долл. США.

Таким образом, простой срок окупаемости программы должен был составить 8 лет, или 1 межповерочный интервал.

В 2022 г. было проведено исследование, в котором участвовало более 15 тыс. счетчиков, установленных в рамках вышеуказанной программы модернизации.

При этом выбирались квартиры, у которых совпадали сроки окончания межповерочного интервала индукционного прибора учета и дата установки нового электронного. Производился анализ потребления данными объектами помесячно за 3 года до данной даты и 3 года после.

Из выборки исключались квартиры с непостоянным потреблением, осуществляющие оплату равными показаниями, с отсутствующим потреблением в какие-либо периоды и т. п., которые бы искажали данные исследования. В результате было оставлено более 8,3 тыс. квартир в Витебской области в различных ее районах, городах, селах и деревнях с различным уровнем потребления.

По результатам были получены следующие величины изменения полезного отпуска – +3,9 % в среднем за 3 года. Данная величина несколько ниже заложенной в технико-экономическом обосновании, для которого она составляла

для последних 3 лет – +5,3 % (отклонение –1,4 п. п.). И, соответственно, данная величина значительно ниже включенной в Программу модернизации на уровне 10 % (отклонение – 6,1 п. п.).

Фактическая стоимость приобретенных приборов учета за данный период при 50 долл. США, включенных в программу, составила, по данным заключенных договоров по Витебской области порядка 45 долл. США. Сделаем сравнительный анализ эффективности реализуемого в настоящее время мероприятия (см. таблицу).

Сравнительный анализ эффективности замены индукционных приборов учета на электронные

Показатель	Единица измерения	Вариант ТЭО	Программа модернизации	Фактический анализ по РУП «Витебскэнерго»	В целом по республике в условиях данных о доучете Витебской области
Средняя стоимость электронного прибора учета	Долл. США	44,6	50	45,0	45,0
Среднее потребление в год на 1 прибор учета	кВт·ч	1052,4	1344	1215,45	1470,40
Средний прирост доучета ПУ в год	кВт·ч	55,4	72,4	47,4	57,3
Средний тариф для населения	Цент США	5,8	7	6,53	6,53
Снижение затрат на ремонт в расчете на 1 прибор	Долл. США	18,4	5,0	18,4	5,0
Экономия в год за счет прироста потребления и снижения затрат на ремонты	Долл. США	5,51	5,69	5,40	4,37
Окупаемость (простой срок)*	Год	8,1	8,8	8,3	10,3

* Срок окупаемости (8,8 года) по программе модернизации отличается в связи с исключением из оценки экономии от сокращения штатной численности для сопоставимости анализа.

Заключение. Таким образом, можно сделать следующие основные выводы.

1. В целом с учетом полученных результатов можно говорить об эффективности реализации данной программы.

2. Фактически получено меньшее значение доучета потребления, чем ожидалось, особенно по сравнению с Программой модернизации. Значения в первоначальном ТЭО отклонились на 14,4 % с фактически полученными через 10 лет, и 34,5 % по сравнению с программой модернизации.

3. Неоднозначным фактором является оценка переменной составляющей величины ремонта индукционных приборов учета, поскольку РУП «Витебскэнерго»

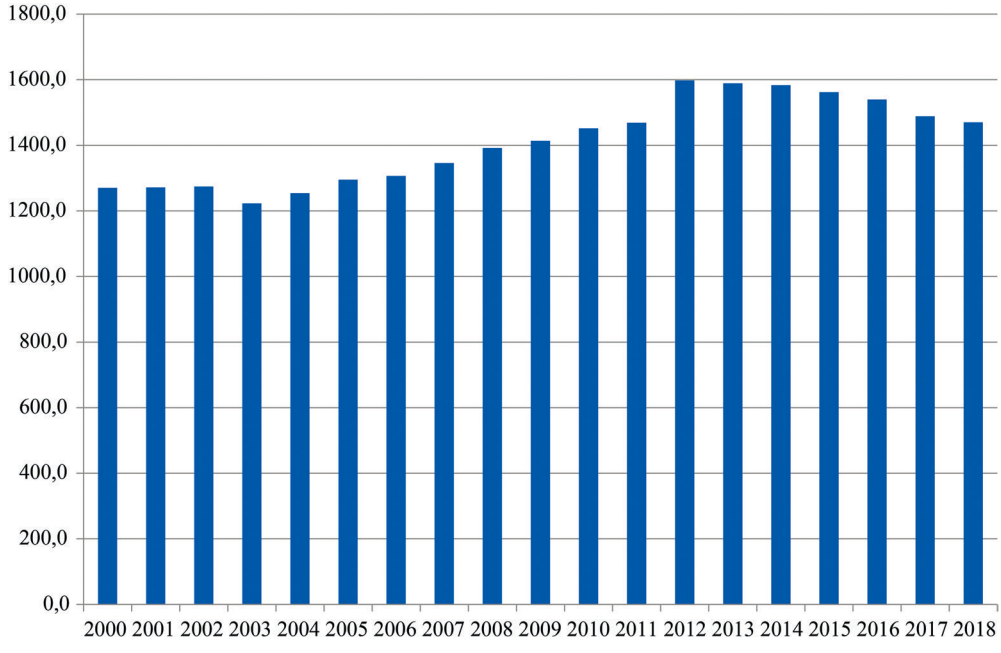


Рис. 7. Динамика среднего потребления населения в год на 1 прибор учета, кВт·ч

несло данные затраты в 2010 г., а ряд РУП-облэнерго – нет. Вследствие этого получены отличные оценки для РУП «Витебскэнерго» и в целом по Беларуси сроков окупаемости, которые в совокупности со средним потреблением (рис. 7) дали увеличение сроков окупаемости программы для Беларуси.

4. Смещение «вправо» в целом сроков окупаемости по рассмотренным факторам является обычным явлением для большинства инвестиционных проектов, при этом данное смещение не является критичным поскольку срок эксплуатации электронных приборов учета значительно превышает расчетные сроки окупаемости.

5. Смещение вправо сроков окупаемости от заложенных в Программу модернизации свидетельствует об увеличении нагрузки на тариф по сравнению с планировавшимся.

Список использованных источников

1. Прусов, Г. В. Технико-экономическое обоснование замены индукционных счетчиков со сроком эксплуатации свыше 32 лет. Вариант 1. Индукционные, классом точности 2.0. Вариант 2. Электронные, классом точности 1.0. / Г. В. Прусов, С. Г. Прусов // Филиал «Энергосбыт» РУП «Витебскэнерго. – 2010. – 13 с.

2. Программа развития приборного парка учета электроэнергии РУП «Витебскэнерго» на 2011–2012 годы // РУП «Витебскэнерго». – 2010. – 37 с.

3. Программа модернизации средств учета электрической энергии до 2023 года : утв. Белэнерго 28.09.2015. – Минск : Белэнерго.

References

1. Prusov, G. V. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie zameny indukcionnyh schetchikov so srokom ekspluatacii svyshe 32 let. Variant 1. Indukcionnye, klassom tochnosti 2.0. Variant 2. Elektronnye, klassom tochnosti 1.0 / G. V. Prusov, S. G. Prusov // Filial "Energosbyt" RUP "Vitebskenergo". – 2010. – 13 s.
2. Programma razvitiya pribornogo parka ucheta elektroenergii RUP "Vitebskenergo" na 2011–2012 gody // RUP «Vitebskenergo». – 2010. – 37 s.
3. Programma modernizacii sredstv ucheta elektricheskoj energii do 2023 goda : utv. Belenergo 28.09.2015. – Minsk : Belenergo.

УДК 620.16

Н. Н. Норхожаева, Н. К. Камалов, С. Р. Екубова

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ДВУХОСНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Ферганский политехнический институт, Фергана, Узбекистан

Аннотация. В статье приводятся результаты исследований синхронных машин двухосного возбуждения, работающих в приводах прокатных станов с резкопеременной ударной нагрузкой, приведен алгоритм составления математической модели с использованием системы дифференциальных уравнений Парка – Горева с учетом параметров продольно поперечных обмоток возбуждения, дан сравнительный анализ результатов расчета с результатами экспериментов на физической модели.

Ключевые слова: резко переменный, двухосного возбуждения, наброс, сильное, массивный, демпферная система, физическая модель, система координат, электромеханический, электромагнитный, фазные координаты, потокосцепление, амплитуда, насыщение.

N. N. Norkhozhaeva, N. K. Kamalov, S. R. Yokubova

MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATION OF TRANSIENT PROCESSES OF A SYNCHRONOUS MACHINE OF TWO-AXIS EXCITATION

Fergana Polytechnic Institute, Fergana, Uzbekistan

Annotation. The article presents the results of studies of synchronous machines with biaxial excitation of excitation operating in drives of rolling mills with a sharply variable impact load, an algorithm for compiling a mathematical model using the Park Gorev system of differential equations, taking into account the parameters of longitudinally transverse excitation windings, is given a comparative analysis of the calculation results with the results of experiments on a physical model.

Keywords: sharply variable, biaxial excitation, surge, strong, massive, damper system, physical model, coordinate system, electromechanical, electromagnetic, phase coordinates, flux linkage, amplitude, saturation.

Введение. В докладе приводятся результаты исследований синхронных машин двухосного возбуждения, используемые в приводах механизмов с резкопеременной нагрузкой, которые вызывают колебания ротора и остальных

режимных параметров синхронных двигателей одноосного возбуждения [5, 6]. Применение систем автоматического регулирования, даже «сильного» регулирования в функции первых и вторых производных колебаний напряжения, тока и угла, не в состоянии обеспечить апериодический переход на другой режим синхронных двигателей одноосного возбуждения. Благодаря наличию продольно-поперечного возбуждения с автоматическим регулированием тока и мощной демпферной системы, распределенной в массивных полюсных сердечниках синхронного двигателя, обеспечивается апериодический переход на другой режим.

В статье приведены результаты расчетно-экспериментальных исследований переходных процессов синхронных двигателей двухосного возбуждения [1, 2] в характерных режимах, таких как определение колебаний активной и реактивной мощности, угла выбега ротора, динамической устойчивости при резких набросах и сбросах нагрузки импульсного характера, исходя из аналитических и экспериментальных данных разработан алгоритм расчета параметров. Эксперименты проводились на физической модели синхронного двигателя двухосного возбуждения, изготовленной на базе явно полюсного синхронного двигателя типа МСА 72/4.

Актуальность проблемы определения параметров и электромагнитных величин обусловливается тем, что от качества ее решения в конечном итоге зависит успех применения математического моделирования электроэнергетических систем.

Материалы и методы исследования. Моделирование переходных процессов синхронных машин двухосного возбуждения может осуществляться в различных системах координат, выбор которых определяется конкретными условиями решаемой задачи. Синхронные двигатели двухосного возбуждения являются самыми сложными элементами электроэнергетических систем.

Подробный учет всех элементов системы с синхронными машинами в математической модели при использовании современных вычислительных средств невозможен, поэтому при выборе математических моделей приходится стремиться к максимально возможным допущениям, но таким, чтобы они правильно отражали основные процессы двигателя при нагрузке на всем диапазоне изменения частоты вращения синхронных машин даже при асинхронных режимах.

При расчетах электромеханических и электромагнитных переходных процессов в огромном числе случаев для систем с синхронными машинами двухосного возбуждения, работающих с резко переменной нагрузкой, для подробного учета используются уравнения, записанные в координатных осях d, q, жестко связанных с ротором, или d_c, q_c, синхронно вращающихся [2, 3]. При этом математическое моделирование переходных процессов может осуществляться как по хорошо известным полным или упрощенным уравнениям Парка – Горева, так и с использованием схем замещения, представляемых в координатных осях d, q, o. Уравнения машин в осях d и q, являющиеся универсаль-

ной типовой моделью, можно получить путем преобразования из исходной системы уравнений, записанной в системе фазных координат *a*, *b*, *c*.

Существует несколько форм представления уравнений типовой модели, отличающихся друг от друга лишь знаками перед слагаемыми в обеих частях уравнений, что зависит от выбора положительных направлений токов, напряжения, координатных осей, их вращения и вращения ротора.

С учетом того, что ось *d* опережает ось *q*, можно записать уравнения типовой универсальной математической модели синхронной машины в виде:

$$\begin{aligned} u_d &= ri_d - p\Psi_d - \omega_s(1+s)\Psi_q \\ u_q &= ri_q - p\omega_q - \omega_s(1+s)\Psi_d \\ u_{fd} &= r_{fd} i_{fd} + p\Psi_{fd} \\ u_{fq} &= r_{fq} i_{fq} + p\Psi_{fq}, \\ 0 &= r_k i_{kd} + p\Psi_{kd} \\ 0 &= r_{kq} i_{kq} + p\Psi_{kq} \\ M_T &= J\omega_s p_s + 1{,}5(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \end{aligned} \qquad (1)$$

где u_d, u_q – продольная и поперечная составляющие напряжения на зажимах статора машины; Ψ_d, Ψ_q – потокосцепление обмоток статора по продольной и поперечной осям; Ψ_{fd} и Ψ_{fq} – потокосцепления продольной и поперечной обмотки возбуждения; Ψ_{kd} и Ψ_{kq} – потокосцепление продольного и поперечного демпферных массивных контуров; u_{fd} и u_{fq} – напряжение продольной и поперечной обмотки возбуждения; i_d, i_q – продольная и поперечная составляющие тока статора; i_{fd}, i_{fq} – токи продольной и поперечной обмотки возбуждения; i_{kd}, i_{kq} – токи продольных и поперечных успокоительных контуров массивных полюсов.

Заключение. Анализ полученных результатов исследований синхронных машин двухосного возбуждения на физической и математической модели показали, что расхождение значений параметров между экспериментальным и расчетным составляет 7,2 %.

Список использованных источников

1. Сыромятников, И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И. А. Сыромятников. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

2. Пирматов, Н. Б. Анормальные режимы работы синхронных двигателей двухосного возбуждения / Н. Б. Пирматов, М. Г. Ахматов. – Ташкент : ТГТУ, 2003. – 158 с.

3. Важнов, А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А. И. Важнов. – Л. : Энергия, 1980. – 256 с.

4. Титов, В. В. Турбогенераторы: расчет и конструкции / В. В. Титов, Г. М. Хуторецкий, Г. А. Загородная ; под ред. Н. П. Иванова, Р. А. Лютера. – Л. : Энергия, 1967. – 895 с.

5. Kamolovich, K. N. The principle of operation of transformers / K. N. Kamolovich, N. N. Nasirovna // Academicia: An International Multidisciplinary Research Journal. – 2021. – Т. 11, № 3. – С. 1764–1768.

References

1. Syromyatnikov, I. A. Rezhimy raboty asinhronnyh i sinhronnyh dvigatelej / I. A. Syromyatnikov. – M. : Energoatomizdat, 1984. – 240 s.

2. Pirmatov, N. B. Anormal'nye rezhimy raboty sinhronnyh dvigatelej dvuhosnogo vozbuzhdeniya / N. B. Pirmatov, M. G. Ahmatov. – Tashkent : TGTU, 2003. – 158 s.

3. Vazhnov, A. I. Perekhodnye processy v mashinah peremennogo toka / A. I. Vazhnov. – L. : Energiya, 1980. – 256 s.

4. Titov, V. V. Turbogeneratory : Raschet i konstrukcii / V. V. Titov, G. M. Hutoreckij, G. A. Zagorodnaya ; pod red. N. P. Ivanova, R. A. Lyutera. – L. : Energiya, 1967. – 895 s.

5. Kamolovich, K. N. The principle of operation of transformers / K. N. Kamolovich, N. N. Nasirovna // Academicia: An International Multidisciplinary Research Journal. – 2021. – T. 11, № 3. – S. 1764–1768.

УДК 338.27

Е. В. Гальперова

ЦИФРОВИЗАЦИЯ В СЕКТОРЕ ЗДАНИЙ – ОДИН ИЗ ПУТЕЙ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИКИ

Кандидат технических наук, доцент, Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Приведены возможности повышения энергоэффективности в строительстве и эксплуатации зданий при внедрении цифровых технологий. Кратко описаны методический подход и результаты оценки влияния мировых тенденций распространения цифровых технологий в жилом секторе России на снижение выбросов CO_2 в энергетике.

Ключевые слова: энергопереход, декарбонизация, цифровизация, прогнозирование, энергоэффективность, энергопотребление.

E. V. Galperova

DIGITALIZATION IN THE BUILDINGS SECTOR IS A ONE OF THE WAYS TO DECARBONIZE THE ENERGY SECTOR

Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Annotation. The possibilities of increasing energy efficiency in the construction and operation of buildings with the introduction of digital technologies are given. The methodological approach and the results of assessing the impact of global trends in the spread of digital technologies in the residential sector of Russia on the reduction of CO_2 emissions in the energy sector are briefly described.

Keywords: energy transition, decarbonization, digitalization, forecasting, energy efficiency, energy consumption.

Введение. Магистральной тенденцией в ближайшие десятилетия станет декарбонизация мировой экономики. Согласно [13] Германия планирует к 2050 г. сократить выбросы CO_2 на 80–95 % от уровня 1990 г., Великобритания – на 80 %, Япония, Франция и Канада – на 73–78 %. Более того, в 2019 г. Европейская комиссия объявила о планах скорректировать экономический курс Европейского союза, чтобы уже к 2050 г. достичь углеродной нейтральности.

В России также принят ряд документов направленных на снижение выбросов парниковых газов. В рамках целевого сценария Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов

парниковых газов до 2050 г. предполагается уменьшение выбросов: к 2050 г. на 60 % от уровня 2019 г. и на 80 % от уровня 1990 г. Дальнейшая реализация этого сценария позволит России достичь углеродной нейтральности к 2060 г. [9].

Согласно данным, приведенным в докладе «2021 Global status report for buildings and construction» Международного энергетического агентства, в 2020 г. в мире доля сектора строительства и эксплуатации зданий составила 36 % в конечном потреблении энергии и 37 % в выбросах CO_2, связанных с производством потребляемой энергии. Наибольший вклад в это количество вносит производство электроэнергии для использования в зданиях (49 % от общего объема), 23 % образуется при непосредственном сжигании топлива (для отопления, производства горячей воды и приготовления пищи) и 28 % выделяется в процессе производства строительных материалов (таких как сталь, цемент и стекло). Сокращение выбросов углерода в секторе строительства и эксплуатации зданий будет иметь решающее значение для реализации целей Парижского соглашения в области климата и достижения нулевых выбросов CO_2 к 2050 г.

Возможности для осуществления этих целей лежат, в том числе, в сфере применения цифровых технологий. Во многих отраслях промышленности внедряются проекты, связанные с цифровизацией сбора и анализа информации, обработка которой с применением методов искусственного интеллекта позволяет создавать цифрового двойника производства, автоматизировать и оптимизировать технологические процессы с целью повышения эксплуатационной и энергетической эффективности [14].

Материалы и методы исследования. Цифровая трансформация затрагивает все этапы жизненного цикла зданий. Получение, обработка и использование больших объемов данных дает возможность инженерам-проектировщикам, организациям по монтажу и вводу в эксплуатацию, эксплуатирующим организациям, энерго- и ресурсоснабжающим организациям принимать более взвешенные решения при проектировании, эксплуатации, модернизации и утилизации зданий [1]. Например, BIM-технология (Building Information Modeling) – компьютерная 3D-модель здания объединяет информацию по отдельным элементам, включая характеристики используемых материалов, спецификации, стоимость, графики строительных работ, функциональные и эксплуатационные характеристики зданий и проч. Важнейшим преимуществом этой технологии является взаимозависимость всех типов информации, которые обновляются автоматически при внесении каких-либо изменений. Модель содержит также инструменты управления стоимостью и рисками, сроками выполнения работ, вариативностью исполнения проектов. Использование BIM-технологии позволяет снизить вероятность ошибок и погрешностей в проектной документации до 40 %, время на разработку проекта – на 20–50 %, время на его проверку – в 6 раз, сроки координации и согласования проекта – до 90 % [10].

Применение на стройплощадках автоматизации и роботизации рутинных или физически тяжелых операций (сварка, установка и скрепление арматуры, подъем и перемещение грузов, укладка кирпичей, отделочные работы и др.),

внедрение беспилотной тяжелой строительной техники, использование элементов (модулей), изготовленных на цифровых фабриках непосредственно по информационной модели здания методом 3D-печати, распространение дронов для мониторинга хода строительных работ, технологии виртуальной и дополненной реальности (VR/AR) снижают трудозатраты и сроки строительства.

Уже сегодня на отдельных заводах по производству цемента, металла, стекла огромные объемы рабочих данных передаются, записываются, систематизируются, изучаются и используются для моделирования и оптимизации производства в реальном времени. Например, производство клинкера или помол цемента, на заводах осуществляется большей частью автономно, что дает снижение потребления энергии и выбросов CO_2 [11]. В металлургической промышленности за счет цифровизации можно увеличить выпуск металла на 3–5 % при экономии топлива 5–10 % и уменьшении выбросов на 15–30 % [6].

Требования по декарбонизации стимулируют использование передовых технологий в части теплозащиты, теплоэнергоснабжения и климатизации зданий [2]. Существует огромная возможность повышения эффективности использования энергии в зданиях. Цифровые решения выполняют три основные функции: 1) мониторинг энергопотребления (например, с помощью «умных счетчиков»); 2) выявление потенциальной экономии энергии (с помощью датчиков движения, температуры, освещенности); 3) снижение потребления энергии за счет интеллектуального управления (алгоритмы прогнозного поведения потребителей и др.).

Система управления зданием (Building Management System (BMS)) включает технологии «умный дом», Интернет вещей, технологии обработки больших данных, интеллектуальные системы управления инженерным оборудованием. BMS позволяет зданиям как бы «видеть», что происходит внутри, и по-новому взаимодействовать с энергетическими системами, к которым они подключены. Уже появился новый тип здания – здание, взаимодействующее с сетью (Grid Interactive Building). Grid-Interactive Buildings с помощью интеллектуальных элементов управления имеют возможность оптимально сочетать технологии энергоэффективности, хранения энергии, возобновляемых источников энергии и гибкости нагрузки [3, 12].

Весь комплекс новых технологий, решений и бизнес-моделей, который позволяет наладить взаимодействие зданий и электрических сетей нового поколения (Smart grid), объединяются в концепции Grid Edge (решения «на стыке сетей»). Grid Edge – это интерфейс, с помощью которого интеллектуальная энергосистема взаимодействует с подключенными потребителями энергии и в котором осуществляется эффективный контроль энергоснабжения, позволяющий снижать энергопотребление и влиять на устойчивость работы энергосистемы и уровень выбросов углерода [11]. Grid-Interactive Building, как часть концепции Grid Edge, может сыграть активную роль в декарбонизации энергетической системы.

В ИСЭМ СО РАН разработан и постоянно совершенствуется методический подход к долгосрочному прогнозированию энергопотребления в условиях растущей неопределенности (см. подробнее [4]). Особенностью подхода является последовательный итеративный процесс сужения диапазона неопределенности возможных траекторий спроса на энергоносители от дальней перспективы к ближней. Сужение осуществляется путем выделения важных задач на разных этапах прогнозного периода и решения их методами, соответствующими точности имеющейся информации и ценности результатов для дальнейшего исследования. Важной чертой подхода является возможность (необходимость) корректировки результатов последующих периодов на основе решений предыдущих периодов. С использованием упомянутого подхода была дана оценка возможного изменения энергопотребления в жилом комплексе России на период до 2050 г. для двух вариантов. Первый вариант предполагал сохранение наблюдаемых в РФ в предыдущие десятилетия тенденций в потреблении энергии, второй – учитывал изменение эффективности использования энергии за счет цифровых технологий в соответствии с мировыми тенденциями их распространения. Основные макроэкономические показатели исследуемых вариантов принимались на основе тенденций, заложенных в базовом сценарии Прогноза социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года, которые были актуализированы в соответствии с достигнутыми к 2020 г. значениями и пролонгированы до 2050 г. с учетом реализации целей, обозначенных в Указе Президента «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года». Указ, в частности, предусматривает увеличение объема жилищного строительства к 2030 г. не менее чем до 120 млн кв. м в год. При сохранении этих объемов ввода до 2050 г. обеспеченность населения жилой площадью может увеличиться в 1,8 раза по сравнению с 2020 г. и составить к концу периода 48 кв. м/чел.

Мировой опыт показывает, что применение в жилых домах технологий интеллектуального управления использованием энергии создает условия для повышения уровня комфорта при снижении объемов потребления топливно-энергетических ресурсов и повышении надежности энергоснабжения. Согласно прогнозу Международного энергетического агентства [5] применение цифровых технологий позволяет снизить общее потребление энергии в домах в период 2017–2040 гг. на 10 %. Наиболее значительная экономия энергии возможна в процессах кондиционирования и отопления благодаря установке датчиков и интеллектуальных термостатов (15 %-50 % в зависимости от типа здания и системы управления). Для России это особенно актуально, так как более 60 % энергопотребления в жилом секторе составляет отопление.

Результаты исследования и их обсуждение. Исследование показало, что в варианте реализации мировых тенденций распространения цифровых технологий в жилом комплексе России снижение потребления централизованного тепла может составить около 360 млн Гкал (52 %).

Для расчета соответствующего снижения выбросов CO_2 в энергетике, обусловленного уменьшением объема производства теплоэнергии, были проанализированы приведенные в [7] данные: структура производства централизованного тепла (доля тепловых электростанций и котельных), объемы потребности в топливе и его структура на тепловых электростанциях и котельных. Оценка проводилась в предположении сохранения на рассматриваемую перспективу структуры производства тепла и расхода топлива, характерного для 2020 г.

На основе структуры производства тепла (табл. 1) и удельных расходов топлива для производства тепловой энергии определялся объем сэкономленного топлива на станциях и котельных. Принимая во внимание структуру топлива (табл. 2) и коэффициенты выбросов CO_2 при сжигании ископаемого топлива (табл. 3), прогнозное снижение потребления тепла может уменьшить выбросы CO_2 в энергетике не менее чем на 100 млн т.

Таблица 1. **Основные показатели производства тепловой энергии в РФ в 2020 г.**

Показатели	ТЭС	Котельные
Производство тепла, млн Гкал	563,7	565,6
Расход топлива, млн т у. т.	87,1	89,3

Источник: составлено автором по [7].

Таблица 2. **Структура используемого топлива для производства тепловой энергии в РФ в 2020 г., %**

Тип топлива	ТЭС	Котельные
Природный газ	76	82
Каменный уголь	23	14
Топочный мазут	1	4

Источник: составлено автором по [7].

Таблица 3. **Коэффициенты для расчета выбросов CO_2 при сжигании ископаемого топлива, т/т у. т.**

Тип топлива	Выбросы CO_2
Природный газ	1,59
Каменный уголь	2,7–2,9*
Топочный мазут	2,27

* В зависимости от марки угля.
Источник: составлено автором по [8].

Безусловно, подобная оценка является приблизительной, и возможные изменения в структуре производства и использования топлива в сторону нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) приведут к уменьшению эффекта, тем не менее она показывает возможности и масштабы влияния применения цифровых технологий в жилом секторе России на снижение выбросов CO_2 в энергетике.

Заключение. Ключевым условием энергетического перехода, обеспечивающего снижение выбросов парниковых газов, является применение цифровых технологий во всех секторах экономики. Цифровизация охватывает широкий спектр проблем: от сбора детальной цифровой информации онлайн до обработки данных, оптимизации производства, передачи, распределения, потребления товаров, услуг, энергии.

Применение в секторе строительства и эксплуатации зданий технологий обработки больших массивов данных (Big Data), информационного моделирования зданий (BIM), умных систем управления инженерным оборудованием (BMS) на основе оптимизационных решений, технологий умного дома (Smart home), включая технологии Интернета вещей (IoT), а также высокотехнологичного энергоэффективного оборудования, инновационных материалов, НВИЭ и проч., позволит снизить необходимые объемы потребления энергоресурсов при строительстве и функционировании зданий и будет способствовать декарбонизации энергетики. Для достижения этой цели цифровые технологии должны найти широкое применение и в самой энергетике.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках Проекта государственного задания № FWEU-2021-0003 Программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. (рег. № АААА-А21-121012090014-5) и при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-010-00204.

Список использованных источников

1. Бергер, М. А. Big Data: аналитика больших данных в строительной отрасли / М. А. Бергер, П. А. Мэтью, Т. Уолтер // Энергосбережение. – № 6. – 2019. – С. 40–50.

2. Бродач, М. М. Декарбонизация как инструмент стимулирования энергосбережения / М. М. Бродач, Н. В. Шилкин // Энергосбережение. – 2021. – №7. – С. 4–11.

3. Взаимодействие умных зданий и интеллектуальных сетей – новые возможности для достижения целей по декарбонизации // Энергосбережение. – 2021. – № 6. – С. 8–12.

4. Гальперова, Е. В. Методология исследования долгосрочной динамики спроса на энергоносители для повышения обоснованности перспектив развития ТЭК: состав задач, методы и модели / Е. В. Гальперова // Изв. РАН. Энергетика. – 2021. – № 1. – С. 101–108. DOI: 10.31857/S0002331021010064.

5. Digitalization & Energy. International Energy Agency. – IEA Publications, 2017. – 188 p.

6. Кто оцифрует промышленность [Электронный ресурс] // Ведомости. – Режим доступа : https://www.vedomosti.ru/partner/articles/2021/04/28/868071-talanti-metallurgii. – Дата доступа : 22.02.2022.

7. О состоянии теплоэнергетики и централизованного теплоснабжения в Российской Федерации в 2020 году. Информ.-аналит. докл. [Электронный ресурс] // М-во энергетики Рос. Федерации. – Режим доступа : https://minenergo.gov.ru/node/22832. – Дата доступа : 22.05.2022.

8. Об утверждении методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации [Электронный ресурс] : распоряжение М-ва природных ресурсов и экологии Рос. Федерации, 16 апр. 2015 г., № 15-р // М-во природных ресурсов и экологии Рос. Федерации. – Режим доступа : https://www.mnr.gov.ru. – Дата доступа : 17.05.2022.

9. Правительство утвердило Стратегию социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года [Электронный ресурс] // М-во экон. развития Рос. Федерации. – Режим доступа : https://economy.gov.ru/material/news/pravitelstvo_utverdilo_strategiyu_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya_rossii_s_nizkim_urovnem_vybrosov_parnikovyh_gazov_do_2050_goda.html. – Дата доступа : 22.02.2022.

10. Технологии информационного моделирования позволят экономить до 20 % при строительстве зданий [Электронный ресурс] // М-во строительства и жилищно-коммунального хозяйства Рос. Федерации. – Режим доступа : https://minstroyrf.gov.ru/press/tekhnologii-informatsionnogo-modelirovaniya-pozvolyat-ekonomit-do-20-pri-stroitelstve-zdaniy. – Дата доступа : 22.02.2022.

11. The Future of Electricity New Technologies Transforming the Grid Edge [Electronic resource] // World Economic Forum. – Geneva, 2017. – 32 p. – Mode of access : https://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Electricity_2017.pdf. – Date of access : 22.02.2022.

12. Turning buildings into a source of energy: The grid interactive building [Electronic resource] // Siemens. – Mode of access : https://new.siemens.com/global/en/products/buildings/contact/whitepaper-grid-interactive-building.html. – Date of access : 22.02.2022.

13. У России появился план по снижению выбросов парниковых газов до 2050 года [Электронный ресурс] // Аналит. центр при Правительстве Рос. Федерации. – Режим доступа : https://ac.gov.ru/news/page/u-rossii-poavilsa-plan-po-snizeniu-vybrosov-parnikovyh-gazov-do-2050-goda-26549. – Дата доступа : 22.02.2022.

14. «Цифра» стала одним из ключевых инструментов повышения эффективности [Электронный ресурс] // РБК+. – Режим доступа : https://plus.rbc.ru/news/60b768727a8aa93d04316150. – Дата доступа : 22.02.2022.

15. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты: докл. к XXII Апр. междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества, Москва, 13–30 апр. 2021 г. / Г. И. Абдрахманова [и др.] ; рук. авт. кол. П. Б. Рудник ; науч. ред. Л. М. Гохберг [и др.]. – М. : Высш. шк. экономики, 2021. – 239, [1] с.

References

1. Berger, M. A. Big Data: analitika bol'shih dannyh v stroitel'noj otrasli / M. A. Berger, P. A. Met'yu, T. Uolter // Energosberezhenie. – 2019. – № 6. – S. 40–50.

2. Brodach, M. M. Dekarbonizaciya kak instrument stimulirovaniya energosberezheniya / M. M. Brodach, N. V. SHilkin // Energosberezhenie. – 2021. – № 7. – S. 4–11.

3. Vzaimodejstvie umnyh zdanij i intellektual'nyh setej – novye vozmozhnosti dlya dostizheniya celej po dekarbonizacii // Energosberezhenie. – 2021. – № 6. – S. 8–12.

4. Gal'perova, E. V. Metodologiya issledovaniya dolgosrochnoj dinamiki sprosa na energonositeli dlya povysheniya obosnovannosti perspektiv razvitiya TEK: sostav zadach, metody i modeli / E. V. Gal'perova // Izv. RAN. Energetika. – 2021. – № 1. – S. 101–108. DOI: 10.31857/S0002331021010064.

5. Digitalization & Energy. International Energy Agency. – IEA Publications, 2017. – 188 p.

6. Kto ocifruet promyshlennost' [Electronic resource] // Vedomosti. – Mode of access : https://www.vedomosti.ru/partner/articles/2021/04/28/868071-talanti-metallurgii. – Date of access : 22.02.2022.

7. O sostoyanii teploenergetiki i centralizovannogo teplosnabzheniya v Rossijskoj Federacii v 2020 godu. Inform.-analit. dokl. [Electronic resource] // M-vo energetiki Ros. Federacii. – Mode of access : https://minenergo.gov.ru/node/22832. – Date of access : 22.05.2022.

8. Ob utverzhdenii metodicheskih rekomendacij po provedeniyu dobrovol'noj inventarizacii ob"ema vybrosov parnikovyh gazov v sub"ektah Rossijskoj Federacii [Electronic resource] : rasporyazhenie M-va prirodnyh resursov i ekologii Ros. Federacii, 16 apr. 2015 g., № 15-r // M-vo prirodnyh resursov i ekologii Ros. Federacii. – Mode of access : https://www.mnr.gov.ru. – Date of access : 17.05.2022.

9. Pravitel'stvo utverdilo Strategiyu social'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossii s nizkim urovnem vybrosov parnikovyh gazov do 2050 goda [Electronic resource] // M-vo ekon. razvitiya Ros. Federacii. – Mode of access : https://economy.gov.ru/material/news/pravitelstvo_utverdilo_strategiyu_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya_rossii_s_nizkim_urovnem_vybrosov_parnikovyh_gazov_do_2050_goda.html. – Date of access : 22.02.2022.

10. Tekhnologii informacionnogo modelirovaniya pozvolyat ekonomit' do 20 % pri stroitel'stve zdanij [Electronic resource] // M-vo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Ros. Federacii. – Mode of access : https://minstroyrf.gov.ru/press/tekhnologii-informatsionnogo-modelirovaniya-pozvolyat-ekonomit-do-20-pri-stroitelstve-zdaniy. – Date of access : 22.02.2022.

11. The Future of Electricity New Technologies Transforming the Grid Edge [Electronic resource] // World Economic Forum. – Geneva, 2017. – 32 p. – Mode of access : https://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Electricity_2017.pdf. – Date of access : 22.02.2022.

12. Turning buildings into a source of energy: The grid interactive building [Electronic resource] // Siemens. – Mode of access : https://new.siemens.com/global/en/products/buildings/contact/whitepaper-grid-interactive-building.html. – Date of access : 22.02.2022.

13. U Rossii poyavilsya plan po snizheniyu vybrosov parnikovyh gazov do 2050 goda [Electronic resource] // Analit. centr pri Pravitel'stve Ros. Federacii. – Mode of access : https://ac.gov.ru/news/page/u-rossii-poavilsa-plan-po-snizeniu-vybrosov-parnikovyh-gazov-do-2050-goda-26549. – Date of access : 22.02.2022.

14. "Cifra" stala odnim iz klyuchevyh instrumentov povysheniya effektivnosti [Electronic resource] // RBK+. – Mode of access : https://plus.rbc.ru/news/60b768727a8aa93d04316150. – Date of access : 22.02.2022.

15. Cifrovaya transformaciya otraslej: startovye usloviya i prioritety: dokl. k XXII Apr. mezhdunar. nauch. konf. po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva, Moskva, 13–30 apr. 2021 g. / G. I. Abdrahmanova [et al.] ; ruk. avt. kol. P. B. Rudnik ; nauch. red. L. M. Gohberg [et al.]. – M. : Vys. shk. ekonomiki, 2021. – 239, [1] s.

УДК 004.89

Д. А. Гаськова[1], Л. В. Массель[2], А. Г. Массель[3]

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КИБЕРСИТУАЦИОННОЙ ОСВЕДОМЛЕННОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

[1,3]Кандидат технических наук, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Российская Федерация
[2]Доктор технических наук, профессор, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. В статье представлено применение интеллектуальных технологий для анализа киберситуационной осведомленности об энергетических объектах в рамках исследований устойчивости энергетических систем.

Ключевые слова: методы семантического моделирования, технологии экспертных систем, киберугрозы, вектор угрозы, экстремальные ситуации в энергетике, информированность.

D. A. Gaskova[1], L. V. Massel[2], A. G. Massel[3]

APPLICATION OF INTELLIGENT TECHNOLOGIES OF CYBER SITUATIONAL AWARENESS TO INCREASE THE RESILIENCE OF ENERGY SYSTEMS

[1,3]Ph. D. in Engineering Science, Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Irkutsk, Russian Federation
[2]Doctor of Engineering Science, Professor, Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Annotation. The article presents the application of intelligent technologies for the analysis of cyber situational awareness of energy facilities in the framework of research on the resilience of energy systems.

Keywords: semantic modeling methods, expert systems, cyber threats, threats vector, extreme situations in energy, awareness.

Введение. Исследования устойчивости авторами рассматриваются в контексте «Resilience», что на русский язык может переводиться как «упругая» устойчивость. В России исследования в этой области традиционно связаны с технической устойчивостью, однако в мировом сообществе эта концепция рассматривается шире и помимо технического включает также экологический, психологический, социальный и экономический аспекты [9]. В этой концепции пока не принято строгое определение термина «устойчивость», но наиболее часто для термина «Resilience» используют определение Davoudi: «Устойчивость (Resilience) – это способность системы возвращаться к равновесию или устойчивому состоянию после возмущения, такого, как наводнения, землетрясения или другие стихийные бедствия, а также техногенные катастрофы, такие, как банковские кризисы, войны или революции» [1].

С развитием и внедрением новых цифровых технологий во всех областях экономики в целом и энергетики, в частности, к таким возмущениям относят и кибератаки на критические инфраструктуры в рамках направления «Cyber Resilience», которое определено в [2] как «способность непрерывно обеспечивать достижение ожидаемых результатов, несмотря на неблагоприятные кибер события». В настоящее время атаки на энергетический сектор вышли за рамки случайных и преимущественно имеют целевой характер [5]. Мотивацией к проведению целевых атак является получение финансовых и политических выгод.

Представленное исследование направлено на решение задач в области повышения осведомленности о критической информационной инфраструктуре энергетических объектов в рамках исследований киберситуационной осведомленности. Киберситуационная осведомленность (Cyber Situational Awareness) в работе рассматривается как интеграция исследований кибербезопасности и ситуационной осведомленности. Эта область исследования характеризуется применением методов и технологий искусственного интеллекта и направлена на повышение осведомленности о возможных нарушениях кибербезопасности и автоматическое обнаружение киберугроз [4].

Устойчивость энергетических систем. Исследования устойчивости энергетических систем тесно связаны с исследованиями энергетической безопасности, основным требованием которой является обеспечение потребителей энергоресурсами требуемого качества и в нужном объеме [12]. Одним из направлений таких исследований является исследование экстремальных ситуаций в энергетике, включающих критические и чрезвычайные ситуации, направленное на установление причин их возникновения, угроз энергетической безопасности, последствий, мер противодействия и взаимосвязей между ними.

Рассматриваемая в работе область исследований ограничивается информационной инфраструктурой энергетического объекта, и в этом случае последствия для энергетической системы не имеют специфических характеристик. Исследуется область причин, связанных с нарушением кибербезопасности, т. е. с реализацией киберугроз, включая киберхалатность, а также рисков, связанных с возникновением экстремальных ситуаций в энергетике из-за реали-

зации киберугроз, рассматриваемых как стратегические угрозы энергетической безопасности [8].

Цели сохранения устойчивости энергосистемы соответствуют целям управления рисками, как и создание устойчивой системы, способной противостоять последствиям угроз, переносить их, приспосабливаться к ним и восстанавливаться своевременно и эффективно, в том числе посредством сохранения и восстановления своих основополагающих структур и функций.

Ранее для анализа угроз энергетической безопасности было предложено использовать семантическое моделирование [11], в том числе байесовские сети доверия [10]. Аппарат байесовских сетей предлагалось применять как инструмент реализации сценарного подхода, рассчитанного на стратегическое планирование и позволяющего строить сценарии экстремальных ситуаций с использованием байесовских вероятностей при введении числовых значений на основе знаний и опыта эксперта или частотных вероятностей при наличии статистических данных, которые зачастую отсутствуют в свободном доступе. Применение такой семантической модели, как байесовская сеть доверия, позволяет определить вероятностную составляющую риска (исходя из классического понимания риска как произведения вероятности угрозы на ущерб от ее реализации).

Концепции исследований энергетической безопасности, киберситуационной осведомленности и устойчивости используют трехуровневую модель для поддержки принятия решений, включающую стратегический, тактический и оперативный уровни [3], [8], а приведенные в работе исследования киберситуационной осведомленности в энергетике касаются устойчивости критических информационных инфраструктур энергетических объектов к реализации киберугроз и обмен информацией о кибербезопасности (тактический уровень).

Интеллектуальные технологии киберситуационной осведомленности об энергетическом объекте для повышения устойчивости энергетических систем. Предложен подход к анализу киберситуационной осведомленности об энергетическом объекте как синтез исследований кибербезопасности и ситуационной осведомленности с применением методов инженерии знаний, методов семантического моделирования (онтологии и байесовские сети доверия), технологии экспертных систем.

С применением методов инженерии знаний (онтологический инжиниринг, фрактальный подход [6]) были выявлены основные понятия проблемной области: 1) множество всех обнаруженных критических уязвимостей рассматриваемой локальной вычислительной сети (ЛВС) (V); 2) множество киберугроз активов ЛВС (T); множество техногенных угроз энергетической безопасности, вызванных киберугрозами (W); множество последствий реализации угроз T и W.

Множество понятий и отношений между ними показаны в информационной модели, представленной на рис. 1. Отношения между основными понятиями описываются продукционными правилами трех типов: 1) установление взаимосвязи между активом и его уязвимостями; 2) установление взаимосвязи между уязвимостями актива и киберугрозами, которые могут использовать эти

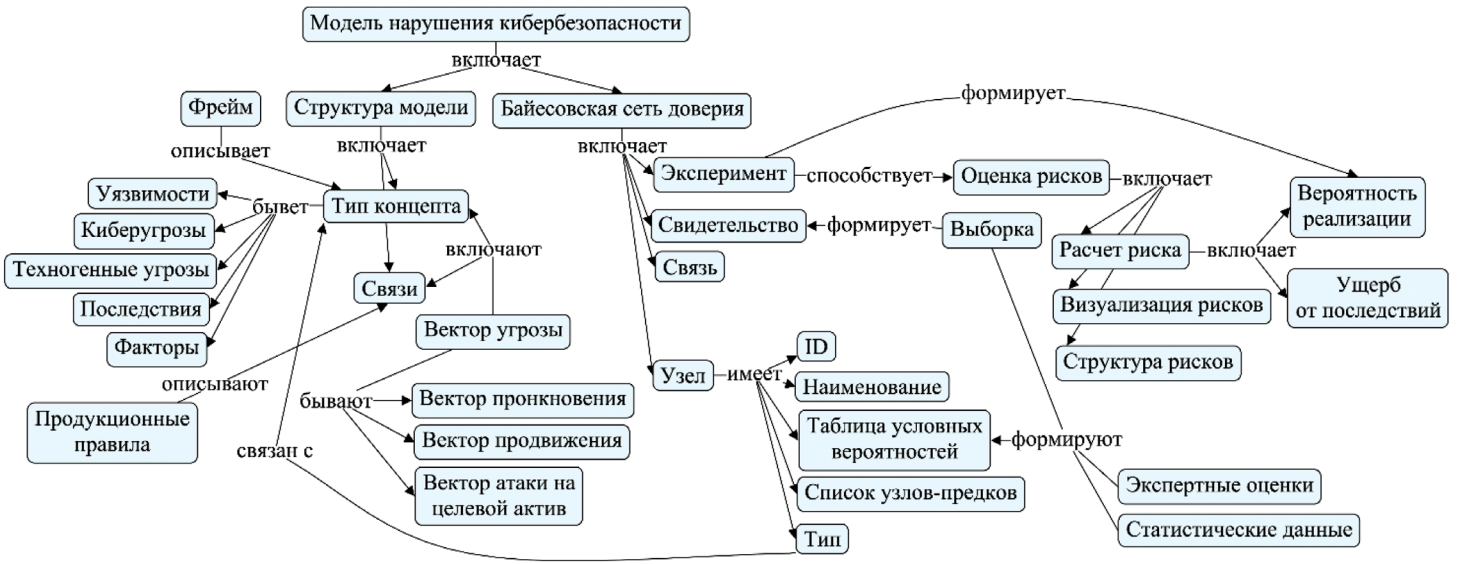


Рис. 1. Онтология модели нарушения кибербезопасности

уязвимости; 3) установление взаимосвязи между угрозами в том числе между киберугрозой и киберугрозой, между киберугрозой и техногенными угрозами энергетической безопасности.

Формируемые правила отражают описание этапов вектора угрозы (с возможностью реализации подсистемы объяснений) и реализованы в продукционно-фреймовой экспертной системе.

Модель векторов угроз представляет собой вероятностный сценарий экстремальной ситуации, представленный графовой моделью байесовской сети доверия. В таблице показаны состояния узлов (X_i), соответствующих уязвимостям, киберугрозам, угрозам энергетической безопасности (техногенная) и последствиям и их вероятности $\wp$ в зависимости от набора узлов-предков ($pa(X_i)$).

Узлы, соответствующие уязвимостям, киберугрозам и угрозам энергетической безопасности (техногенная)

Тип узла X_i	Обозначение узла	Состояния узла	Узлы-предки $pa(X_i)$	Вероятность
Уязвимость (V)	X^V	v_1: используется v_2: не используется	X^V, X^T	$\wp(X^V) = \mathrm{P}(X^V \mid pa(X^V))$
Киберугроза (T)	X^T	t_1: используется t_2: не используется	X^V, X^T	$\wp(X^T) = \mathrm{P}(X^T \mid pa(X^T))$
Техногенная угроза энергетической безопасности (W)	X^W	$\{w_{11},...,w_n\}$, где w_{1i} – процент отключения генерирующих мощностей	X^V, X^T, X^W	$\wp(X^W) = \mathrm{P}(X^W \mid pa(X^W))$
Последствие (C)	X^C	$\{c_{11},...,c_m\}$, где c_{11} – группа событий, которая характеризует ущерб	X^W	$\wp(X^C) = \mathrm{P}(X^C \mid pa(X^C))$

Целью такого моделирования является ответ на вопрос «Как изменится вероятность последствий, если принять, что некоторое множество уязвимостей и/или угроз реализовано?». С помощью байесовской сети доверия определяется вероятностная составляющая рисков киберугроз, представленная апостериорной вероятностью последствий сценария. В работе риск рассматривается как произведение вероятности последствия на ущерб. Для последствий формируется структура ущербов экстремальной ситуации. Ущерб может быть выражен изначально в натуральном виде, а затем оценен в денежном эквиваленте.

Риски описываются и рассчитываются по формуле:

$$R_i = \mathrm{P}(X^C \mid E = e) D_i, \tag{1}$$

где R_i – риск последствия c_j; e – набор значений набора свидетельств E; $\mathrm{P}(X^C \mid E = e)$ – апостериорная вероятность последствия c_j; D_i – ущерб от рассматриваемого последствия c_j. Причем $D_i = \{d_{i1},...,d_{in}\}$, где $\{d_{i1},...,d_{in}\}$ – элементы, описывающие структуру ущерба c_j последствия.

ЭТАПЫ	Анализ обстановки и ситуации	Моделирование состояний и событий в киберсреде	Оценка рисков в киберсреде
МЕТОДЫ И МОДЕЛИ	Онтологии	Вероятностная модель	Визуализация
ТЕХНОЛОГИИ	Продукционно-фреймовая экспертная система	Байесовская сеть доверия	Визуальная аналитика
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА	Cyber Attack Vector	ThreatNet	RiskMap

Рис. 2. Этапы технологии анализа киберситуационной осведомленности и используемые для ее поддержки методы, модели, базовые ИТ и компоненты ИПК ОКО

Например, структура ущерба для последствия «потеря мощности» может иметь следующий вид:

$$d_i = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\}, \quad (1)$$

где d_1 – упущенная выгода; d_2 – убытки, вызванные уплатой различных неустоек, штрафов, пени и другое; d_3 – убытки, связанные с недоотпуском продукции; d_4 – убытки, связанные с простоем производства; d_5 – расходы на расследование аварии.

Результаты исследования и их обсуждение. Разработана архитектура и выполнена реализация интеллектуального программного комплекса (ИПК ОКО) для анализа киберситуационной осведомленности, реализующего предложенный подход, отличающегося интеграцией экспертной системы, компонента байесовских сетей доверия и компонента визуальной оценки рисков [7] (компоненты ИПК ОКО представлены в нижней строке таблицы) (рис. 2). В верхней строке таблицы приведены основные этапы технологии анализа киберситуационной осведомленности; вторая и третья строки таблицы описывают используемые на разных этапах модели и базовые информационные технологии (ИТ).

Приведенное исследование направлено на повышение осведомленности заинтересованных сторон о возможных инцидентах безопасности, а результаты исследования могут быть использованы при построении модели угроз на энергетическом объекте и проведении бизнес-игр.

Заключение. Для повышения информированности о возможных нелегитимных действиях в киберсреде энергетического объекта предложен подход к анализу киберситуационной осведомленности об энергетическом объекте с применением методов инженерии знаний, методов семантического моделирования (онтологии и байесовские сети доверия), технологии экспертных систем. Для поддержки методического подхода разработан интеллектуальный программный комплекс, целью разработки которого является построение векторов угроз (векторы проникновения, векторы продвижения атаки, векторы атаки на целе-

вую систему), поддерживающий работу трех групп пользователей: специалистов в сфере информационной безопасности, эксперта-энергетика и аналитика.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-21-00841).

Список использованных источников

1. Davoudi, S. Resilience: A Bridging Concept or a Dead End / S. Davoudi // Planning Theory and Practice. – 2012. – Vol. 13 (2). – P. 299–307.

2. Cyber Resilience – Fundamentals for a Definition / F. Bjorck [et al.] ; New Contributions in Information Systems and Technologies. – Springer, 2015. – P. 311–316.

3. Cyber Situational Awareness and Information Sharing in Critical Infrastructure Organizations / J. Poyhonen [et al.] // Information & Security: An International Journal. – 2019. – Vol. 43, № 2. – P. 236–256.

4. Frank, U. Cyber Situational Awareness – A systematic review of literature / U. Frank // Computer Security / U. Frank, J. Brynielsson. – 2014. – Vol. 46. – P. 18–31.

5. APT-атаки на топливно-энергетический комплекс России: обзор тактик и техник. Аналитические статьи Positive Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/apt-attacks-energy-2019. – Дата доступа : 15.05.2022.

6. Гаськова, Д. А. Онтологический инжиниринг анализа угроз кибербезопасности критических инфраструктур / Д. А. Гаськова, А. Г. Массель // Онтология проектирования. – 2019. – Т. 9, № 2 (32). – С. 225–238.

7. Гаськова, Д. А. Технология анализа киберугроз и оценка рисков нарушения кибербезопасности критической инфраструктуры / Д. А. Гаськова, А. Г. Массель // Вопросы кибербезопасности. – 2019. – № 2 (30). – С. 42–49.

8. Массель, Л. В. Киберопасность как одна из стратегических угроз энергетической безопасности России / Л. В. Массель [и др.] // Вопросы кибербезопасности. – 2016. – № 4 (17). – С. 2–10.

9. Массель, Л. В. Оценка рисков природных и техногенных угроз устойчивости энергетических, экологических и социальных систем на основе интеллектуальных информационных технологий / Л. В. Массель, Н. П. Комендантова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – № 4 (16). – С. 31–45.

10. Массель, Л. В. Применение байесовских сетей доверия для интеллектуальной поддержки исследований проблем энергетической безопасности / Л. В. Массель, Е. В. Пяткова // Вестн. ИрГТУ. – 2012. – № 2 (61). – С. 8–13.

11. Массель, Л. В. Технологии и инструментальные средства интеллектуальной поддержки принятия решений в экстремальных ситуациях в энергетике / Л. В. Массель, А. Г. Массель // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18 (спец. вып.). – С. 37–44.

12. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / Н. И. Пяткова [и др.] ; отв. ред. Н. И. Воропай. – Новосибирск : СО РАН, 2011. – 211 с.

References

1. Davoudi, S. Resilience: A Bridging Concept or a Dead End / S. Davoudi // Planning Theory and Practice. – 2012. – Vol. 13 (2). – P. 299–307.

2. Cyber Resilience – Fundamentals for a Definition / F. Bjorck [et al.] ; New Contributions in Information Systems and Technologies. – Springer, 2015. – P. 311–316.

3. Cyber Situational Awareness and Information Sharing in Critical Infrastructure Organizations / J. Poyhonen [et al.] // Information & Security: An International Journal. – 2019. – Vol. 43, № 2. – P. 236–256.

4. Frank, U. Cyber Situational Awareness – A systematic review of literature / U. Frank // Computer Security / U. Frank, J. Brynielsson. – 2014. – Vol. 46. – P. 18–31.

5. APT-ataki na toplivno-energeticheskij kompleks Rossii: obzor taktik i tekhnik. Analiticheskie stat'i Positive Technologies [Electronic resource]. – Mode of access : https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/apt-attacks-energy-2019. – Date of access : 15.05.2022.

6. Gas'kova, D. A. Ontologicheskij inzhiniring analiza ugroz kiberbezopasnosti kriticheskih infrastruktur / D. A. Gas'kova, A. G. Massel' // Ontologiya proektirovaniya. – 2019. – T. 9, № 2 (32). – S. 225–238.

7. Gas'kova, D. A. Tekhnologiya analiza kiberugroz i ocenka riskov narusheniya kiberbezopasnosti kriticheskoj infrastruktury / D. A. Gas'kova, A. G. Massel' // Voprosy kiberbezopasnosti. – 2019. – № 2 (30). – C. 42–49.

8. Massel', L. V. Kiberopasnost' kak odna iz strategicheskih ugroz energeticheskoj bezopasnosti Rossii / L. V. Massel' [et al.] // Voprosy kiberbezopasnosti. – 2016. – № 4 (17). – S. 2–10.

9. Massel', L. V. Ocenka riskov prirodnyh i tekhnogennyh ugroz ustojchivosti energeticheskih, ekologicheskih i social'nyh sistem na osnove intellektual'nyh informacionnyh tekhnologij / L. V. Massel', N. P. Komendantova // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. – 2019. – № 4 (16). – S. 31–45.

10. Massel', L. V. Primenenie bajesovskih setej doveriya dlya intellektual'noj podderzhki issledovanij problem energeticheskoj bezopasnosti / L. V. Massel', E. V. Pyatkova // Vestn. IrGTU. – 2012. – № 2 (61). – S. 8–13.

11. Massel', L. V. Tekhnologii i instrumental'nye sredstva intellektual'noj podderzhki prinyatiya reshenij v ekstremal'nyh situaciyah v energetike / L. V. Massel', A. G. Massel' // Vychislitel'nye tekhnologii. – 2013. – T. 18 (spec. iss.). – S. 37–44.

12. Energeticheskaya bezopasnost' Rossii: problemy i puti resheniya / N. I. Pyatkova [et al.] ; otv. red. N. I. Voropaj. – Novosibirsk: SO RAN, 2011. – 211 s.

УДК 004.822: (620.9+504.75+303.732.4)

Д. В. Пестерев

ИНТЕГРАЦИЯ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО И КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И СОЦИО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН,
Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается подход к исследованию устойчивости энергетических и социо-экологических систем, основанный на интеграции технологий семантического моделирования. Современные тенденции развития энергетики, например, уменьшения углеродного следа, предполагают, что исследования только систем энергетики уже теряют актуальность, поэтому требуется их совместное рассмотрение с экологическими и социальными системами. Такие системы по природе являются слабоформализованными, поэтому традиционные методы исследования энергетических систем, такие как математическое моделирование, использовать затруднительно, поэтому предлагается применение технологий семантического моделирования. В качестве семантических моделей рассматриваются онтологии и когнитивные модели. Предполагается применение онтологий для формализации и структурирования исследуемых областей, а когнитивных моделей – для описания ситуаций с использованием основных понятий предметной области (концептов), которые могут быть взяты из построенных ранее онтологий. Описание ситуаций в виде когнитивных моделей (в графическом виде – когнитивных карт) позволит определить причинно-следственные отношения между основны-

ми понятиями предметной области и описать их взаимовлияние. В дальнейшем предполагается количественная оценка взаимовлияния, основанная на адаптации индикаторов энергетической безопасности.

Ключевые слова: когнитивное моделирование, онтологии, устойчивость, энергетические системы.

D. V. Pesterev

INTEGRATION OF ONTOLOGICAL AND COGNITIVE MODELING IN STUDIES OF SUSTAINABILITY OF ENERGY AND SOCIO-ECOLOGICAL SYSTEMS

Institute of Energy Systems named after L. A. Melentiev SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Annotation. The article considers an approach to the study of the sustainability of energy and socio-ecological systems, based on the integration of semantic modeling technologies. Modern trends in energy development, such as reducing the carbon footprint, suggest that studies of only energy systems are no longer relevant, therefore, their joint consideration with environmental and social systems is required. Such systems are weakly formalized by nature, so it is difficult to use traditional methods for studying energy systems, such as mathematical modeling, so the use of semantic modeling technologies is proposed. Ontologies and cognitive models are considered as semantic models. Ontologies are supposed to be used to formalize and structure the areas under study, and cognitive models are used to describe situations, using the basic concepts of the subject area (concepts), which can be taken from previously built ontologies. Description of situations in the form of cognitive models (in graphical form – cognitive maps) will allow you to determine the cause-and-effect relationships between the basic concepts of the subject area and describe their mutual influence. In the future, it is supposed to quantify the mutual influence based on the adaptation of energy security indicators.

Keywords: cognitive modeling, ontologies, sustainability, energy systems.

Введение. В настоящее время в мировом научном сообществе происходит активное развитие направления, связанного с исследованиями устойчивости. Объектом исследований являются как технические системы, так и социальные, экологические и др. Такие системы в отличие от технических являются слабоформализованными. При исследовании таких слабоформализованных систем выделяют устойчивость, которая на английском языке называется «Resilience». На русский это можно перевести как «упругость» или же «упругая» устойчивость.

Развитие современной энергетики, особенно за рубежом, идет по пути так называемой «зеленой» энергетики, которая подразумевает тенденции к уменьшению углеродного следа отрасли, внедрение возобновляемых источников энергии и т. п. Поэтому актуальность приобретает совместное рассмотрение как энергетических, так и социо-экологических факторов [1]. Для исследования совместного развития энергетических и социо-экологических систем предлагается использовать семантические технологии, а именно онтологию и когнитивное моделирование.

Описание предметной области, выделение необходимых концептов предполагается осуществлять с использованием онтологического моделирования.

При этом возможны использование ранее разработанных онтологий и их адаптация к исследуемой предметной области, либо разработка новых онтологий, либо же интеграция существующих с новыми онтологиями. Таким образом, формируется совместное онтологическое пространство исследуемых областей.

Материалы и методы исследования. Для описания ситуаций предлагается адаптировать к исследованиям устойчивости существующую методику когнитивного моделирования, предложенную в коллективе, представляемом авторами [2]. Построение когнитивных моделей предлагается осуществлять с использованием концептов онтологического пространства. При этом выявляются и определяются причинно-следственные связи между ними.

Устойчивость в смысле «Resilience». В общем смысле термин «Resilience» происходит от латинского «resilio», что буквально можно перевести как «отскок», что вполне описывает суть «упругой устойчивости». При этом не существует конкретного и общепринятого определения устойчивости ввиду широкого применения этой концепции в различных областях с различными целями применения. Приведем несколько подходов к определению устойчивости в смысле «Resilience».

Устойчивость часто определяется как способность системы возвращаться к равновесию или скорее способность вернуться к равновесию и развиваться, несмотря на дальнейшие толчки и нарушения.

Устойчивость может быть способностью достижения некоторых новых стадий динамического равновесия после шока, готовности к динамическим, межмасштабным взаимодействиям парной системы «человек – окружающая среда».

Устойчивость может быть способностью человека успешно справляться с травматическим опытом и избегать отрицательных траекторий развития.

Одно из популярных определений «Resilience» дал в своей работе Davoudi [3], далее будем принимать во внимание именно это определение: «Устойчивость – это способность системы возвращаться к равновесию или устойчивому состоянию после возмущения, такого, как наводнения, землетрясения или другие стихийные бедствия, а также техногенные катастрофы, такие как банковские кризисы, войны или революции».

Исходя из этого определения устойчивость – способность системы возвращаться к равновесному состоянию после временного нарушения. Соответственно, чем быстрее система возвращается к равновесному состоянию и чем меньше в ней потерь, тем более устойчивой она является.

Некоторые авторы пытаются выделить свойства, присущие устойчивости, например, так называемые 4^{Rs} устойчивости [4]:

Robustness (надежность): сила или способность элементов, системы и др. мер анализа для определения возможности выдерживать данный уровень стресса или нужды, без страдания от деградации или потери функции;

Redundancy (резервирование): возможность удовлетворения функциональных требований в случае разрушения, деградации или потери функциональности;

Rapidity (быстрота): способность своевременно выполнять (удовлетворять) приоритеты и достигать цели, чтобы сдерживать потери, восстановить функциональность и избежать сбоев в будущем;

Resourcefulness (изобретательность): способность идентифицировать проблемы, установить приоритеты и мобилизовать альтернативы внешних ресурсов, когда существуют условия, которые угрожают нарушить какой-то элемент или систему.

В этом исследовании не будем принимать во внимание временну́ю характеристику устойчивости, уделяя основное внимание способности совместной системы вернуться в устойчивое состояние либо же после проведения некоторых мероприятий перейти в новое, но также устойчивое состояние.

Онтологическое моделирование. Исследования устойчивости предполагают проведение качественного анализа предметной области с привлечением семантического моделирования. На первом этапе предполагается использование онтологического моделирования для формализации знаний предметной области. Онтологии позволят выявлять, структурировать и описать основные понятия предметной области (концепты). В общем виде онтологии представляют собой семантические сети, узлы которой описывают основные понятия предметной области, а дуги между ними – отношения между этими понятиями. Термин «онтология» предложил Грубер в своей работе [5]. В нашей стране одним из ведущих специалистов по онтологическому инжинирингу является Т. А. Гаврилова [6]. По классификации, предложенной в [7], существуют так называемые весомые онтологии (Heavy-weighted), содержащие аксиомы A (O = {C, R, A}) и легкие (Light-weighted), их не содержащие (O = {C, R}). Здесь O – онтология, C – совокупность концептов предметной области, R – совокупность отношений между ними, A – набор аксиом (законов и правил, которые описывают, как законы и принципы существования концептов). Авторами в работе используются «легкие», или эвристические, онтологии, которые содержат только набор концептов и отношения между ними, и используются для структурирования и формализации предметной области. В коллективе авторов ранее велась работа по онтологическому моделированию взаимовлияния энергетики и геоэкологии [8, 9]. В рамках проводимого исследования разработана онтология, описывающая генерацию электроэнергии объектами энергетики, фрагмент онтологии приведен на рис. 1.

Эта онтология может быть детализирована добавлением концептов, относящихся как к энергетическим системам, так и к социо-экологическим (детализация антропогенных факторов).

Для оценки устойчивости энергетических и социо-экологических систем авторами предложена онтология интегрального индикатора устойчивого развития на основе показателей, характеризующих социо-экологическую среду (рис. 2). По мнению авторов, на устойчивое развитие влияют такие показатели, как благосостояние, экономические отношения, здоровье, условия труда,

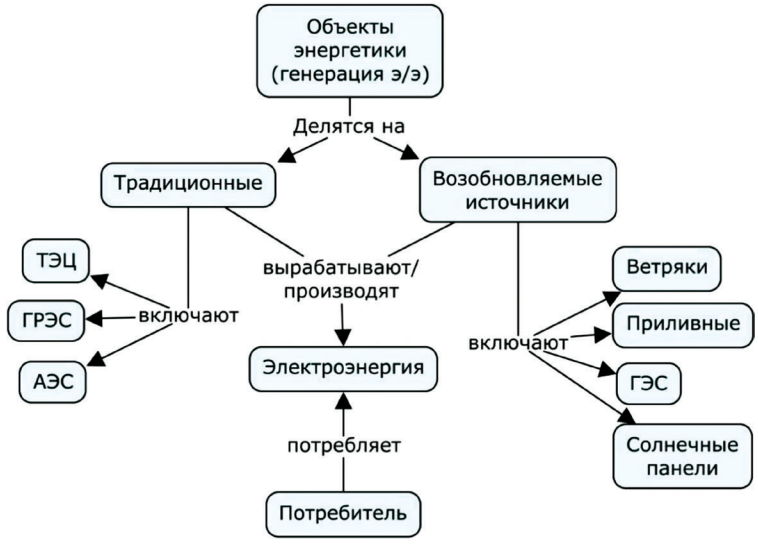


Рис. 1. Фрагмент онтологии, описывающей генерацию электроэнергии объектами энергетики

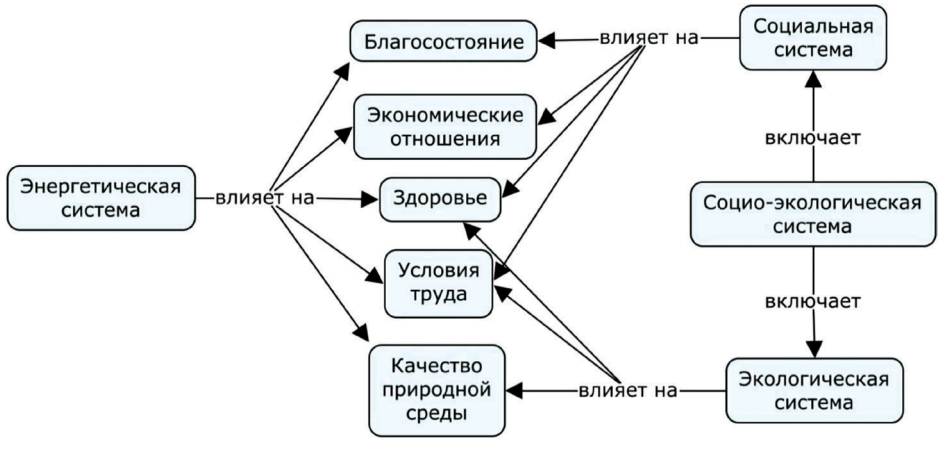


Рис. 2. Онтология показателей, входящих в интегральный индикатор устойчивого развития

качество природной среды. Этот список показателей также может быть детализирован либо дополнен новыми показателями.

Эти показатели предполагается использовать в когнитивных моделях для выявления влияния концептов энергетических систем на устойчивое развитие совместно энергетических и социо-экологических систем.

Когнитивное моделирование. Когнитивное моделирование используется для выявления и визуализации причинно-следственных отношений между концептами предметной области. Когнитивная модель описывается направленным графом, где узлы – концепты предметной области, а дуги – причинно-

следственные отношения между концептами. Другими словами, можно сказать, что дуги описывают влияние одного концепта на другой. При этом в простейшем случае влияние может характеризоваться знаками «+» и «–», то есть положительное и отрицательное влияние соответственно. При положительном влиянии изменение каких-либо характеристик одного концепта, допустим, в сторону увеличения, также влечет увеличение характеристик зависимого концепта. При отрицательном влиянии увеличение каких-либо характеристик одного концепта влечет уменьшение характеристик зависимого концепта. Графическое представление когнитивной модели называется когнитивной картой.

Термин «когнитивные модели» предложил в 1948 г. Tolman в работе [10]. Он исследовал движение лабораторных мышей по импровизированному лабиринту и предположил, что для поиска выхода из него мыши в своей голове строят так называемую когнитивную карту, в соответствии с которой они запоминают уже пройденные места и предполагают, какое место будет следовать за ним (поворот, тупик и т. п.). В дальнейшем когнитивные карты для описания слабоструктурированых систем предложил использовать Axelrod [11].

Для построения когнитивных карт в исследованиях устойчивости предлагается адаптировать существующую методику построения когнитивных карт для исследований энергетической безопасности, предложенную в [2]. Адаптированная методика содержит следующие этапы.

1. Выявление основных факторов – концептов, влияющих на развитие и/или функционирование исследуемой системы.

2. Установление причинно-следственных связей между факторами, расстановка весов этих связей и построение когнитивной модели исследуемой системы. В простейшем случае веса могут иметь значения «+1» или «–1».

3. Выявление факторов, негативно влияющих на развитие и/или функционирование системы/систем.

4. Определение факторов, нейтрализующих возмущения в системе и положительно влияющих на развитие и/или функционирование системы.

5. Изменение весов (или знаков) причинно-следственных связей, в зависимости от влияния угроз и мероприятий на факторы развития и/или функционирования системы.

На рис. 3 приведен пример когнитивной карты ситуации, характерной для современного состояния электроэнергетики Европы. Из-за снижения среднесуточной температуры повышается потребление электроэнергии. Так как электроэнергетика Европы ориентирована на использование зеленой энергетики, то приходится увеличивать либо экспорт электроэнергии из других стран, либо наращивать выработку традиционными объектами электроэнергетики, которых в Европе практически не осталось. При этом учитывается влияние выработки традиционными объектами энергетики на здоровье населения.

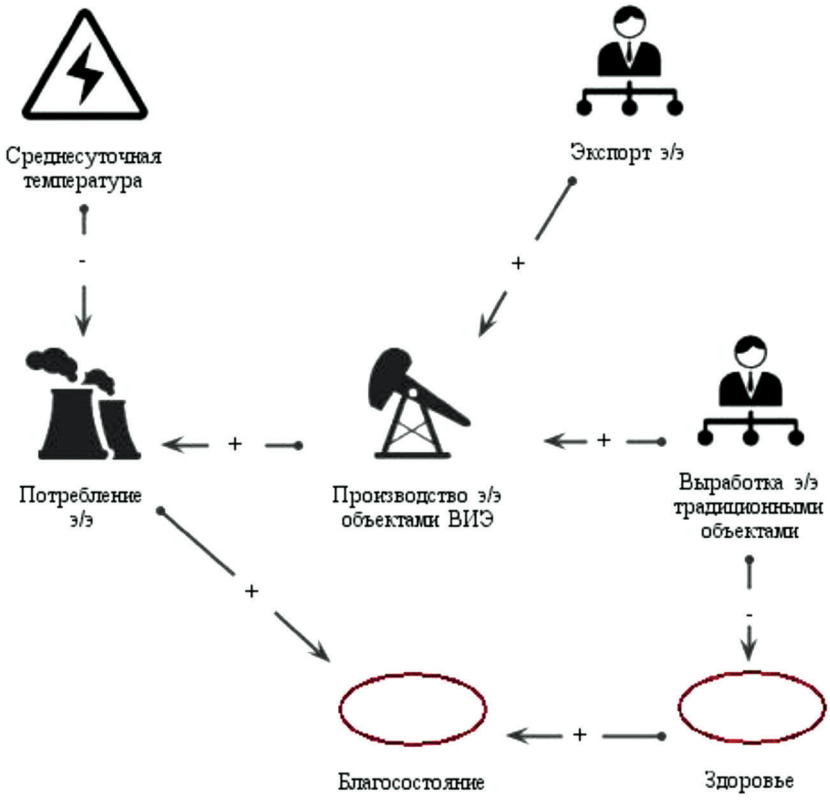


Рис. 3. Когнитивная карта реализации угрозы похолодания при ориентировании энергетики на возобновляемые источники энергии

Заключение. Предлагаемый подход к исследованиям устойчивости энергетических и социо-экологических систем основывается на использовании семантических моделей, а именно онтологий и когнитивных карт. Приведен пример применения онтологий для формализации исследуемых областей, а также для разработки индикаторов устойчивости энергетических и социо-экологических систем. Показано применение когнитивного моделирования для описания ситуаций. В дальнейшем предполагается разработка шкал для индикаторов и разработка системы индикаторов для оценки устойчивости исследуемых систем. Расширение набора индикаторов также возможно выполнить с использованием онтологического моделирования.

Список использованных источников

1. Массель, Л. В. Подход к исследованиям устойчивости энергетических и экологических систем на основе интеллектуальных информационных технологий / Л. В. Массель, А. Г. Массель, Н. П. Комендантова / Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь : состояние и перспективы : Междунар. науч. конф., Минск, 1– 2 окт. 2020 г. : сб. докл. / ред. Т. Г. Зорина. – Минск : Беларус. навука, 2020. – С. 33–43.

2. Массель, А. Г. Когнитивное моделирование угроз энергетической безопасности / А. Г. Массель // Горный информ.-аналит. бюл. – 2009. – № 17. – С. 194–199.

3. Davoudi, S. Resilience: A Bridging Concept or a Dead End? / S. Davoudi // Planning Theory & Practice. – 2012. – Vol. 13. – P. 299–307.

4. Cimellaro, G. P. Framework for analytical quantification of disaster resilience / G. P. Cimellaro, A. M. Reinhorn, M. Bruneau // Engineering Structures. – 2010. – Vol. 32, iss. 11. – P. 3639–3649.

5. Gruber, T. Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing / T. Gruber // International Journal of Human–Computer Studies. – 1995. – Vol. 43. iss. 5–6. – P. 907–928.

6. Гаврилова, Т. А. Инженерия знаний. Модели и методы : учеб. / Т. А. Гаврилова, Д. В. Кудрявцев, Д. И. Муромцев. – СПб. : Лань, 2016. – 324 с.

7. Mizogushi, R. Using Ontological Engineering to Overcome Common AI-ED Problems / R. Mizogushi, J. Bourdeau // International Journal of Artificial Intelligence in Education. – 2000. – Vol. 11. – P. 1–12.

8. Онтологические аспекты исследования взаимовлияния энергетики и геоэкологии / Л. В. Массель [и др.] // Онтология проектирования. – 2018. – Т. 8, № 4 (30). – С. 550–561.

9. Ворожцова, Т. Н. Система онтологий для исследования антропогенного влияния объектов энергетики на окружающую среду / Т. Н. Ворожцова, Е. П. Майсюк, Ю. И. Иванова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2020. – № 1 (17). – С. 89–104.

10. Tolman, E. C. Cognitive maps in rats and men / E. C. Tolman // Psychological Rev. – 1948. – № 55 (4). – С. 189–208.

11. Axelrod, R. Structure of decision: The Cognitive Maps of Political Elites / R. Axelrod. – Princeton: Princeton Univ. Press, 1976. – 404 p.

References

1. Massel', L. V. Podhod k issledovaniyam ustojchivosti energeticheskih i ekologicheskih sistem na osnove intellektual'nyh informacionnyh tekhnologij / L. V. Massel', A. G. Massel', N. P. Komendantova / Ustojchivoe razvitie energetiki Respubliki Belarus' : sostoyanie i perspektivy : Mezhdunar. nauch. konf., Minsk, 1–2 okt. 2020 g. : sb. dokl. / red. T. G. Zorina. – Minsk : Belarus. navuka, 2020. – S. 33–43.

2. Massel', A. G. Kognitivnoe modelirovanie ugroz energeticheskoj bezopasnosti / A. G. Massel' // Gornyj inform.-analit. byul. – 2009. – № 17. – S. 194–199.

3. Davoudi, S. Resilience: A Bridging Concept or a Dead End? / S. Davoudi // Planning Theory & Practice. – 2012. – Vol. 13. – P. 299–307.

4. Cimellaro, G. P. Framework for analytical quantification of disaster resilience / G. P. Cimellaro, A. M. Reinhorn, M. Bruneau // Engineering Structures. – 2010. – Vol. 32, iss. 11. – P. 3639–3649.

5. Gruber, T. Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing / T. Gruber // International Journal of Human–Computer Studies. – 1995. – Vol. 43. iss. 5–6. – P. 907–928.

6. Gavrilova, T. A. Inzheneriya znanij. Modeli i metody : ucheb. / T. A. Gavrilova, D. V. Kudryavcev, D. I. Muromcev. – SPb. : Lan', 2016. – 324 s.

7. Mizogushi, R. Using Ontological Engineering to Overcome Common AI-ED Problems / R. Mizogushi, J. Bourdeau // International Journal of Artificial Intelligence in Education. – 2000. – Vol. 11. – P. 1–12.

8. Ontologicheskie aspekty issledovaniya vzaimovliyaniya energetiki i geoekologii / L. V. Massel' [et al.] // Ontologiya proektirovaniya. – 2018. – T. 8, № 4 (30). – S. 550–561.

9. Vorozhcova, T. N. Sistema ontologij dlya issledovaniya antropogennogo vliyaniya ob'ektov energetiki na okruzhayushchuyu sredu / T. N. Vorozhcova, E. P. Majsyuk, Yu. I. Ivanova // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. – 2020. – № 1 (17). – S. 89–104.

10. Tolman, E. C. Cognitive maps in rats and men / E. C. Tolman // Psychological Review. – 1948. – № 55 (4). – S. 189–208.

11. Axelrod, R. Structure of decision: The Cognitive Maps of Political Elites / R. Axelrod. – Princeton: Princeton Univ. Press, 1976. – 404 r.

УДК 621.311

Ю. Н. Зацаринная[1], Г. Р. Валеева[2]

ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВИЗАЦИИ В СФЕРЕ ЭНЕРГЕТИКИ

[1]Кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный энергетический университет, Институт электроэнергетики и электротехники, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация
[2]Казанский государственный энергетический университет, Институт электроэнергетики и электротехники, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Аннотация. Современный мир требует внедрения цифровых технологий во все сферы экономики. В настоящей статье рассмотрены технологии цифровизации, применяемые в секторе энергетики, описаны эффекты цифровизации, ключевые возможности и сферы влияния.

Ключевые слова: цифровизация, энергетика, интернет вещей, искусственный интеллект и большие данные, блокчейн, глобализация.

Y. N. Zatsarinnaya[1], G. R. Valeeva[2]

DIGITALIZATION TECHNOLOGIES IN THE ENERGY SECTOR

[1]Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Kazan State Power Engineering University, Institute of Electric Power and Electrical Engineering, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation
[2]Kazan State Power Engineering University, Institute of Electricity and Electrical Engineering, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Annotation. The modern world requires the introduction of digital technologies in all spheres of the economy. This article examines the digitalization technologies used in the energy sector, describes the effects of digitalization, key opportunities and spheres of influence.

Keywords: digitalization, energy, Internet of things, artificial intelligence and big data, blockchain, globalization.

Введение. При глобализации экономики, росте числа технологий, возрастании потребности в оптимизации потребления ресурсов цифровизация становится одной из наиболее приоритетных тенденций для развития возобновляемой энергетики.

Сегодня цифровизация практически становится синонимом конкурентоспособности и открывает доступ к рынкам будущего, поскольку позволяет обеспечить оперативность работы систем, быстрое реагирование на любые изменения, автоматизировать процессы и т. д.

Материалы и методы исследования. Цифровизация дает возможность управлять наиболее сложными энергосистемами или их частями, способствуя развитию широкого спектра новых технологий, в том числе распределенной генерации и возобновляемой энергетики. Поскольку с каждым годом растет спрос на потребление электроэнергии, вопрос цифровизации в настоящее время является наиболее актуальным.

Цифровизация приносит следующие ключевые эффекты в область топливно-энергетического комплекса:

снижение продолжительности и частоты перерывов электроснабжения (SAIDI/SAIFI) – планируется изменение действующего значения на 5 % к 2024 г.;

повышение уровня технического состояния производственных фондов электроэнергетики для объектов на 5 % к 2024 г. без повышения затрат на поддержание технического состояния;

снижение на 20 % аварийности на объектах электроэнергетики, связанной с техническим состоянием производственных фондов к 2024 г.

Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы описывает ключевые тенденции развития области цифровых технологий и цифровизации в целом. Стратегия включает вопросы цифровизации на всех стадиях жизненного и производственного циклов активов. Примеры технологий представлены на рисунке.

Применение цифровых технологий позволяет оптимизировать функционирование объектов ВИЭ в энергетических системах и, как следствие, повышает эффективность и надежность энергетических систем с большими долями ВИЭ. Международное агентство по возобновляемым источникам энергии выделяет следующие ключевые группы цифровых технологий, способствующих внедрению ВИЭ:

интернет вещей;

искусственный интеллект и большие данные;

блокчейн.

Цифровая энергетика предполагает переосмысление фундаментальных бизнес-процессов в направлении повышения производительности труда, конкурентоспособности и надежности сети, снижения затрат, обеспечения доступности и прозрачности услуг для потребителей, оптимизации и ускорения работы, создания интеллектуальной экосистемы, цифровых электростанций, перехода на дистанционные формы обслуживания, применения риск-ориентированного подхода, а также использования таких инновационных компонентов, как система распределенного реестра (блокчейн), большие данные, искусственный интеллект, промышленный Интернет вещей (Industrial Internet), машинное обучение, цифровые двойники.

- большие данные;
- нейротехнологии и искусственный интеллект;
- системы распределенного реестра;
- квантовые технологии;
- новые производственные технологии;
- промышленный интернет;
- компоненты робототехники и сенсорика;
- технологии беспроводной связи;
- технологии виртуальной и дополненной реальностей.

Ключевые технологии цифровизации

Заключение. Коцепция Smart Grid позволяет стимулировать развитие инновационных технологий в области энергетики, позволяет расширять масштабы производства высокоителлектуальных технологий.

Список использованных источников

1. Развитие цифровой экономики в России. Программа до 2035 года [Электронный ресурс] // Рос. акад. наук. – Режим доступа : http://innclub.info/wp-content/uploads/2017/05/strategy.pdf. – Дата доступа : 07.05.2022.

2. Цифровизация энергетики [Электронный ресурс] // М-во энергетики Рос. Федерации. – Режим доступа : https://in.minenergo.gov.ru/energynet/docs/Цифровая%20энергетика.pdf. – Дата доступа : 07.05.2022.

3. Цифровизация энергетики. Предпосылки, развитие, прогноз / И. Н. Паскарь [и др.] // [Электронный ресурс] // Изв. ТулГУ. Техн. науки. – 2020. – Вып. 8. – С. 44–58.

Список использованных источников

1. Razvitie cifrovoj ekonomiki v Rossii. Programma do 2035 goda [Electronic resource] // Ros. akad. nauk. – Mode of access : http://innclub.info/wp-content/uploads/2017/05/strategy.pdf. – Date of access : 07.05.2022.

2. Cifrovizaciya energetiki [Electronic resource] // M-vo energetiki Ros. Federacii. – Mode of access : https://in.minenergo.gov.ru/energynet/docs/Cifrovaya%20energetika.pdf. – Date of access : 07.05.2022.

3. Cifrovizaciya energetiki. Predposylki, razvitie, prognoz / I. N. Paskar' [et al.] // [Electronic resource] // Izv. TulGU. Tekhn. nauki. – 2020. – Iss. 8. – S. 44–58.

УДК 621.311

Т. Д. Ковалева, А. А. Шкиренко, Е. М. Гецман

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕДИНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассматривается возможность создания единого информационного пространства в рамках технологического и оперативного управления электроэнергетическими компаниями. Выделены преимущества использования CIM-моделей, обоснована целесообразность использования СК-11 платформы для создания автоматизированных систем диспетчерского, технологического, ситуационного, коммерческого управления объектами электроэнергетики в генерирующих и электросетевых компаниях.

Ключевые слова: умные сети, CIM-модели, автономные локальные системы управления, централизованная система, распределенная система.

T. D. Kovaleva, A. A. Shkirenka, E. M. Hetsman

USING COMMON INFORMATION MODEL IN THE ENERGY SECTOR

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The article considers the possibility of creating a single information space within the framework of technological and operational management of electric power companies. The advantages

of using CIM models are highlighted, the expediency of using the SK-11 platform for creating automated systems for dispatching, technological, situational, commercial management of electric power facilities in generating and electric grid companies is substantiated.

Keywords: Smart Grid, CIM models, autonomous local control systems, centralized system, distributed system.

Введение. Широкое распространение умных сетей и оптимизация функционирования производственно-технологического комплекса компаний в электроэнергетике должно обеспечить взаимодействие и взаимозаменяемость информационных систем электроэнергетических компаний. Предполагаемая альтернатива оптимизации основывается на создании единого информационного пространства в рамках технологического и оперативного управления.

Формирование единого информационного пространства в рамках субъекта электроэнергетики предполагает выделение семантики, которая позволит различным информационным системам «общаться» на одном языке. Единой семантикой для компаний электроэнергетического сектора является общая информационная модель – CIM (Common Information Model), это серия открытых стандартов, которые разработаны специально с учетом специфики электроэнергетики.

Материалы и методы исследования. Использование CIM-моделей в энергосистеме России напрямую связано с платформой СК-11. СК-11 – открытая платформа с изменяемым набором приложений для создания автоматизированных систем диспетчерского, технологического, ситуационного, коммерческого управления объектами электроэнергетики в генерирующих и электросетевых компаниях, у крупных промышленных потребителей электроэнергии, системных операторов электроэнергетических систем. Основополагающим принципом, определяющим архитектуру платформы СК-11, обеспечивающим ее гибкость и открытость, является применение международных стандартов и средств общесистемной, информационной и программной интеграции использующих ее функциональных компонентов. СК-11 представляет собой новое поколение автоматизированных систем управления передачей и распределением электроэнергии, отказами, ремонтами и эксплуатацией, а также автоматизированных систем подготовки оперативного персонала центров управления. Данная платформа позволяет создавать как автономные локальные системы управления, так и централизованные системы, автоматизирующие работу сразу нескольких связанных центров управления с обеспечением единого информационного пространства и резервирования.

За время использования на российском рынке сформировались положительные эффекты от внедрения данной технологии:

снижение капитальных затрат за счет снижения интенсивности износа оборудования, сокращения случаев выхода из строя, оптимизации планирования ремонтов;

снижение недоотпуска электроэнергии за счет уменьшения аварийности, сокращения времени ликвидации аварийных отключений, удаленного автоматизированного восстановления электроснабжения потребителей;

снижение технологических и коммерческих потерь электроэнергии за счет использования расчетных комплексов, позволяющих оптимизировать конфигурацию сети по критерию минимума потерь, а также выявлять точки несанкционированного отбора мощности;

повышение качества технологического присоединения, повышение уровня загрузки существующих сетей, оптимизация капитальных затрат на развитие сети за счет применения расчетного комплекса планирования развития сети;

сокращение эксплуатационных расходов за счет использования единой информационно-технологической платформы, оптимизация существующих технологических процессов, снижения влияния «человеческого фактора», повышения производительности труда;

повышение надежности и качества электроснабжения за счет внедрения современных комплексных решений мониторинга и автоматического управления.

Для обеспечения эффективной работы в условиях иерархии распределенных центров управления энергокомпании СК-11 предлагает две основные технологии:

создание единой централизованной системы управления с выделением зоны ответственности для каждого центра управления;

создание распределенной системы управления с локальными узлами и общим информационным пространством для всех центров управления.

Централизованная система имеет ряд преимуществ в плане простоты и удобства обслуживания, экономии средств на аппаратном обеспечении, но имеет ограничения в плане наличия критических узлов, повышенных требований к постоянной готовности протяженных коммуникаций, обеспечивающих доступ к ядру системы.

Распределенная система управления позволяет обеспечить максимальную автономность каждого узла системы в локальном центре управления, поддержание синхронного состояния информационной модели во всех узлах, оперативный обмен данными реального времени и событиями.

Одновременно может быть создано неограниченное количество версий информационной модели с возможностью ветвления от произвольных базовых моделей с созданием древовидных структур и последующим слиянием различных версий. Технология версионности позволяет пользователям проводить работу по актуализации модели и вносить перспективные объекты, не затрагивая оперативный контур автоматизированных систем диспетчерского управления, работающих на текущей версии модели. Эти возможности используются для планирования развития сети, подготовки к вводу в эксплуатацию новой версии модели и т. д.

Заключение. На примере российской энергосистемы, которая применяет данную платформу на протяжении 11 лет, можно сделать вывод, что использование CIM-моделей имеет много преимуществ: технологию создания единой распределенной системы для группы центров управления, высокая производительность, работа с большими объемами информации, открытая интегра-

ционная платформа, надежность и безопасность. Данный факт следует учесть при создании автоматизированного информационного обмена между субъектами электроэнергетики Республики Беларусь, а также потребителей электрической энергии, проектных и научных организаций.

Список использованных источников

Монитор Электрик [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://monitel.ru. – Дата доступа : 23.03.2022.

References

Monitor Elektrik [Electronic resource]. – Mode of access : https://monitel.ru. – Date of access : 23.03.2022.

УДК 621.31

А. М. Фаррахова[1], Д. М. Валиуллина[2]

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ЦИФРОВОЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ РАЗЪЕДИНИТЕЛЬ

[1]Казанский государственный энергетический университет, Институт электроэнергетики и электротехники, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация
[2]Доцент, Казанский государственный энергетический университет, Институт электроэнергетики и электротехники, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается секционирующие устройства. На сегодняшний день почти все переключения в нормальных и послеаварийных режимах в распределительных сетях осуществляются в ручном режиме. Поэтому время восстановления электроснабжения увеличивается. Предлагаем использование интеллектуальных устройств автоматического секционирования.

Ключевые слова: разъединитель, ВЛ, интеллектуальный, коммутационное устройство, цифровой, секционирующее устройство.

A. M. Farrakhova[1], D. M. Valiullina[2]

INTELLIGENT DIGITAL CONTROLLED DISCONNECTOR

[1]Kazan State Power Engineering University, Institute of Electricity and Electrical Engineering, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation
[2]Associate Professor, Kazan State Power Engineering University, Institute of Electricity and Electrical Engineering, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Annotation. The article deals with partitioning devices. To date, almost all switching in normal and post-emergency modes in distribution networks is carried out manually. Therefore, the recovery time of power supply is increased. We offer the use of intelligent automatic partitioning devices. A diagram of the functional structure of the operation of an intelligent-digital controlled disconnector is given.

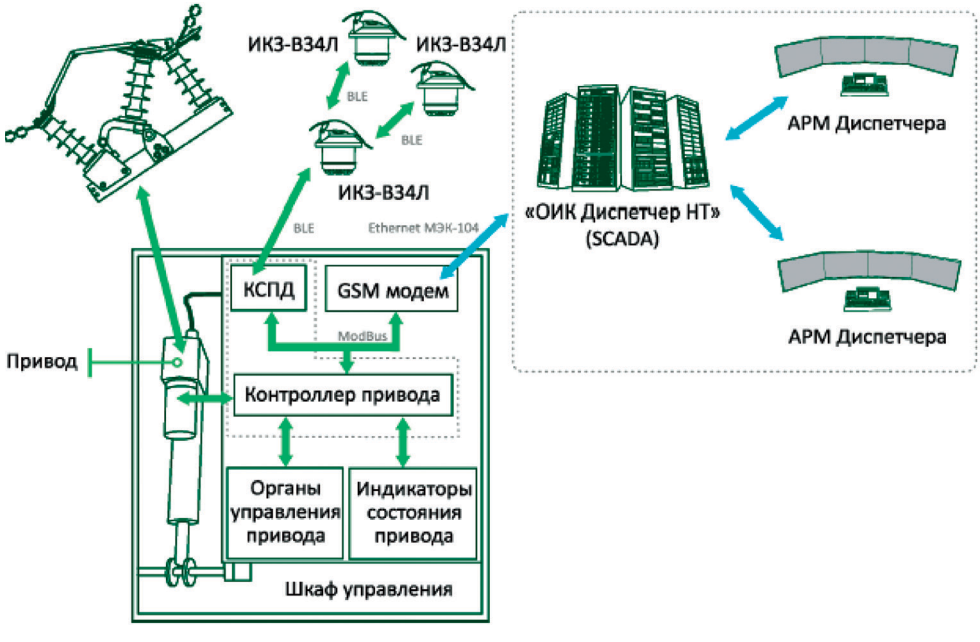
Keywords: disconnector, overhead line, intelligent, switching device, digital, sectioning device.

Введение. Разветвленность распределительных сетей 6–10 кВ и их динамичное развитие в крупных населенных пунктах, а также питание удаленных потребителей по сетям 6–10 кВ серьезно снижает надежность электроснабжения потребителей [1]. В условиях эксплуатации это проводит к необходимости разработки эффективных мероприятий для повышения надежности электроснабжения потребителей [4].

Материалы и методы исследования. При возникновении аварии на ВЛ поврежденный участок в кратчайшее время нужно отделить от неповрежденного. На энергообъектах для этого установлены секционирующие устройства, функцией которых является деление линии электропередач на секции [2]. Этими устройствами являются такие разъединители с ручным приводом [3]. В связи с тем, что из-за ручного привода уходит больше времени, задача по автоматизации коммутационных аппаратов является актуальной. Внедрение интеллектуальных автоматических пунктов секционирования воздушных линий является отличным вариантом решения данной проблемы.

На рисунке схематически представлена функциональная структура работы данного оборудования [5].

Заключение. Блок КСПД оборудован радиоканалом ближней связи, это позволяет получать информацию от ИКЗ и сохранять ее во внутренней памяти. Так же блок оборудован каналом передачи данных к GSM роутеру для их передачи на диспетчерский пункт. Данные по GSM каналу передаются напрямую в SCADA-систему [6].



Функциональная структура

Каждый индикатор устанавливается на провод. Для монтажа/демонтажа индикатора предусмотрен специальный инструмент, который устанавливается на монтажную штангу и способствует производить работы без отключения [7].

Диспетчер передает сигналы в GSM модем, потом сигналы передаются в блок управления приводом по Modbus. Далее передается информация по Modbus о состоянии привода и собственное состояние. Блок управления получает команды на переход, включает привод и ждет достижения концевого выключателя. Если по данным энкодера перемещение отсутствует или ток выше установленного допустимого порога, то двигатель отключается и выдает сообщение об ошибке. Если же за заданное время привод не перешел из одного состояния в другое, то он отключается и выдает сообщение об аварии.

Список использованных источников

1. Китушин, В. Г. Надежность энергетических систем. Теоретические основы : учеб. пособие / В. Г. Китушин. – Новосибирск : НГТУ. – 2003. – 252 с.

2. Валиуллина, Д. М. Применение тепловизионной съемки для выявления дефектов строительных ограждающих конструкций и энергетического оборудования / Д. М. Валиуллина, В. Н. Енюшин. // Изв. высш. учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 9–10. – С. 29–33.

3. Мамонтов, А. Ю. Современное состояние и перспективы развития разъединителей 6–10 кВ / А. Ю. Мамонтов // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. – 2020. – № 8. – С. 5.

4. Секретарев, Ю. А. Оценка влияния на надежность системы электроснабжения различного рода дефектов ее основных элементов / Ю. А. Секретарев, В. М. Левин // Вестн. Казан. гос. энергет. ун-та. – 2019. – Т. 11, № 4 (44). – С. 55–63.

5. РИЦ – интеллектуальный цифровой разъединитель [Электронный ресурс] // ЭЛЕКТРОНПРИБОР. – Режим доступа : https://www.electronpribor.ru/catalog/391/rits.htm. – Дата доступа : 08.04.2022.

6. Интеллектуальный цифровой управляемый разъединитель наружной установки РИЦ (комплект) ВЛ 6–10 кВ. Рук. по эксплуатации РИЦ – РЭ В1.2 01-06 [Электронный ресурс] // АНТРАКС. Энергия под контролем. – Режим доступа : https://www.terra-kip.ru/files/products/89868f6b-77d1-11ea-80e8-00155d001238_616f259b-78b4-11ea-80e8-00155d001238.pdf. – Дата доступа : 08.04.2022.

7. Интеллектуальный цифровой управляемый разъединитель РИЦ [Электронный ресурс] // СМАРТСНАБ. – Режим доступа : https://smartsnab.com/product/intellektualnyiy-tsifrovoy-upravlyaemyiy-razedinitel-rits. – Дата доступа : 08.04.2022.

References

1. Kitushin, V. G. Nadezhnost’ energeticheskih sistem. Teoreticheskie osnovy : ucheb. posobie / V. G. Kitushin. – Novosibirsk : NGTU. – 2003. – 252 s.

2. Valiullina, D. M. Primenenie teplovizionnoj s”emki dlya vyyavleniya defektov stroitel’nyh ograzhdayushchih konstrukcij i energeticheskogo oborudovaniya / D. M. Valiullina, V. N. Enyushin. // Izv. Vys. ucheb. zavedenij. Problemy energetiki. – 2015. – № 9–10. – S. 29–33.

3. Mamontov, A. Yu. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya raz”edinitelej 6–10 kV / A. Yu. Mamontov // KIP i avtomatika: obsluzhivanie i remont. – 2020. – № 8. – S. 5.

4. Sekretarev, Yu. A. Ocenka vliyaniya na nadezhnost’ sistemy elektrosnabzheniya razlichnogo roda defektov ee osnovnyh elementov / Yu. A. Sekretarev, V. M. Levin // Vestn. Kazan. gos. energet. un-ta. – 2019. – T. 11, № 4 (44). – S. 55–63.

5. RIC – intellektual’nyj cifrovoj raz’edinitel’ [Electronic resource] // ELEKTRONPRIBOR. – Mode of access : https://www.electronpribor.ru/catalog/391/rits.htm. – Date of access : 08.04.2022.

6. Intellektual’nyj cifrovoj upravlyaemyj raz”edinitel’ naruzhnoj ustanovki RIC (komplekt) VL 6–10 kV. Ruk. po ekspluatacii RIC – RE V1.2 01-06 [Electronic resource] // ANTRAKS. Energiya pod kontrolem. – Mode of access : https://www.terra-kip.ru/files/products/89868f6b-77d1-11ea-80e8-00155d001238_616f259b-78b4-11ea-80e8-00155d001238.pdf. – Date of access : 08.04.2022.

7. Intellektual’nyj cifrovoj upravlyaemyj raz’edinitel’ RIC [Electronic resource] // SMARTSNAB. – Mode of access : https://smartsnab.com/product/intellektualnyiy-tsifrovoy-upravlyaemyiy-razedinitel-rits. – Date of access : 08.04.2022.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.316.1

В. А. Бошняга[1], В. М. Суслов[2], И. П. Стратан[3], И. В. Добря[4]

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ КАБЕЛЬНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 6–35 КВ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ С ИЗОЛИРОВАННОЙ И КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ

[1]Кандидат технических наук, Институт энергетики Молдовы, Кишинев, Молдова
[2]Институт энергетики Молдовы, Кишинев, Молдова
[3]Кандидат технических наук, профессор, Технический университет Молдовы, Кишинев, Молдова
[4]Технический университет Молдовы, Кишинев, Молдова

Аннотация. Работа посвящена исследованию кабельной линии среднего напряжения при изолированной и компенсированной нейтрали в пакете МАТЛАБ. Выявлены некоторые присущие закономерности изменения напряжений и токов в схеме при вариации сопротивления повреждения в разных точках линии.

Ключевые слова: кабельная распределительная сеть 6–35 кВ, установившийся режим, изолированная и компенсированная нейтраль, однофазное замыкание.

V. A. Bosneaga[1], V. M. Suslov[2], I. P. Stratan[3], I. V. Dobrea[4]

FEATURES OF OPERATION OF CABLE DISTRIBUTION NETWORK 6–35 KV IN STEADY MODE WITH ISOLATED AND COMPENSATED NEUTRAL WITH SINGLE-PHASE EARTH FAULT

[1]Ph. D. in Engineering Science, Institute of Power Engineering, Chisinau, Moldova
[2]Institute of Power Engineering, Chisinau, Moldova
[3]Ph. D. in Engineering Science, Professor, Technical University, Chisinau, Moldova
[4]Technical University, Chisinau, Moldova

Annotation. The work is devoted to the study of medium voltage cable line with isolated and compensated neutral in the MATLAB package. Some inherent patterns of voltage and current changes in the circuit are revealed when the damage resistance varies at different points of the line.

Keywords: cable distribution networks 6–35 kV, steady state mode, isolated and compensated neutral, single-phase failure.

Введение. Работе кабельных сетей среднего напряжения 6–35 кВ в режиме изолированной нейтрали посвящено большое количество работ ввиду важно-

сти этого вопроса. В результате многолетних исследований и сопутствующей дискуссии исследованы многочисленные аспекты данной проблемы, связанные с обеспечением надежного электроснабжения, начиная с классических работ в этой области [1–3] и многих других и заканчивая сравнительно недавними научными публикациями, а также разработанными на их основе нормативными материалами [4–6]. Рассмотрены и различные способы заземления нейтрали, призванные устранить присущие этому режиму недостатки, например, [7–9]. В основе многих исследований лежат упрощенные схемы замещения, позволяющие получить аналитические выражения, описывающие как установившиеся, так и переходные процессы, в том числе с использованием различных моделей возникающей электрической дуги.

Материалы и методы исследования. В данной работе авторы попытались дать наглядное описание установившегося процесса такой цепи при однофазном замыкании на землю через некоторое сопротивление с использованием программного пакета МАТЛАБ. Этот пакет дает возможность достаточно просто и точно рассчитать практически любой режим работы кабельной или смешанной сети для реальных параметров трансформаторов и линий с учетом многих факторов, которые сложно учесть при аналитическом исследовании. Кроме того, одним из преимуществ данного способа моделирования является легкость изменения конфигурации схемы сети и ее параметров в процессе моделирования конкретной сети.

Опишем кратко используемую модель, приведенную на рис. 1.

Схема содержит в основном стандартные элементы из библиотеки МАТЛАБа, такие как трехфазный источник питания (Three phase source), три участка линии в виде пи-схемы (PI Line Section *1–3*), четыре измерительных блока для определения токов и напряжений в схеме, вспомогательный измеритель (Multimeter), некоторые операционные блоки (sqrt), отдельные сопротивления для моделирования нагрузки (Load) и замыкания на землю (*4*, *10*). В состав модели также включен дополнительный элемент (Additional lines), позволяющий при необходимости моделировать остальную часть сети. Кроме того, включены модели силового питающего (Y0/d 1) и вспомогательного трансформаторов (Y/d 2). Последний используется для моделирования всевозможных способов заземления нейтрали. Отметим, что при необходимости в рассматриваемую схему можно легко включить и другие элементы, например, вместо пи-схемы линии можно использовать модель линии с распределенными параметрами, позволяющие получить более точные результаты. Однако проведенные расчеты не выявили существенных отличий результатов при использовании более точной модели, в связи с этим в дальнейшем применялась пи-схема.

Описанная модель использовалась для проведения расчетов стационарного режима кабельной линии номинальным напряжением 10 кВ, состоящей из двух участков кабеля (PI Line section *1* и *3*), что дает возможность при необходимости измерить токи и напряжения и в средней части линии. Участок линии (PI Line

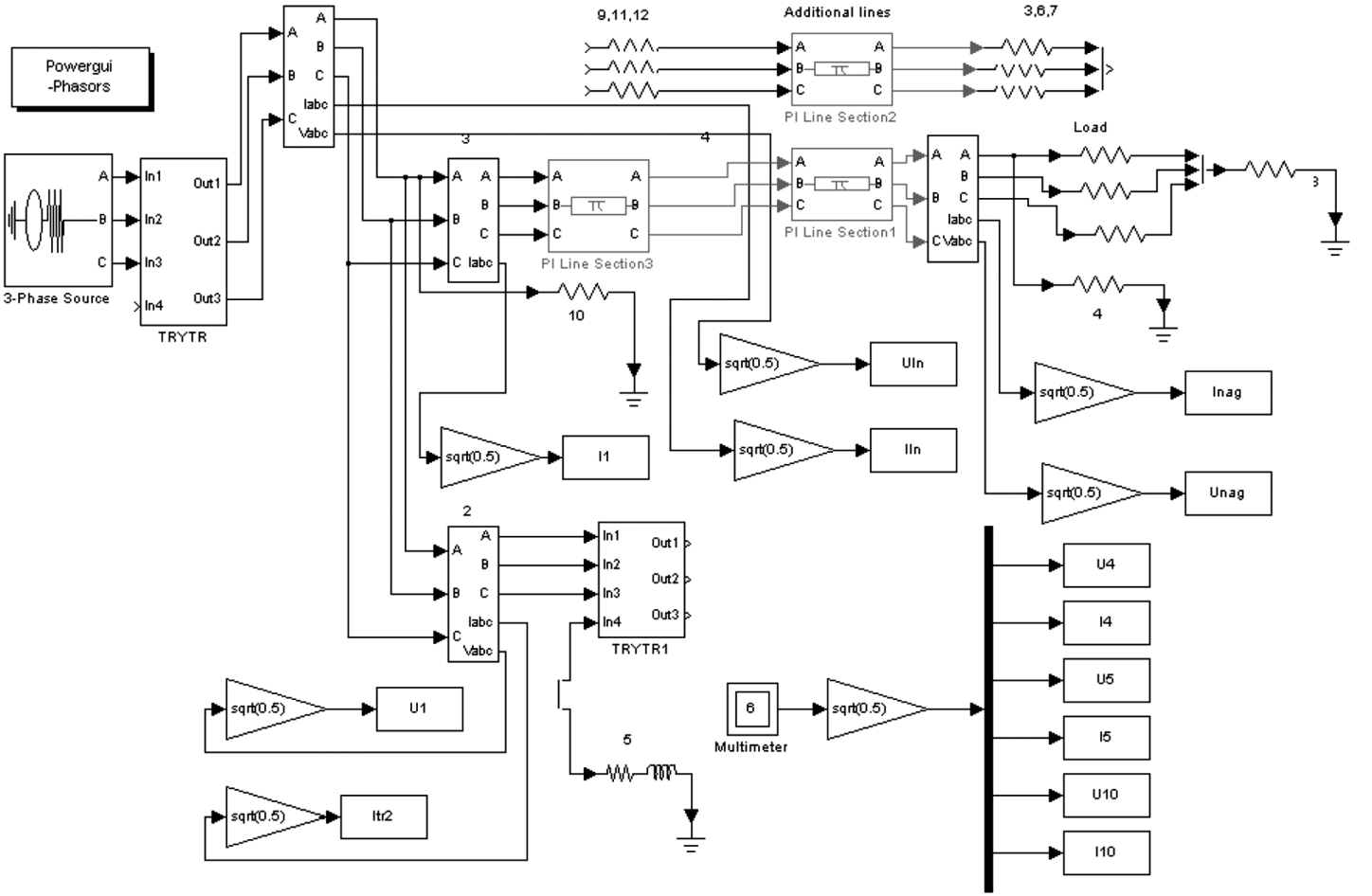


Рис. 1. Базовая схема, используемая при моделировании электрической сети

section *2*) предусмотрен для возможности моделирования также воздушных линий, если они имеются в сети.

На рис. 2 приведено окно для ввода параметров участка кабеля, в котором видно, какие заданы удельные параметры для разных последовательностей, а также какая задана длина участка. В данном случае для сети выбран трехфазный алюминиевый кабель сечением жилы 120 мм^2, его пассивные параметры взяты из [5]. Как видно из рис. 2, в данной модели кабеля заданы удельные активные сопротивления для прямой и нулевой последовательности в Ом/км, а также аналогично индуктивность и емкость на единицу длины. Кроме того, задается длина участка кабельной линии, в данном случае 5 км. Таким образом, исследуемая кабельная линия имеет полную длину 10 км.

Следующим основным элементом модели является стандартная модель трансформатора с соединением Y0/d, параметры которой рассчитаны по предложенной методике на основе данных из каталогов заводов изготовителей трансформатора с учетом особенностей его работы при данной схеме соединения обмоток. Принято допущение о равенстве его параметров короткого замыкания для режимов прямой и нулевой последовательностей. Параметры холостого хода вводятся только для режима прямой последовательности, так как режим холостого хода для нулевой последовательности при такой схеме соединения обмоток нереализуем.

Такой подход позволяет моделировать трехстержневые конструкции в отличие от трехфазных групп однофазных трансформаторов. На рис. 3 приведено окно с данными для основного силового трансформатора, мощностью 16 МВА. Для вспомогательного трансформатора мощностью 250 кВА, служащего для образования искусственной нейтрали, также аналогично заданы соответствующие типовые значения параметров.

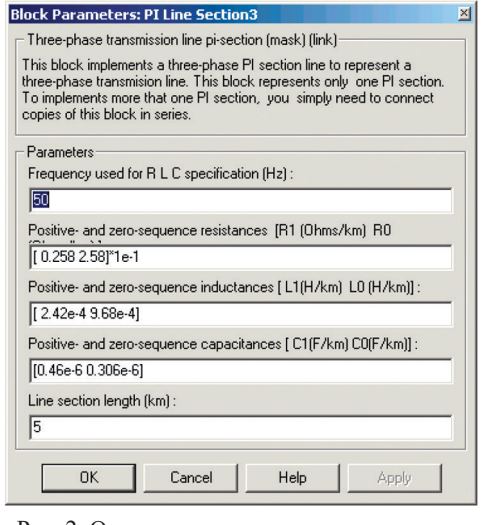


Рис. 2. Окно для ввода параметров участка кабельной линии 10 кВ

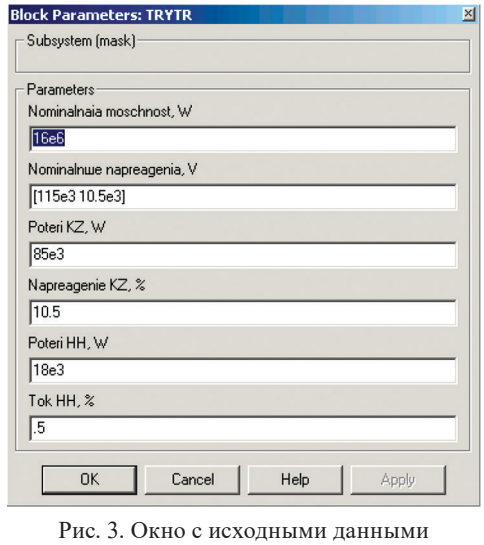


Рис. 3. Окно с исходными данными основного трансформатора

Токи и напряжения элементов схемы, включенных в места замыкания на землю и в нейтраль вспомогательного трансформатора (сопротивления *4*, *5*, *10* по рис. 1), измеряются с помощью элемента Multimeter, который, наряду с упомянутыми ранее измерительными элементами, позволяет строить векторы токов и напряжений схемы, что облегчает и делает наглядным анализ происходящих процессов.

Результаты исследования и их обсуждение. 1. *Установившийся режим кабельной линии с изолированной нейтралью.* Для начала опишем результаты, полученные для наиболее простого режима без включения дополнительных элементов в нейтраль вспомогательного трансформатора. Отметим, что проведенное моделирование различных режимов при наличии нагрузки показало, что для выявления основных закономерностей протекания токов через емкости линии на первом этапе полезно и достаточно рассмотреть режим холостого хода линии, так как токи нагрузки значительно превышают емкостные токи и затушевывают картину происходящего. На рис. 4 приведена упрощенная схема, позволяющая наглядно описать происходящие процессы на основе результатов моделирования по полной схеме. Для иллюстрации приведены только емкости фаз на землю. Зачерненными прямоугольниками показаны низковольтные обмотки фаз, соединенные в треугольник, основного (Y0/d 1) трансформатора и соединенные в звезду обмотки фаз вспомогательного (Y/d 2) трансформатора, запитанные от треугольника вторичных обмоток основного трансформатора.

Показан также треугольник низковольтной вторичной обмотки вспомогательного трансформатора, наличие которого принципиально важно для протекания токов нулевой последовательности. Прямоугольниками показаны комплексные сопротивления *5*, *10* и *4*, которые моделируют заземление нейтрали и повреждения при замыкании фазы на землю в начале или в конце линии, и упрощенно в виде конденсаторов показаны емкости фаз линии относительно земли. Также показаны стрелками токи, протекающие в ветвях схемы: токи (Ia', Ib', Ic') от питающего треугольника вторичной обмотки основного трансформатора, токи (Ia, Ib, Ic) в начале линии (после подключения сопротивления *10*, моделирующего замыкание на землю), токи (Itra, Itrb, Itrc) в обмотках звезды вспомогательного трансформатора, а также токи In и Ip в нейтрали и в месте повреждения.

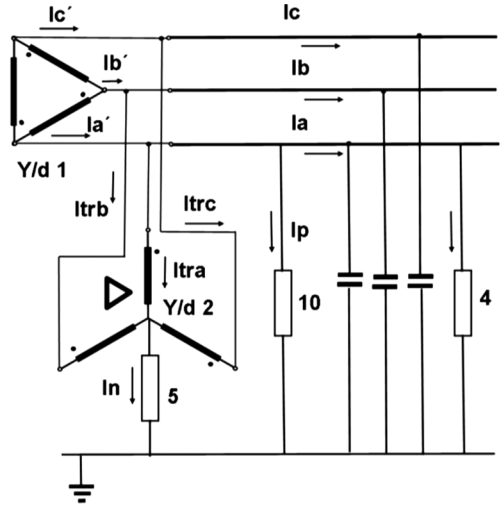


Рис. 4. Упрощенная схема сети

Рассмотрим замыкание на землю в начале линии через активное сопротивление *10* (рис. 4), при этом в процессе моделирования будем изменять его величину. Зададим сопротивле-

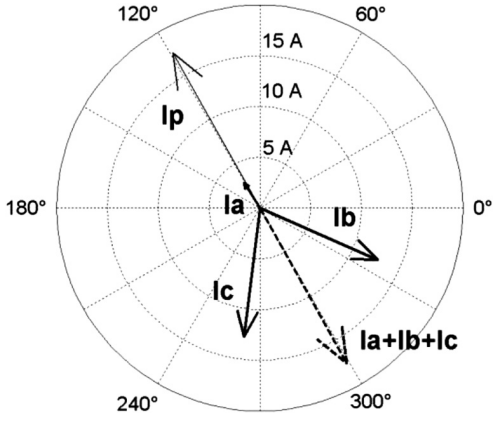


Рис. 5. ВД токов в начале линии (Ia, Ib, Ic) и в заземляющем сопротивлении 10 (Ip) для случая R10 = 4 Ом

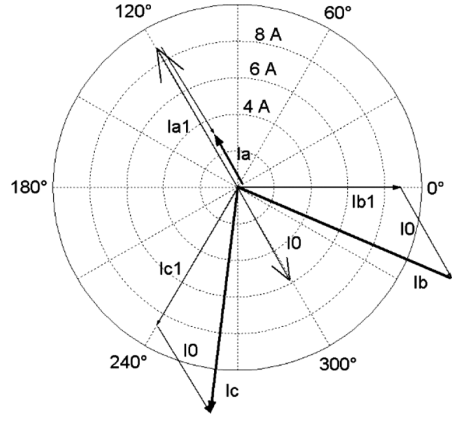


Рис. 6. ВД токов в начале линии с разложением на симметричные составляющие

ние *4*, позволяющее при необходимости моделировать замыкание на землю в конце линии (рис. 1), равное 4 Мом, что практически эквивалентно разрыву. ВД токов фаз в начале линии (Ia, Ib, Ic) и тока Ip в заземляющем сопротивлении для рассматриваемого случая изолированной нейтрали с повреждением в начале линии через сопротивление R10 = 4 Ом приведена на рис. 5. Отметим, что токи линии измеряются согласно рис. 1 и 4 после места подключения заземляющего сопротивления *4*.

Как видно из рис. 5, емкостные зарядные токи в фазах **в начале** линии несимметричны, ток поврежденной фазы *A* значительно меньше остальных, а их сумма не равна нулю и представлена пунктирным вектором (Ia+Ib+Ic). Очевидно, этот вектор представляет собой утроенный ток нулевой последовательности в начале линии. Он равен по величине и находится в противофазе по отношению к вектору тока Ip в сопротивлении R10. Таким образом, токи нулевой последовательности всех фаз циркулируют в контуре, образованном емкостями фаз линии и замыкаются через сопротивление R10 в месте повреждения. Более подробно этот момент отражен на рис. 6, где показаны рассчитанные значения симметричных составляющих токов фаз в начале линии для прямой и нулевой последовательностей (Ia1, Ib1, Ic1 и I0). Видно, что суммирование соответствующих векторов дает те же векторы реальных токов фаз в линии, которые изображены на рис. 5, с учетом разных масштабов рисунков.

Отметим также, что ввиду отсутствия нагрузки токи всех фаз в конце линии нулевые. Это означает, что и тока нулевой последовательности (как и других последовательностей) в конце линии нет, он, как и реальные токи фаз, убывает по мере продвижения к концу линии. Поэтому неоправданное применение упрощенных схем замещения, предполагающих неизменный продольный ток (типа схемы, представленной на рис. 4), может привести к неадекватным выводам. Как показал расчет, токи в первичных обмотках вспомогательного трансформатора в этом режиме малы и являются намагничивающим током (рис. 7).

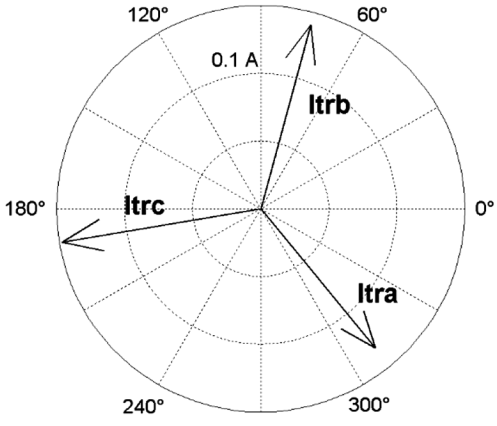


Рис. 7. Токи в фазах первичной обмотки вспомогательного трансформатора в режиме изолированной нейтрали

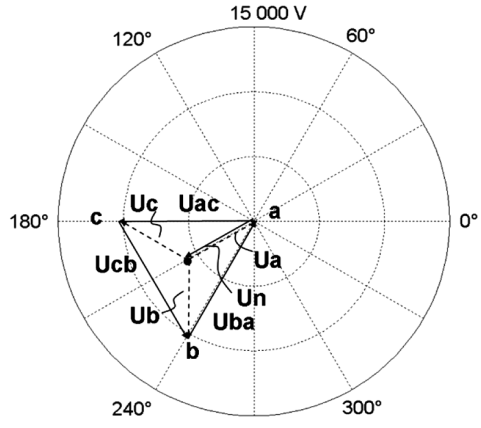


Рис. 8. Напряжения фаз вторичной обмотки основного трансформатора относительно земли при замыкании

Рассмотрим далее величины напряжений в данном режиме. На рис. 8. представлены векторы напряжений обмоток основного трансформатора относительно земли в режиме изолированной нейтрали при замыкании на землю через небольшое сопротивление R10 = 4 Ом. Видно, что треугольник линейных напряжений вторичной обмотки основного трансформатора одной из вершин практически касается нулевой точки. Реальное напряжение в этой вершине треугольника относительно земли составляет десятки вольт и незаметно по сравнению с фазным напряжением. Пунктиром показаны напряжения обмоток вспомогательного трансформатора, а его нейтраль, как и следовало ожидать, находится под фазным потенциалом относительно земли, что отображается вектором Un, показанным сплошной линией.

Рассмотрим, как изменятся токи и напряжения в схеме при замыкании фазы на землю через большее сопротивление, равное величине R10 = 400 Ом. На рис. 9, 10 представлены соответственно ВД токов и напряжений в схеме. Из рис. 9 видно, что картина токов фаз в начале линии существенно изменилась, ток поврежденной фазы меньше отличается от токов здоровых фаз, что и следовало ожидать при увеличении сопротивления в месте повреждения. Токи фаз *а* и *б* находятся почти в противофазе и близки по величине, т. е. почти компенсируют друг друга, а ток фазы с находится практически в противофазе с током в месте повреждения Ip. Как и ранее, сумма токов фаз (Ia + Ib + Ic) уравновешивается током повреждения, и токи нулевой последовательности замыкаются в контуре, образованном емкостями линии и сопротивлением R10.

На рис. 10. представлена ВД напряжений фаз вторичной обмотки основного трансформатора относительно земли в режиме изолированной нейтрали при замыкании на землю через сопротивление R10=400 Ом. Видно, что собственно треугольник линейных напряжений практически не меняется, а перемещается параллельно сам себе, при этом изменяются потенциалы всех его вершин, в том числе и вершины, связанной с землей в месте повреждения. Этот

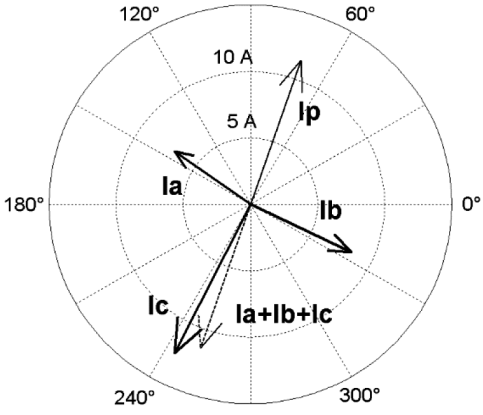


Рис. 9. ВД токов в линии (Ia, Ib, Ic) и в заземляющем сопротивлении R10 (Ip) для случая R10 = 400 Ом

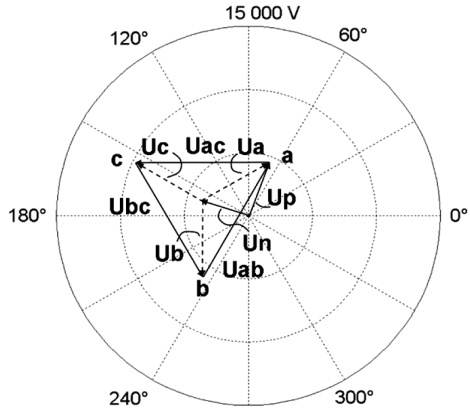


Рис. 10. Напряжения фаз вторичных обмоток основного трансформатора относительно земли при замыкании на землю через R10 = 400 Ом

потенциал отображен на рис. 10 вектором Up. При этом одновременно меняется и напряжение нейтрали относительно земли, равное вектору Un.

Напряжения фаз обмотки вспомогательного трансформатора, соединенной в звезду, остаются постоянными и по ним протекают только токи намагничивания, аналогично рис. 6. Таким образом, при изменении величины сопротивления в точке повреждения картина токов и напряжений в схеме изменяется, причем меняются как величины, так и фазы векторов, меньшему значению сопротивления в точке повреждения соответствует больший ток.

Рассмотрим этот вопрос более подробно, чтобы отследить закономерности изменения токов и напряжений в этом режиме. На рис. 11 представлены результаты расчетов напряжений фаз обмотки основного трансформатора относительно земли при ступенчатом изменении сопротивления в месте замыкания на землю в диапазоне 4–1800 Ом. Видна эволюция векторов напряжения Up в точке повреждения. При малом сопротивлении вершина треугольника сравнительно немного смещена относительно нуля, заметное смещение появляется при R = 40 Ом (точка, обозначенная цифрой 40), при этом величина напряжения Up в точке повреждения равна приблизительно 650 В. При его увеличении конец вектора напряжения Up (как известно из курса ТОЭ для ли-

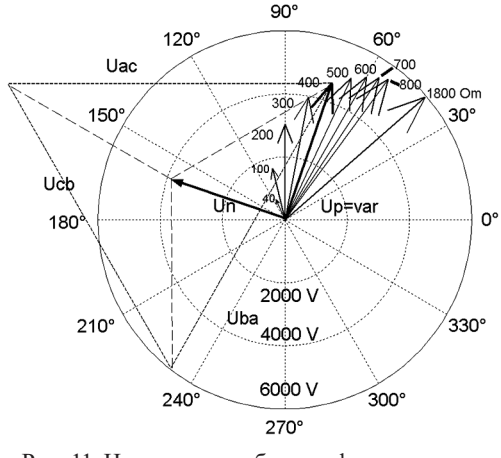


Рис. 11. Напряжения обмоток фаз основного трансформатора относительно земли в режиме изолированной нейтрали при замыкании на землю через переменное сопротивление R10 = 4–1800 Ом

нейных цепей [10]) описывает дугу окружности, а его величина достигает в пределе фазного напряжения. Векторы напряжений Up и Un для промежуточного случая R10 = 400 Ом выделены более толстой линией, а треугольник напряжений вторичной обмотки основного трансформатора показан пунктиром для этого же значения сопротивления в месте повреждения. В предельном положении при достаточно большом значении сопротивления повреждения, что соответствует фактически отсутствию замыкания на землю, центр треугольника совпадет с началом координат.

Аналогично ведет себя и напряжение нейтрали, конец вектора этого напряжения также опишет дугу окружности. Максимальное напряжение, равное фазному (как это видно и из рис. 10), будет при нулевом сопротивлении в точке повреждения, а минимальное, равное нулю, при отсутствии повреждения. Аналогичный результат получен и в [4] на основе аналитических выкладок с использованием упрощенной схемы замещения сети.

Рассмотрим далее изменение тока в месте повреждения. На рис. 12 показаны векторы тока в месте повреждения при дискретном изменении сопротивления в месте замыкания на землю в диапазоне 4–1800 Ом. Видна эволюция вектора тока Ip в точке повреждения. Как и в случае с напряжением, в линейной цепи конец вектора тока описывает дугу окружности, и меньшему значению сопротивления соответствует, очевидно, больший ток. Таким образом, в данном случае при изменении сопротивления в месте повреждения треугольник линейных напряжений смещается относительно земли, так что потенциал вершины, которая непосредственно связана с местом повреждения, изменяется от нуля при металлическом к. з. до фазного при отсутствии повреждения, как и должно быть. Соответственно, изменяется и напряжение нейтрали от фазного при металлическом к. з. до нуля при отсутствии повреждения. Токи в фазах в начале линии несимметричны и их сумма не равна нулю, что указывает на протекание в фазах токов нулевой последовательности. Сумма этих токов равна по модулю и противоположна по фазе току в месте повреждения, т. е. эти токи замыкаются в контурах, образованных емкостями линии и сопротивлением в точке повреждения.

Моделирование, проведенное для случая, когда повреждение происходит в конце линии, показало, что закономерности изменения напряжений в линии имеют аналогичный предыдущему случаю характер. Треугольник линейных напряжений также смещается параллельно самому себе, небольшое отличие состоит лишь в величине напряжения в точке повреждения. Причем в режиме холостого хода линии напряжение поврежденной фазы в конце незначительно превышает напряжение в ее начале. Например, при сопротивлении в точке повреждения равном 4 Ом, напряжение на поврежденной фазе в начале линии составляет около 70 В, а в конце линии около 80 В.

Рассмотрим далее токи в начале при повреждении в конце линии и при R4 = 4 Ом. Сопротивление R10 при этом принято достаточно большим. На рис. 13 приведена ВД токов в начале линии Ia, Ib, Ic и тока Ip в месте повреждения

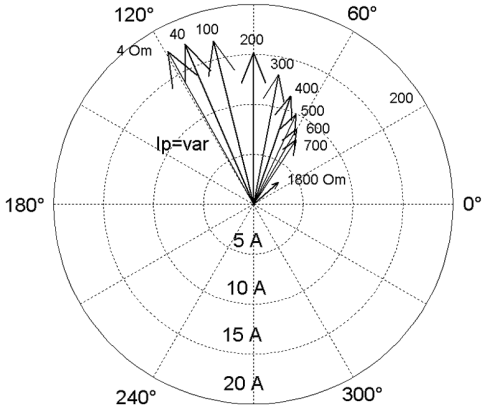


Рис. 12. Изменение величины тока Ip в месте повреждения при замыкании через переменное сопротивление R10 = 4–1800 Ом

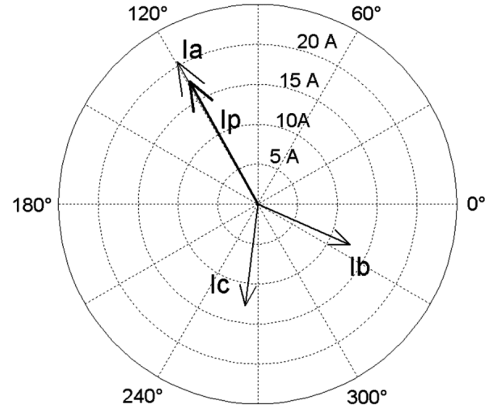


Рис. 13. ВД токов в начале линии Ia, Ib, Ic и тока Ip в месте повреждения при замыкании на землю в конце линии

в конце линии. Отметим, что в данном случае ток поврежденной фазы в начале линии становится больше токов здоровых фаз, так как на величину тока фазы А (ток Ia на рис. 5) существенно влияет еще ток Ip, текущий к месту повреждения. Разница токов поврежденной фазы Ia и тока в месте повреждения в конце линии Ip практически дает емкостной ток, который был в поврежденной фазе при замыкании в начале. Вместе с тем отметим, что в данном случае сумма токов в начале линии в отличие от предыдущего равна нулю. Это означает отсутствие токов нулевой последовательности в начале линии. Для пояснения этого на рис. 14 приведены векторы симметричных составляющих токов в начале линии. Видно, что в данном режиме в начале линии есть только составляющие токов прямой (Ia1, Ib1, Ic1) и обратной последовательности (Ia2, Ib2, Ic2), а нулевая последовательность отсутствует.

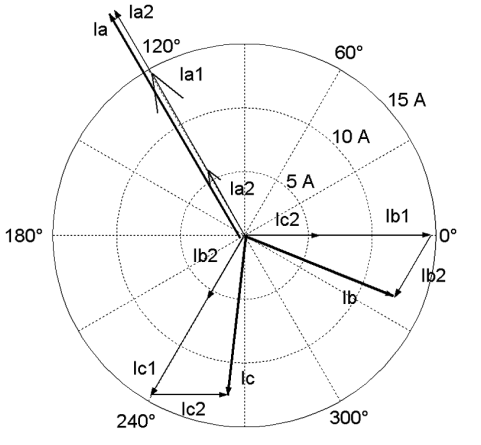


Рис. 14. Симметричные составляющие токов Ia, Ib, Ic в начале линии при замыкании на землю в конце

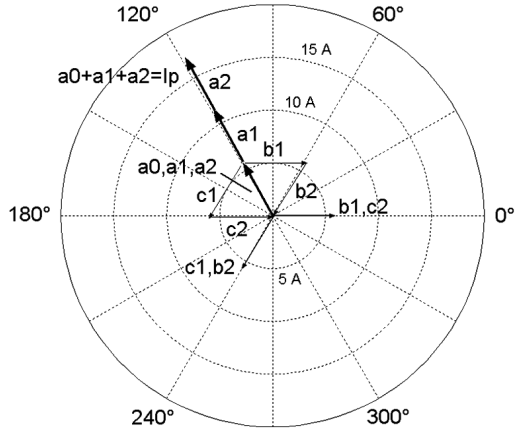


Рис. 15. Симметричные составляющие токов в конце линии

Складывая соответствующие векторы, получаем полные фазные токи Ia, Ib, Ic, совпадающие с приведенными на рис. 13. Рассмотрим для полноты картины симметричные составляющие токов в конце линии. При отсутствии нагрузки ток будет только в поврежденной фазе А. Расчет симметричных составляющих токов в конце линии (измеренных до точки повреждения) показал, что, в конце линии есть симметричные составляющие всех трех последовательностей. На рис. 15 приведены ВД симметричных составляющих токов. Для тока поврежденной фазы А сумма соответствующих составляющих дает ток в месте повреждения Ip, а для оставшихся двух фаз токи получаются нулевые. Таким образом, и в данном случае токи нулевой последовательности замыкаются через распределенные емкости линии и сопротивление в месте повреждения.

2. *Установившийся режим кабельной распределительной сети с полной компенсацией емкостного тока.* Рассмотрим далее режим полной компенсации емкостного тока с помощью дугогасящего реактора. Путем проведения серии расчетов для данного случая было подобрано значение индуктивности дугогасящего реактора, обеспечивающее минимальный ток в месте повреждения для рассматриваемого участка сети, равное 1,078 Гн. Проведенные расчеты показали, что картина распределения напряжения на линии практически аналогична полученной для предыдущего случая изолированной нейтрали, зависит лишь от величины сопротивления в месте повреждения, а изменяется лишь распределение токов в схеме. Сначала рассмотрим повреждение в начале линии. На рис. 16 показана ВД токов в начале линии при повреждении в начале линии через сопротивление 4 Ом (сопротивление *10* на рис. 4).

Из рис. 16 видно, что сумма токов (Ia + Ib + Ic) (показанная пунктирной линией) представляет собой утроенный ток нулевой последовательности и равна по модулю и противоположна по фазе току In в сопротивлении реактора *5*, включенного в нейтраль первичной обмотки вспомогательного трансформатора. Таким образом, и в данном режиме, аналогично тому, как это происходит

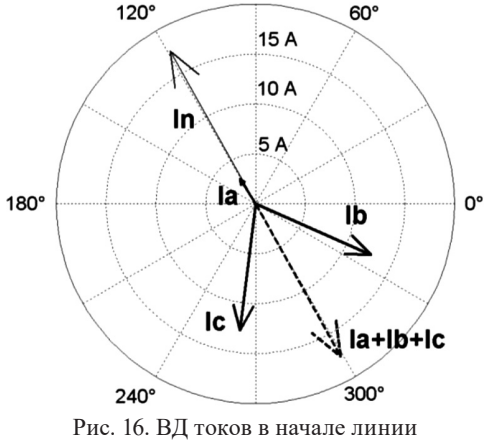


Рис. 16. ВД токов в начале линии при повреждении в начале линии через сопротивление 4 Ом



Рис. 17. ВД токов в первичных обмотках вспомогательного трансформатора

при замыкании в начале линии при изолированной нейтрали, токи нулевой последовательности циркулируют через распределенные емкости линии. Однако теперь они замыкаются через сопротивление дугогасящего реактора и обмотки вспомогательного трансформатора, соединенные в звезду. При этом ток в сопротивлении повреждения *10* и напряжение на нем близки к нулю, как и должно, быть в режиме полной компенсации.

На рис. 17 показаны токи в фазах первичной обмотки вспомогательного трансформатора. Видно, что эти токи Itra, Itrb, Itrc близки по фазе и являются для вспомогательного трансформатора практически токами нулевой последовательности. Отметим, что их рассчитанная сумма, как и должно быть, равна току в дугогасящем реакторе *5*, включенном в нейтраль этой обмотки. На рис. 18 показаны ВД токов от питающих обмоток треугольника основного трансформатора Ia′, Ib′, Ic′ совместно с токами в обмотках вспомогательного трансформатора Itra, Itrb, Itrc и токами в начале линии Ia, Ib, Ic. Как следует из рис. 18, питающие токи, равные сумме токов соответствующих обмоток вспомогательного трансформатора и токов в начале линии (рис. 4), при наличии дугогасящего реактора становятся симметричными, несмотря на несимметрию токов в начале самой линии. Таким образом, включение дугогасящего реактора оказывает симметрирующий эффект. Расчет показал, что при этом во вторичном замкнутом треугольнике вспомогательного трансформатора также протекает ток нулевой последовательности. В данном случае вспомогательный трансформатор работает в режиме короткого замыкания для токов нулевой последовательности. Моделирование режимов при увеличении величины сопротивления повреждения свыше 4 Ом показало, что ток в месте повреждения при этом практически не изменяется, работает принцип компенсации тока в месте повреждения.

Напряжение в точке повреждения изменяется в соответствии с ВД на рис. 19, описывая, как и ранее, дугу окружности в соответствии с ростом сопротивления

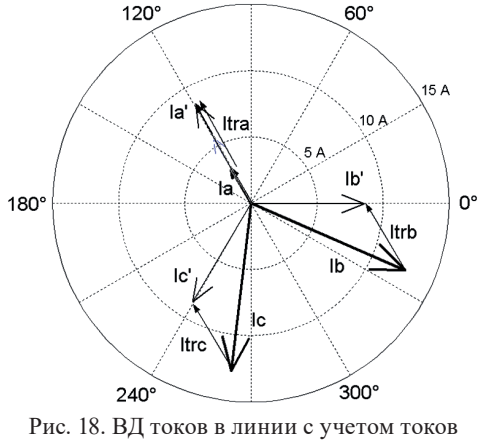


Рис. 18. ВД токов в линии с учетом токов в первичных обмотках вспомогательного трансформатора

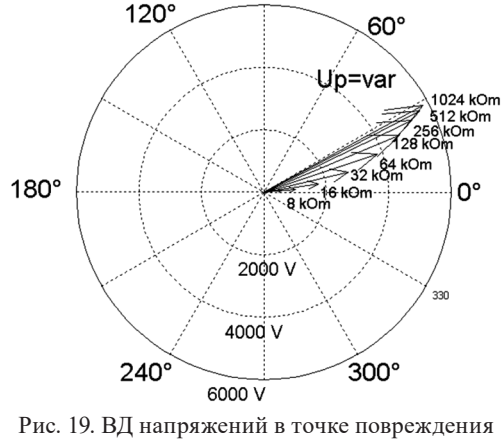


Рис. 19. ВД напряжений в точке повреждения при изменении сопротивления в этой точке

и может достигать опасных величин. Отметим, что упомянутые напряжения изменяются по разным законам, однако начальная и конечная точки дуг, описываемых векторами напряжений в месте повреждения Up, совпадают для линии с изолированной и компенсированной нейтралями. При малом сопротивлении вершины треугольников, примыкающие к точке повреждения, сливаются с началом координат, при этом в обоих случаях напряжение нейтрали равно фазному. При большом сопротивлении, моделирующем отсутствие повреждения, центры треугольников линейных напряжений совпадают с началом координат, тока в нейтрали в обоих случаях нет и режим симметричный. Анализ режима с повреждением **в конце** линии при изменении сопротивления повреждения показало, что напряжение и ток в месте повреждения изменяются аналогичным образом.

Заключение. 1. В результате моделирования получена наглядная картина происходящих процессов в кабельной линии при однофазном замыкании на землю в начале и конце линии через некоторое сопротивление для случаев изолированной и компенсированной нейтрали электрической сети.

2. При уменьшении величины сопротивления в месте повреждения от максимума до нуля (крайние положения треугольника линейных питающих напряжений) **независимо от режима нейтрали** треугольник линейных питающих напряжений перемещается так, что его подключенная к месту повреждения вершина описывает дугу окружности, при этом величина напряжения смещения нейтрали изменяется соответственно от нуля (нет повреждения) до фазного напряжения. Однако для компенсированной линии отличие состоит в существенно другой кривизне траектории изменения вектора напряжения в точке повреждения.

3. При **изолированной нейтрали** и повреждении **в начале** линии в нее втекают токи прямой и нулевой последовательностей, которые уменьшаются до нуля по мере приближения к концу. Конец вектора тока повреждения при таком же как и ранее изменении сопротивления описывает (аналогично напряжению в месте повреждения) дугу окружности, достигая максимальной предельной величины при приближении сопротивления к нулю. Если повреждение происходит в конце линии, в начале линии есть только токи прямой и обратной последовательностей и нет токов нулевой последовательности. В свою очередь, в конце линии есть одинаковые токи всех трех последовательностей, что приводит к тому, что остается только ток в поврежденной фазе, а в остальных фазах токи нулевые.

4. При **компенсированной линии** ток в месте повреждения близок к нулю **независимо** от его места. Зато в нейтрали вспомогательного трансформатора протекает утроенный ток нулевой последовательности. При повреждении в **начале** линии в нее втекают токи прямой и нулевой последовательностей, которые уменьшаются до нуля по мере приближения к концу, где токи всех фаз нулевые.

Список использованных источников

1. Вильгельм, Р. Заземление нейтрали в высоковольтных системах / Р. Вильгельм, М. Уотерс. – М. : Госэнергоиздат, 1959. – 415 с.

2. Лихачев, Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов / Ф. А. Лихачев. – М. : Энергия, 1971. – 152 с.

3. Сирота, И. М. Режимы нейтрали электрических систем / И. М. Сирота, С. Н. Кисленко, А. М. Михайлов. – Киев : АН СССР, 1985. – 264 с.

4. Вайнштейн, Р. А. Режимы заземления нейтрали в электрических системах / Р. А. Вайнштейн, Н. В. Коломиец, В. В. Шестакова. – Томск : ТПУ, 2006. – 118 с.

5. Кабельные и воздушные линии электропередачи / Н. П. Бадалян [и др.]. – Владимир : ВлГУ, 2019. – 260 с.

6. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрической сети 6–35 : утв. ГПО «Белэнерго» 01.08.20046-35 кВ. – Минск : Белэнерго, 2004.

7. Кадомская, К. П. О резистивном заземлении нейтрали в сетях 6–35 кВ различного назначения / К. П. Кадомская, А. Б. Виштибеев // Режимы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ : науч.-техн. конф. : докл. – Новосибирск, 2000.

8. Компенсированная и комбинированно заземленная нейтраль. Опыт эксплуатации сети 6 кВ металлургического комбината / М. В. Ильиных [и др.] // Новости электротехники. – 2007. – № 2 (44).

9. Евдокунин, Г. А. Резистивное заземление нейтрали сетей 6–10 кВ / Г. А. Евдокунин, С. С. Титенков. – СПб. : Терция, 2009. – 264 с.

10. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1973. – 752 с.

References

1. Vil’gel’m, R. Zazemlenie nejtrali v vysokovol’tnyh sistemah / R. Vil’gel’m, M. Uoters. – M. : Gosenergoizdat, 1959. – 415 s.

2. Lihachev, F. A. Zamykaniya na zemlyu v setyah s izolirovannoj nejtral’yu i kompensaciej emkostnyh tokov / F. A. Lihachev. – M. : Energiya, 1971. – 152 s.

3. Sirota, I. M. Rezhimy nejtrali elektricheskih sistem / I. M. Sirota, S. N. Kislenko, A. M. Mihajlov. – Kiev : AN SSSR, 1985. – 264 s.

4. Vajnshtejn, R. A. Rezhimy zazemleniya nejtrali v elektricheskih sistemah / R. A. Vajnshtejn, N. V. Kolomiec, V. V. SHestakova. – Tomsk : TPU, 2006. – 118 s.

5. Kabel’nye i vozdushnye linii elektroperedachi / N. P. Badalyan [et al.]. – Vladimir : VlGU, 2019. – 260 s.

6. Tipovaya instrukciya po kompensacii emkostnogo toka zamykaniya na zemlyu v elektricheskoj seti 6–35 : utv. GPO «Belenergo» 01.08.20046-35 kV. – Minsk : Belenergo, 2004.

7. Kadomskaya, K. P. O rezistivnom zazemlenii nejtrali v setyah 6–35 kV razlichnogo naznacheniya / K. P. Kadomskaya, A. B. Vishtibeev // Rezhimy zazemleniya nejtrali setej 6–35 kV : nauch.-tekhn. konf. : dokl. – Novosibirsk, 2000.

8. Kompensirovannaya i kombinirovanno zazemlennaya nejtral'. Opyt ekspluatacii seti 6 kV metallurgicheskogo kombinata / M. V. Il'inyh [et al.] // Novosti elektrotekhniki. – 2007. – № 2 (44).

9. Evdokunin, G. A. Rezistivnoe zazemlenie nejtrali setej 6–10 kV / G. A. Evdokunin, S. S. Titenkov. – SPb. : Terciya, 2009. – 264 s.

10. Bessonov, L. A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki / L. A. Bessonov. – M. : Vyssh. shk., 1973. – 752 s.

УДК 004.75

И. К. Будникова[1], Р. И. Заманов[2]

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

[1]Кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация
[2]Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Аннотация. В работе рассмотрены возможности повышения надежности электроснабжения кустовых площадок на новых участках Юрубчено-Тохомского нефтянового месторождения путем децентрализованной автоматизации аварийных режимов работы сети. На основании результатов моделирования делается вывод о том, что защита отпайки, путем установки пунктов секционирования сетей, дает возможность сократить потери в добыче нефти примерно в 17 раз.

Ключевые слова: моделирование, электроснабжение, автоматизация, секционирование, надежность, реклоузер.

I. K. Budnikova[1], R. I. Zamanov[2]

IMPROVING THE RELIABILITY OF POWER SUPPLY SYSTEMS AT OIL PRODUCTION FACILITIES

[1]Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor Russian Federation
[2]Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Annotation. The paper considers the possibilities of improving the reliability of power supply to well pads in new areas of the Yurubcheno-Tokhomskoye oil field by decentralized automation of emergency operation of the network. Based on the simulation results, it is concluded that the protection of the branch line, by installing sections of the networks, makes it possible to reduce losses in oil production by about 17 times.

Keywords: modeling, power supply, automation, partitioning, reliability, recloser.

Введение. Каждый сектор экономики обладает своими особенностями, влияющими на технологическое развитие. Нефтедобывающая отрасль имеет ключевое значение в формировании бюджетных доходов, и ее развитие позволяет получить значительный экономический эффект для смежных секторов.

ПАО «НК «Роснефть» – лидер российской нефтепереработки. Непрерывное развитие сегмента «Переработка и сбыт» является одной из стратегических задач компании. Основной целью «Роснефти» в этой области является увеличение объемов реализации качественной продукции с высокой добавленной стоимостью на прямую конечному потребителю. Для достижения этой цели компания активно модернизирует и расширяет свои нефтеперерабатывающие мощности и сбытовую сеть [1].

В нефтеперерабатывающий блок компании на территории РФ входят 13 крупных НПЗ, расположенных в ключевых регионах России.

АО «Восточно-Сибирская нефтегазовая компания» входит в группу компаний ПАО «НК «Роснефть» [2]. Товарная продукция поставляется в систему магистральных нефтепроводов.

В 2014 г. «Востсибнефтегаз» приступила к реализации проекта по освоению расширенного первоочередного участка Юрубчено-Тохомского месторождения (ЮТМ) – крупное нефтегазоконденсатное местрождение в России [2, 3].

В настоящее время на ЮТМ активно ведется добыча нефти на 33 кустовых площадках [2, 3]. Каждая кустовая площадка оснащена оборудованием для добычи нефти, ее транспортировки к пункту подготовки, замерительными установками, системами управления, понижающими и повышающими трансформаторами.

Данные объекты являются ответственными потребителями электроэнергии, на бесперебойной работе которых основывается успешное выполнение плана по добыче нефти.

Каждая минута работы на ЮТМ стоит колоссальных физических усилий и материальных ресурсов. Добыча нефти ведется круглосуточно при любых погодных условиях.

Аварийные отключения данного оборудования даже на короткий промежуток времени способны принести значительные потери для компании.

Многолетний зарубежный опыт показал: одним из наиболее эффективных путей решения является реализация принципа децентрализованной автоматизации аварийных режимов работы сети. Он позволяют отключать только ее аварийный участок, опираясь на локальную информацию о повреждении, обрабатываемую непосредственно в самом пункте без использования каких-либо каналов связи. В силу того, что из строя выводится лишь конкретный участок, уменьшается число потребителей, которые одновременно могут быть повреждены. Длительность перерывов электроснабжения сокращается благодаря повышению быстродействия релейной защиты и автоматики.

Материалы и методы исследования. В данной работе рассмотрен способ повышения надежности электроснабжения кустовых площадок путем внедрения в энергосистему ЮТМ пунктов секционирования сетей (ПСС) – реклоузеров [4].

Реклоузер (Reclosure – переключатель) – устройство автоматического управления и защиты воздушных распределительных сетей (ВРС) на основе вакуумных выключателей под управлением специализированной микропроцессорной системы автоматики [5, 6].

В настоящее время все потребители электроэнергии на кустовых площадках работают от сети напряжением 6 кВ. Основываясь на этом факторе, для внедрения в энергосеть ЮТМ оптимальным будет выбор реклозуера типа «TER Rec15 All R5». Данную модель поставляет компания «Таврида Электрик». В табл. 1 представлены основные характеристики данного оборудования, которые

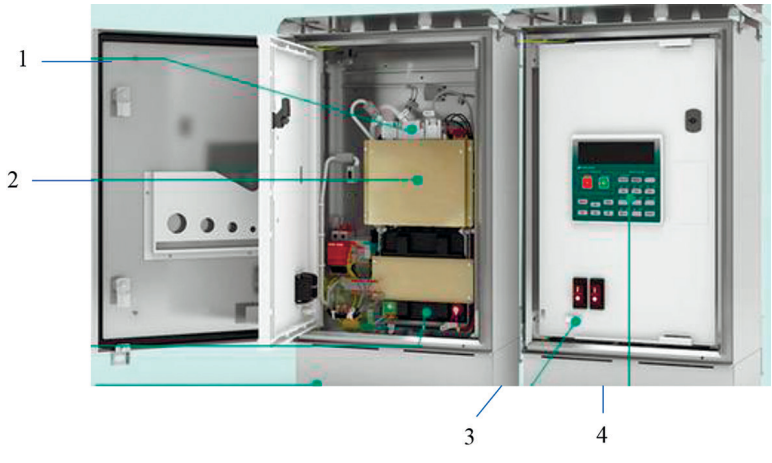
Таблица 1. **Основные характеристики реклоузера**

Параметры модели TER Rec15 A11 R5	Значение
Номинальное напряжение, кВ	10
Номинальный ток, А	630
Номинальный ток отключения, мА	12,5
Собственное время отключения, мс	50
Собственное время включения, мс	80
Испытательное напряжение грозового импульса, кВ	75
Механический речурс, операций В-О	30000

полностью удовлетворяют требованиям в области надежности энергоснабжения и безопасности его обслуживания, более того, оставляют резерв для введения в работу более мощного оборудования.

При помощи реклоузеров воздушные распределительные линии (ВРЛ) делятся на отдельные участки, в каждом из которых устанавливается интеллектуальное устройство, которое в режиме реального времени анализирует параметры работы сети и при необходимости выполняет ее реконфигурацию. Таким образом, производится локализация поврежденного участка и автоматическое восстановление электроснабжения потребителей на неповрежденных участках. При этом исключается необходимость дистанционного поиска повреждения и его устранения – все это выполняется по месту работы реклоузера посредством микропроцессорного контроля [5, 6].

Конструкция и функциональность шкафа управления (см. рисунок) разработаны с учетом особенностей применения в распределительных сетях: удаленность от обслуживаемых подстанций, различные, а иногда довольно тяжелые климатические условия, необходимость осуществления специальных функций РЗА, отличающихся от традиционных.



Общий вид шкафа управления автоматикой

Основными компонентами шкафа управления автоматикой являются:

коммутационные интерфейсы для подключения внешних передающих устройств для интегрвации в системы SCADA (*1*);

микропроцессорный модуль управления, защиты и автоматики со встроенными GPRS-модемом и системой бесперебойного питания (*2*);

индикатор несанкционированного доступа в шкаф управления (*3*);

широкоформатная панель управления с низкотемпературным дисплеем (*4*).

Результаты исследования и их обсуждение. В данной работе для получения практических результатов рассмотрена в качестве примера конкретная воздушная распределительная сеть с напряжением 6 кВ – фидер 2-11 и все кустовые площадки, запитанные от него на одном из участков ЮТМ.

Указанный фидер был выбран по следующим причинам: большая протяженность, большое количество ответственных потребителей, а также большая протяженность отпаек, по которым уществляется энергоснабжение кустовых площадок. Его протяженность составляет 9,125 км. Данный фидер снабжает электроэнергией кустовые площадки № 14, 16, 17, 28, 29, на которых находится 17 скважин. На данный момент на указанных участках располагаются анкерные на которых установлены линейные разъединители (ЛР).

Для полного понимания целесообразности установки реклоузеров смоделированы два типа аварийных ситуаций: с использованием реклоузера и при его отсутствии на данном участке электрической сети.

Предположим, что на отпайке, питающей кустовую площадку № 16, где суточная добыча нефти составляет 63,6 т, произошла авария (удар молнии, короткое замыкание на кустовой площадке, обрыв провода в результате падения дерева, сильного порывистого ветра, обмерзания провода).

После получения данных об отклонении рабочих параметров от нормальных реклоузер отключает отпайку от основанного участка питания. В то же время остальные кустовые площадки продолжают функционировать в нормальном режиме.

Теперь рассмотрим ситуацию, когда отпайки не оборудованы реклоузерами, то есть на них стоят нынешние ЛР. При возникновении аварийной ситуации в том же месте, что мы рассмотрели ранее, а конкретнее отпайка на кустовую площадку № 16, происходит авария. В этот момент срабатывает система защиты, которая находится непосредственно на источнике, – ПС 6/35 кВ, в результате чего происходит аварийное отключение питания в целях недопущения распространения аварии. Следовательно, все кустовые площадки прекращают свою работу на срок ликвидации аварии и проверки работоспособности оборудования.

Сроки ликвидации варьируется в зависимости от сложности аварии, удаленности места аварии, погодных условий, ландшафта местости. Проанализировав случаи ликвидации аварий на ЮТМ, среднее время, необходимое для устранения причин неисправности и проверки готовности оборудования к работе, составляет примерно 2 часа [7].

При отсутствии ПСС останавливается питание фидера и все 17 насосов прекращают работу. Стоит отметить, что суточная добыча с пяти кустовых площадок составляет 1151,7 т [8]. В результате двухчасовой остановки, необходимой на ликвидацию аварии, общие потери составят 96 т. Однако установка реклоузера способствует значительному сокращению потерь, которые в результате составят 5,5 т. На основании этих данных, можно сделать вывод о том, что защита отпайки, путем установки ПСС, дает вызможность сократить потери примерно в 17 раз.

Помимо сокращения потерь при добыче установка реклоузеров положительно скажется на сокращении простоя исправного оборудования, что позволяет оставить в работе всех потребителей энергии, не пострадавших в результате аварии. При использовании ПСС только четыре электроцентробежных насоса, которые находятся непосредственно на кустовой площадке № 16, прекратят свою деятельность, пока авария не будет ликвидирована. В это же время тринадцать электроцентробежных насосов полностью продолжат свою деятельность.

Точные данные по срокам окупаемости рассчитать не представляется возможным, так как аварии происходят непредсказуемо, и точное время срабатывания защиты назвать нельзя. Однако, если проанализировать данные аварийных отключений по фидеру 2-11, который неоднократно упоминался ранее, то можно сделать вывод, что данный фидер отключался в среднем два раза в течение последних нескольких лет. Если учесть, что при полной остановке фидера 2-11 на время ликвидации аварии (2 часа) полностью останавливаются все 17 насосов (ЭЦН) на пяти кустовых площадках, то согласно данным по курсу валют (на 2021 г.) и ценам на нефть компания теряет порядка 14,4 млн руб. [7, 8].

Таблица 2. **Финансовые потери при аварии**

Куствая площадка	Потери при аварии в зависимости от наличия ПСС, руб.		Экономия, руб.
	ПСС	нет ПСС	
КП-14	2531750,5	14396093,9	11864343,4
КП-16	794636.7	14396093,9	13601457,2
КП-17	10369328,0	14396093,9	4026765,9
КП-28	110629,8	14396093,9	14285464,2
КП-29	589748,9	14396093,9	13806345,0

На основании результатов исследования по двум моделям, представленным в табл. 2, можно сделать вывод о том, что защита отпайки путем установки ПСС дает вызможность значительно сократить потери.

Помимо сокращения потерь при добыче установка реклоузеров положительно скажется на сокращении простоя исправного оборудования. Использование реклоузера позволит обеспечить работу всех потребителей энергии, не пострадавших в результате аварии, а также количественно оценить эффек-

тивность различных мероприятий по повышению надежности электроснабжения [9–11].

Заключение. Результаты проведенных исследований подтверждают экономическую целесообразность технологических преобразований на рассмотренном участке ЮТМ с применением интеллектуальных систем управления аварийными ситуациями.

Кроме того, применение реклоузеров даст возможность создать управляемую сеть, а схема автоматизации сети позволит выделять поврежденные участки линии за считанные секунды и, таким образом, минимизировать последствия аварийных ситуаций, значительно сократить простой исправного оборудования путем ограждения аварийного участка и отсечения его от общего питающего фидера, повышая надежность систем электроснабжения на объектах нефтедобывающей отрасли.

Список использованных источников

1. ПАО НК «Роснефть» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.rosneft.ru. – Дата доступа : 15.04.2022.

2. АО «Востсибнефтегаз» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://vsnk.rosneft.ru/about/Glance/OperationalStructure/Dobicha_i_razrabotka/Vostochnaja_Sibir/vsnk. – Дата доступа : 15.04.2022.

3. Юрубчено-Тохомского месторождение [Электронный ресурс] // Нефтяники. РФ. – Режим доступа : https://www.nftn.ru/oilfields/russian_oilfields/krasnojarskij_kraj/jurubcheno_tokhomskoe/20-1-0-116. – Дата доступа : 15.04.2022.

4. Реклоузеры – применение, достоинства, разновидности [Электронный ресурс] // Все об энергетике, электротехнике и электронике. – Режим доступа : https://pue8.ru/elektricheskie-seti/652-reklouzery-primenenie-dostoinstva-i-nedostatki-raznovidnosti.html. – Дата доступа : 15.04.2022.

5. Интеллектуальные системы на службе нефтегазовой отрасли [Электронный ресурс] // Рустмаш. – Режим доступа : https://www.rustmash.ru/blog/post/intellektualnye-sistemy-na-sluzhbe-neftegazovoy-otrasli-rossii-realnost. – Дата доступа : 15.04.2022.

6. Внедрение реклоузеров в целях повышения надежности электроснабжения [Электронный ресурс] // Отраслевой портал EnergoBelarus. – Режим доступа : https://energobelarus.by/articles/tekhnologii/vnedrenie_reklouzerov_v_tselyakh_povysheniya_nadezhnosti_elektrosnabzheniya. – Дата доступа : 15.04.2022.

7. Консолидированная финансовая отчетность (годовой отчет) ПАО НК «Роснефть» // ПА НК «Роснефть». – Режим доступа : https://vsnk.rosneft.ru/upload/site1/document_cons_report/rosneft_ifrs_12m2021.pdf. – Дата доступа : 15.03.2022.

8. Консолидированная финансовая отчетность ПАО НК «Роснефть» по международным стандартам [Электронный ресурс] // ПА НК «Роснефть». – Режим доступа : https://www.rosneft.ru/Investors/statements_and_presentations/Statements. – Дата доступа : 15.03.2022.

9. Будникова, И. К. Современные информационные технологии в нефтегазовой отрасли / И. К. Будникова, Р. И. Заманов // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. – 2021. – № 1 (23). – С. 153–156.

10. Будникова, И. К. Применение интеллектуальных систем для повышения надежности работы распределительных сетей / И. К. Будникова, Р. И. Заманов // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. – 2021. – № 3–4 (25–26). – С. 83–85.

11. Будникова, И. К. Компьютерное моделирование показателей надежности систем электроснабжения / И. К. Будникова, Е. В. Приймак // Вестн. технол. ун-та. – 2017. – Т. 20, № 5. – С. 76–79.

References

1. PAO NK «Rosneft'» [Electronic resource]. – Mode of access : https://www.rosneft.ru. – Date of access : 15.04.2022.

2. AO «Vostsibneftegaz» [Electronic resource]. – Mode of access : https://vsnk.rosneft.ru/about/Glance/OperationalStructure/Dobicha_i_razrabotka/Vostochnaja_Sibir/vsnk. – Date of access : 15.04.2022.

3. Yurubcheno-Tohomskogo mestorozhdenie [Electronic resource] // Neftyaniki. RF. – Mode of access : https://www.nftn.ru/oilfields/russian_oilfields/krasnojarskij_kraj/jurubcheno_tokhomskoe/20-1-0-116. – Date of access : 15.04.2022.

4. Reklouzery – primenenie, dostoinstva, raznovidnosti [Electronic resource] // Vse ob energetike, elektrotekhnike i elektronike. – Mode of access : https://pue8.ru/elektricheskie-seti/652-reklouzery-primenenie-dostoinstva-i-nedostatki-raznovidnosti.html. – Date of access : 15.04.2022.

5. Intellektual'nye sistemy na sluzhbe neftegazovoj otrasli [Electronic resource] // Rustmash. – Mode of access : https://www.rustmash.ru/blog/post/intellektualnye-sistemy-na-sluzhbe-neftegazovoy-otrasli-rossii-realnost. – Date of access : 15.04.2022.

6. Vnedrenie reklouzerov v celyah povysheniya nadezhnosti elektrosnabzheniya [Electronic resource] // Otraslevoj portal EnergoBelarus. – Mode of access : https://energobelarus.by/articles/tekhnologii/vnedrenie_reklouzerov_v_tselyakh_povysheniya_nadezhnosti_elektrosnabzheniya. – Date of access : 15.04.2022.

7. Konsolidirovannaya finansovaya otchetnost' (godovoj otchet) PAO NK "Rosneft'" // PA NK "Rosneft'". – Mode of access : https://vsnk.rosneft.ru/upload/site1/document_cons_report/rosneft_ifrs_12m2021.pdf. – Date of access : 15.03.2022.

8. Konsolidirovannaya finansovaya otchetnost' PAO NK "Rosneft'" po mezhdunarodnym standartam [Electronic resource] // PA NK "Rosneft'". – Mode of access : https://www.rosneft.ru/Investors/statements_and_presentations/Statements. – Date of access : 15.03.2022.

9. Budnikova, I. K. Sovremennye informacionnye tekhnologii v neftegazovoj otrasli / I. K. Budnikova, R. I. Zamanov // Informacionnye tekhnologii v stroitel'nyh, social'nyh i ekonomicheskih sistemah. – 2021. – № 1(23). – S. 153–156.

10. Budnikova, I. K. Primenenie intellektual'nyh sistem dlya povysheniya nadezhnosti raboty raspredelitel'nyh setej / I. K. Budnikova, R. I. Zamanov // Informacionnye tekhnologii v stroitel'nyh, social'nyh i ekonomicheskih sistemah. – 2021. – № 3–4 (25–26). – S. 83–85.

11. Budnikova, I. K. Komp'yuternoe modelirovanie pokazatelej nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya / I. K. Budnikova, E. V. Prijmak // Vestn. tekhnol. un-ta. – 2017. – T. 20, № 5. – S. 76–79.

УДК 311.321

E. V. Bicova[1], T. I. Kirillova[2], I. V. Vasilieva[3], L. P. Moraru[4]

ANALYSIS OF THE QUALITY OF BUILDING SHORT-TERM FORECASTS OF ENERGY BALANCES

[1]Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Institute of Power Engineering, Kishinev, Republic of Moldova

[2, 3, 4]Institute of Power Engineering, Kishinev, Republic of Moldova

Annotation. The quality analysis of the short-term forecasts of energy balances, based on the results for 6 cycles, was carried out. The methodological approaches of the applied two methods – extrapolation and neural network models are described.

Keywords: energy balance, short-time forecast, quality, neural network models.

Е. В. Быкова[1], Т. И. Кириллова[2], И. В. Васильева[3], Л. П. Морару[4]

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПОСТРОЕНИЯ КРАТКОСРОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ БАЛАНСОВ

[1]Кандидат технических наук, доцент, Институт энергетики, Кишинев, Республика Молдова
[2, 3, 4]Институт энергетики, Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Проведен качественный анализ краткосрочных прогнозов энергетических балансов, основанный на учреждении за 6 циклов. Описаны методологические подходы двух методов расследования – экстраполяции и нейросетевых моделей.

Ключевые слова: энергетический баланс, краткосрочный прогноз, качество, нейросетевые модели.

Introduction. Work on the implementation of short-term forecasts of energy balances began on the recommendations of the international INOGATE project, which took place in 2014–2015 in Eastern European and other countries, including Moldova. The project was aimed at harmonizing national statistics with European ones [1]. The issues of presentation energy balances according to a unified structure adopted by the International Energy Agency [2] were considered. The project also included several special trainings on a special section (TA-ESS [3]) of annual short-term forecasts of the energy balance (EB) within the framework of the activities of the Ministry of Economy. Such work was included in the work plans of the Ministry of Economy and began to be carried out annually in the country.

Relevance. Short-term forecasts of the energy balance are in demand by government organizations in the preparation of long-term documents for the next year or two. The energy balance of the previous year is published in the country with a delay of almost a year, so the forecast values of fuel consumption are used in the current year until the publication of the actual ones [4]. The short-term forecast of the energy balance is built annually for the next year as soon as the energy balance is published for the previous year (actual). At the same time, it is possible to compare published actual values with previously predicted ones and assess the quality of the previous forecast. Over the past years, 6 cycles of such calculations have been carried out and certain information has been accumulated, which makes it possible to carry out a generalized analysis of the quality of the Short-term forecasts of the energy balance for previous cycles [5–7]. An analysis of individual factors, methodological features and some related issues was described in [8–17].

The structure of the energy balance and the use of special software for assessing supply and demand are considered in the work of R. Podolets [8]. The issues of developing the methodology for medium-term forecasts of demand for electricity taking into account the dynamics of the development of the country's economy were studied in the work of A. Makarov [9]. Approaches to improving the validity of long-term forecasts for the development of the energy sector were studied in the work

of Yu. Kononov [10]. The dynamics of changes in fuel flows in the world was analyzed in large collective monographs by ERI edited by A. Makarov [11]. The methodology and experience in developing intersectoral balance models are described in the work of D. Shapot, V. Malakhov [12].

Methodological approaches and a number of results of the works carried out in Moldova have been described in several publications [13–17]. Articles [13, 14] are devoted to the methodology of short-term forecasts; analysis of prospective consumption of biomass in the domestic sector – work [15]; the development of a special calculation module for reflecting fuel flows and, at the same time, pollutant emissions, using the data for Moldova and Belarus as an example, is described in [16]; application of neural network analysis for fuel consumption forecasts is in [17].

Materials and methods of research. *Energy security indicators by fuels*. Moldova's System of indicators for analyzing and monitoring the overall level of energy security, contains a number of fuel-related indicators. These are: the availability of fuel and energy resources (import and consumption), production of own fuel and energy resources, consumption for the production of electricity and heat, and a number of others. Some of them are direct indicators reflecting key values of energy balances, for example, Gross Consumption.

The energy balance is entirely used to build fuel consumption forecasts.

The fuel consumption dynamics during a ten-year period is given below.

Dynamics of fuel flows for a number of key indicators of energy balances. The National Bureau of Statistics provided annually the Energy Balances, which is the main source of activity data regarding fuel consumption in the Republic of Moldova (included data only for the territory on the right bank of the Dniester River).

The dynamics of gross consumption, final energy consumption, primary production, import and export in RM are shown in Fig. 1, 2.

Gross consumption of fuel in the Republic of Moldova registered an increasing trend – from 2633 (2010) to 3087 (2018) ktep and after tended to decrease up to circa 2857 ktep in 2020. Final energy consumption had the same decreasing trend during the period 2010–2020 as Gross Consumption (Fig. 1) and in 2020 it registered the value of 2670 ktep.

The *Primary production* in RM does not provide the country with the necessary energy and mainly include production of biofuel, oil product and electricity. In 2020, Primary production amounted 682 thousand (668 ktep Biofuels, 6 ktep oil products and 8 ktep electricity), which is cca 4 times less than the total amount of fuel consumed in the country (Fig. 1).

The volume of Imports varied from a minimum of 1766 ktep to maximum 2109 ktep between 2010 and 2020. The Republic of Moldova imported mostly natural gas and oil products (about 95 % from total imported fuel). Under the heading From other sources is meant only electricity which is produced in the territory of the left bank of the Dniester River at Moldavian Thermal Power Plant and during the analyzed period the value varied from 161 ktep to 286 ktep (Fig. 1).

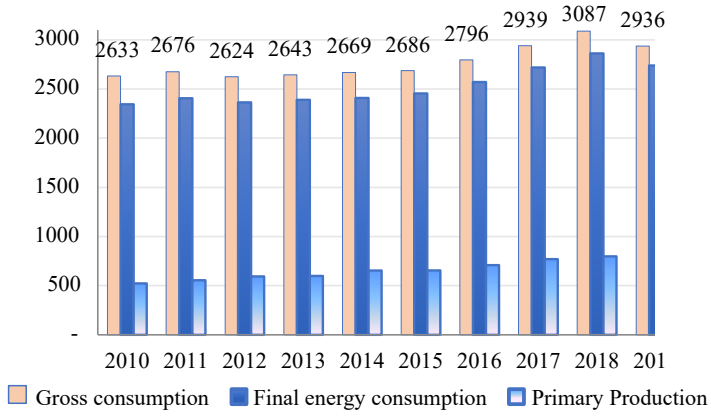


Fig. 1. Dynamics of Gross and Final energy consumption and primary production for 2010–2020, ktep

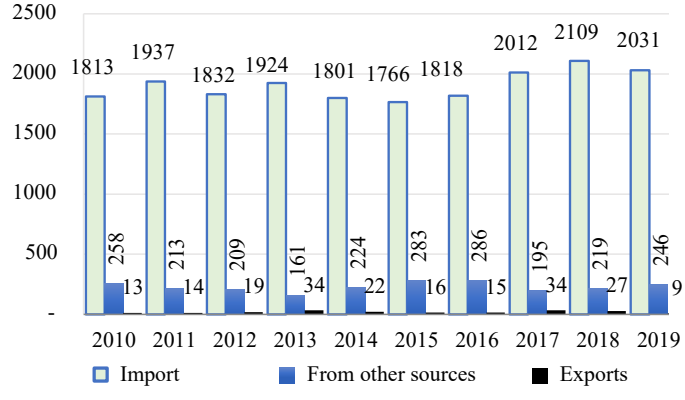


Fig. 2. Dynamics of Import and Export of fuel between 2010–2020, ktep

The Export volumes were and remain very small and mainly only oil products are exported (in some years export of biofuels and waste was registered also). In 2020 were exported 20 t of oil products and only 1 ton of biofuels and waste (Fig. 2).

Dynamics of natural gas, oil products, electricity and biomass consumption. The evolution of fuel consumption separately by type of fuel between 2010 and 2020 is presented below.

In 2020 the Gross consumption of natural gas constituted 872 ktep (Fig. 3). The natural gas consumption in Transformation Input is considered quite significant, since most power plants use this type of fuel mainly.

At the same time natural gas is also consumed in large volumes in the residential sector, which are reflected in Final energy consumption.

Between 2010 and 2020, the Final energy consumption of natural gas registered an increasing trend: from 456 ktep in 2010 to 496 ktep in 2020 (Fig. 4).

The consumption of **oil products** are mainly used in Transport sector, which is also reflected in the Final energy consumption. The total amount of oil products used

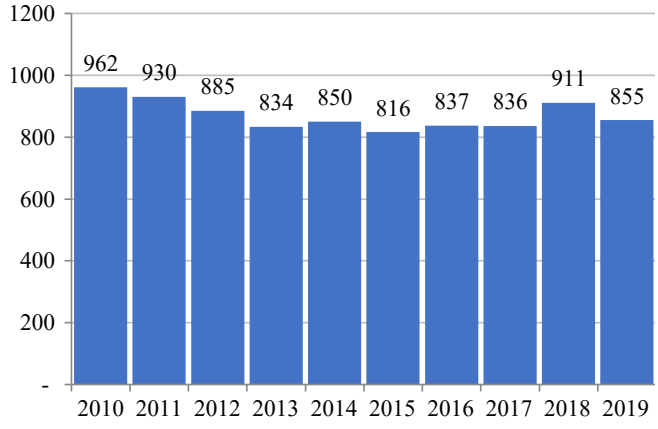


Fig. 3. Natural Gas – Gross Consumption, ktep

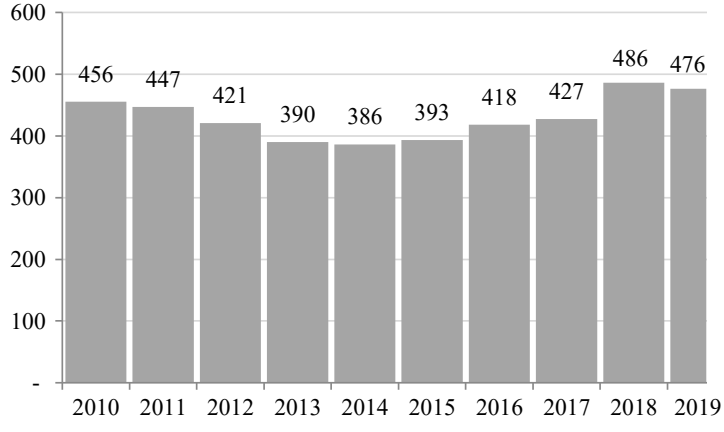


Fig. 4. Natural Gas – Final consumption, ktep

in 2020 amounted to 943 ktep, which is approximately 25 % more than was registered in 2010 (Fig. 5, 6).

Total Gross consumption of **biomass** registered an increasing trend from approximately 512 ktep to 787 ktep within 2010–2018, and decreased significantly cca 17 % in 2019–2020 (Fig. 7–8).

Biomass is the only type of fuel that is produced in the country in sufficient volume to cover the demand for Final consumption. The main biomass consumer is the residential sector.Between 2010 and 2020, Gross consumption and Final consumption of coal varied from a minimum of 75 ktep to 150 ktep, respectively from 74 ktep to 142 ktep (Fig. 9).

Based on the information presented above, the main fuel consumed on the Right Bank of the Dniester was Oil products, followed by the Biomass and Natural gas. It should be mentioned that the structure of fuel consumption didn't significantly changed during the analyzed period (Fig. 11, 11, *a*).

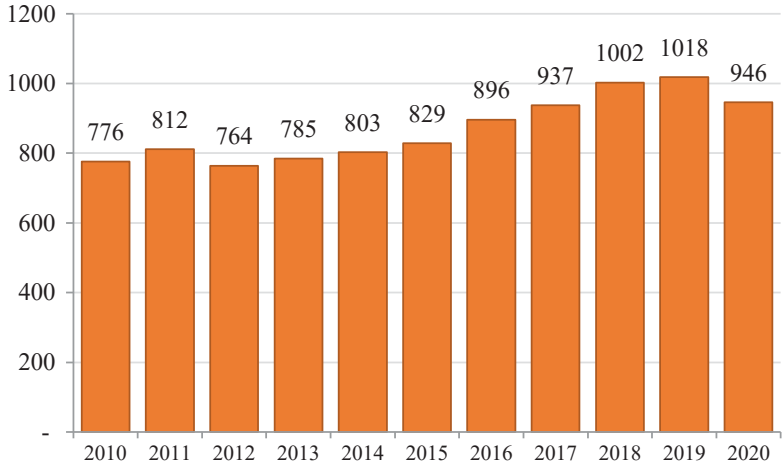


Fig. 5. Oil products – Gross Consumption, ktep

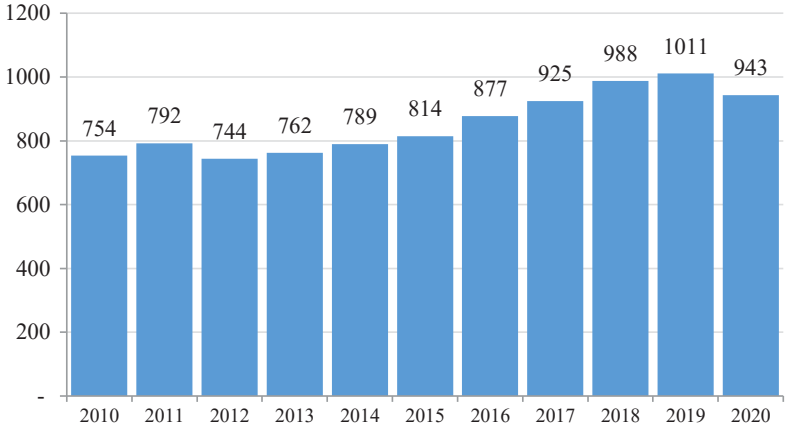


Fig. 6. Oil products – Final energy consumption, ktep

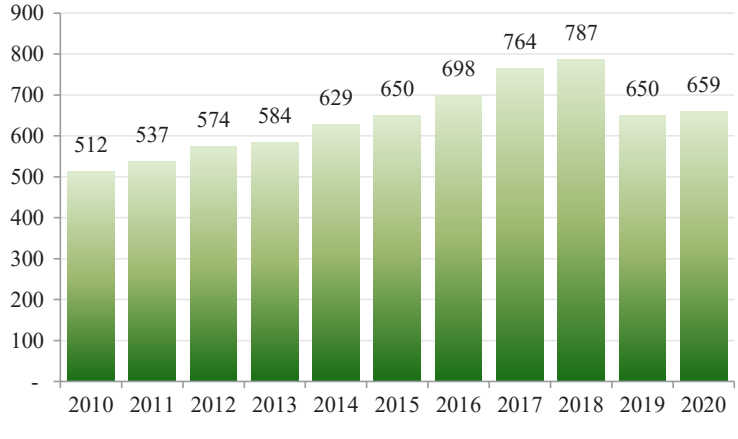


Fig. 7. Biomass – Gross Consumption, ktep

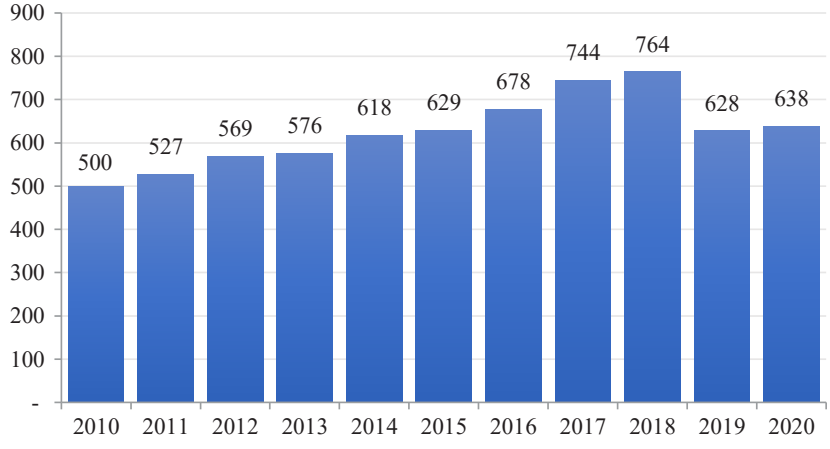


Fig. 8. Biomass – Final energy consumption, ktep

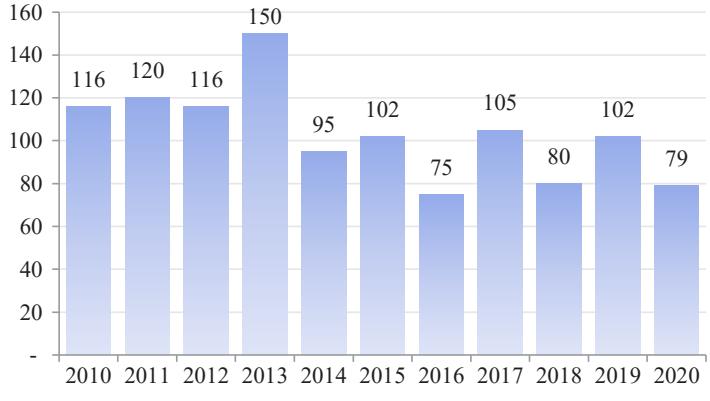


Fig. 9. Coal – Gross Consumption, ktep

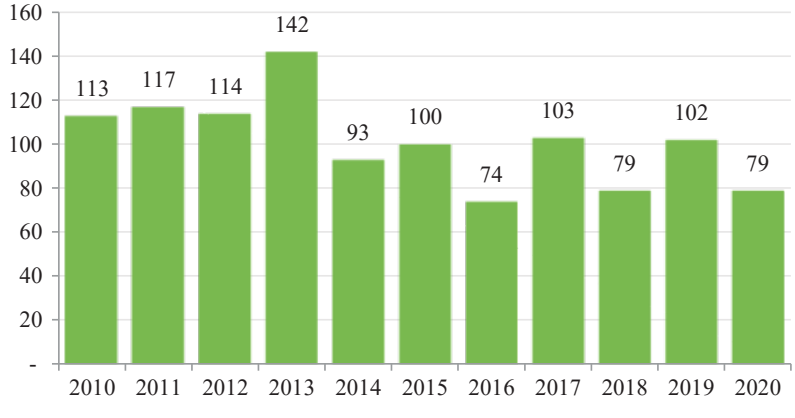


Fig. 10. Coal – Final energy consumption, ktep

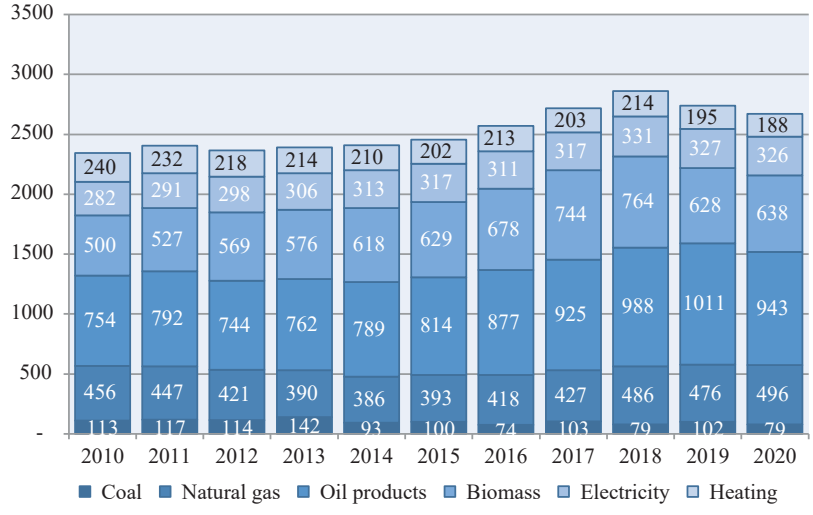


Fig. 11. Final Energy Consumption by energy products, ktep

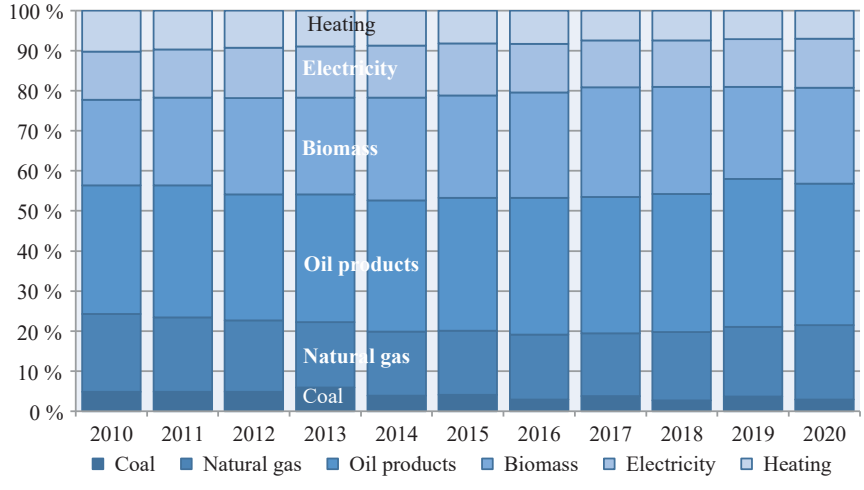


Fig. 11a. Final Energy Consumption by energy products, %

Thus, the Final energy consumption of heating decreased from 240 ktep in 2010 to 188 ktep in 2020, the consumption of coal decreased from circa 113 ktep in 2010 up to circa 79 ktep in 2020; at the same time, the consumption of gaseous fuels, liquid fuel, biofuels and electricity increased and in 2020 amounted to:

Gaseous fuels – 496 ktep;

Liquid fuel – 943 ktep;

Biofuels – 638 ktep;

Electricity – 326 ktep.

The fuel consumption by economic sectors between 2010 and 2020 is presented below (Fig. 12, 12a). The distribution of final energy consumption by sectors had the following trends:

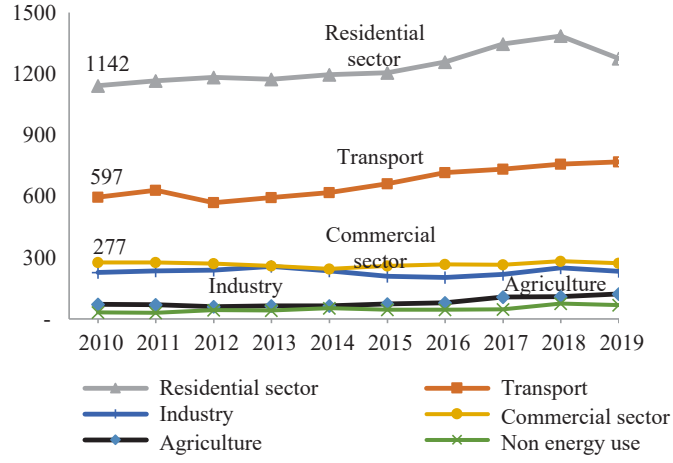


Fig. 12. Final Energy Consumption by sectors, ktep

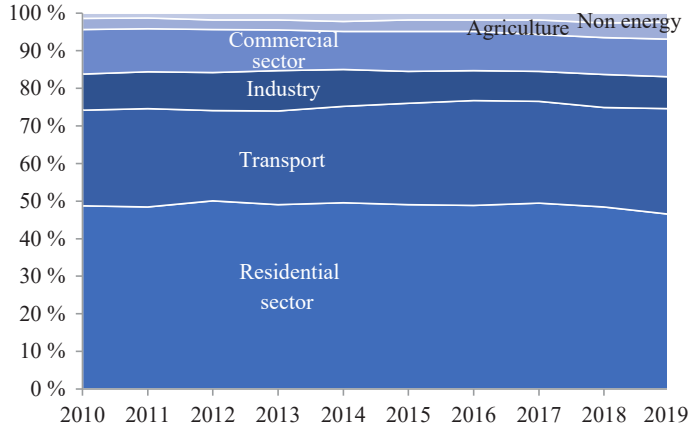


Fig. 12a. Final Energy Consumption by sectors, %

for residential sector – an increase from 1 142 (2010) to 1 296 (2020) ktep;
for transport sector – an increase from 597 (2010) to 681 (2020);
for commercial – a decrease from 277 (2010) to 254 (2020).

The residential sector has a 50 per cent share in the total final energy consumption, while transport and industry sector taken together account for 30 per cent.

The share of agriculture, non-energy and commercial sectors in the structure of total final energy consumption is relatively small (Fig. 12a).

Methodology of short-term forecasts of fuel consumption. Main approaches. The National Bureau of Statistics draws up annual energy balances based on actual data. Forecasts of fuel consumption for 1–2 years ahead are built on its basis.

The energy balance (EB) can be analyzed both in the form of a table and in the form of a flow diagram, which allows to visualize and simplify the perception of the of fuel flows by sectors of the economy. The structure of the energy balance is shown in fig. 13.

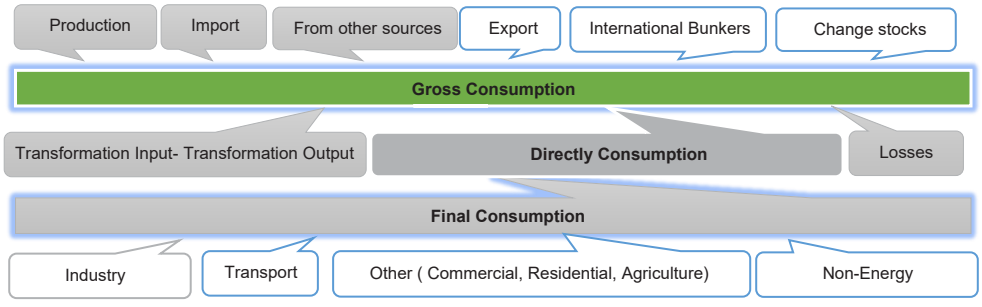


Fig. 13. Energy balance structure and fuel flows

The general formula includes the calculation of Gross Consumption using two formulas:

for the top part of the balance (top to bottom):

Gross Consumption = *Production* + *Import* + *From other sources* – – *Export* – *International Bunkers* – *Change stocks*

for the second part of the balance (from bottom to top):

Gross Consumption = *Final Consumption* + + *(Transformation Input-Transformation Output)* + *Losses*.

Time series of values by years (7–8 years) are used to build forecasts, for extrapolation method is recommended INOGATE project (section TA-ESS) on harmonizing with European standards [3]. But other methods can also be used and two approaches are used in the work:

extrapolation coefficients – when taking into account fuels in the annual context;

neural network analysis – when taking into account fuel consumption by months.

Features and results of both methods are described below.

Methodology for calculating short-term forecasts of fuel accounting by years. Calculations of values for 2 forecast years, taking into account fuels by years, are carried out using the formula of extrapolation coefficients CAGR (Compound Annual Growth Rate) for time-sheet series of values with active dynamics:

$$CAGR = \left[\frac{V}{V_0} \left[\frac{1}{(t - t_0)} \right] \right] - 1, \quad (1)$$

where: V – the final value of the indicator; V_0 – initial value of the indicator; t – final year; t_0 – initial year.

This approach also uses two additional coefficients LKV and LKS.

LKV – "last known value" – is used for series with small values (1–2 ktep). LKS – "last known consumption pattern" (for example, for industry) – is used if CAGR is applied to the sector 'total' and it is necessary to determine the values by every branch.

The forecast is performed for each line separately and for each part of the balance (top: from top to bottom, bottom: from bottom to top). At the same time, for both parts of the balance, the values of the final Gross consumption are determined, the values in which must match. The balancing line is the position of Imports or Production of fuels.

The predicted values for the 1st approach (taking into account fuels by years) or the top part of the energy balance are given in the table 1.

Table 1. **Forecast of Gross consumption and first 7 rows (upper part) of the energy balance for 2022, ktep**

Total products-2022	Coal	Natural gas	Oil products	Biofuels and waste	Electricity	Heat	Total
Primary Production	–	–	5	688	8	–	**701**
From other sources	–	–	–	–	293	–	**293**
Imports	74	866	1009	2	14	–	**1965**
Exports	–	–	20	–	–	–	**20**
International bunkers	–	–	–	–	–	–	–
Stock changes	–	–	–	–	–	–	–
Gross consumption	**74**	**866**	**994**	**690**	**315**	**–**	**2940**

The Gross consumption forecast is built on the basis of retrospective series of values for 2010–2020 and is illustrated in the fig. 14, and Final consumption – in the fig. 15. There was a decline in Gross consumption from 3 087 to 2 857 ktep in the period 2018–2020, but in 2022 a slight increase to 2940 ktep is expected. The situation is similar for *Final consumption*.

The described method was used to forecasts several times (6 cycles). The predicted values were annually compared with the actual consumption for all fuel groups when the next energy balance was issued, and discrepancies were determined.

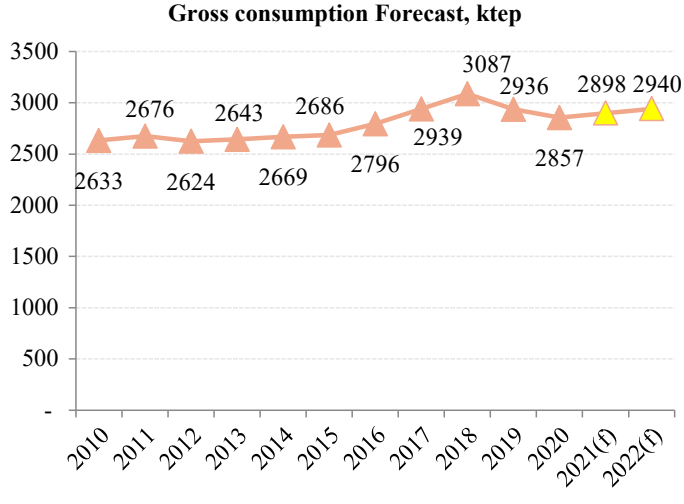


Fig. 14. Gross consumption forecast, ktep

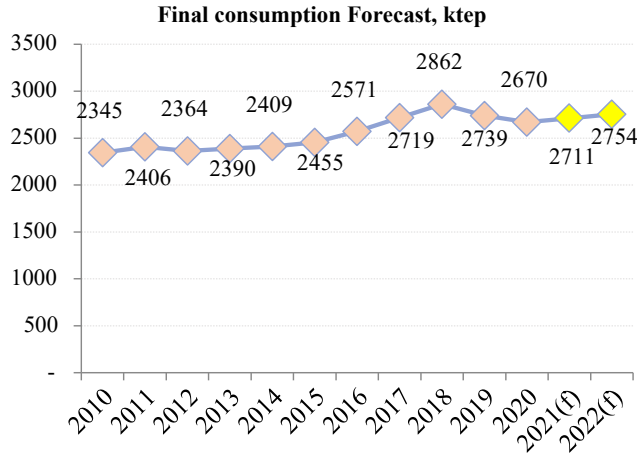


Fig. 15. Final consumption forecast, ktep

This allows to draw conclusions about the quality of forecasts and the applicability of the method. Such an analysis is carried out further in a separate section below.

In addition, attempts have been made to apply neural network modeling of fuel consumption in the country using monthly data.

Neural networks for short-term forecasting of the energy balance using monthly data. The methodology using extrapolation factors does not take into account seasonal fluctuations in fuel consumption, and the trend is usually a smooth function, most often a linear one.

Since 2015, the National Bureau of Statistics has been keeping records of consumed fuels by months with a delay of 2 months (from the current month) for the same EB lines, the dynamics of which were discussed above: Import-Export, Production, Gross consumption, Final Consumption for 4 groups of fuels (natural gas, oil products, coal and electricity).

Unfortunately, such accounting for biomass and heat energy is not presented, which are also usually included in the short-term forecast of the fuel and energy balance.

The experiments were carried out for Gross consumption of natural gas and oil products, as well as for Electricity generation and Electricity Gross consumption.

Data series for the interval from 2015–2021 (11 months) – 76 points and 2015–2022 (4 months) – 88 points were used. The forecast is built on 12 or 24 points ahead (1 or 2 years).

Experiment models were carried out in cycles with the simulation of 50 variants of models with the selection of 5 best ones under different specified conditions:

number of hidden layers (from 2 to 8);

types of *input* function (hyperbolic, logistic, identical);

types of *output* function (hyperbolic, logistic, identical).

Calculations are carried out until the best coincidence of the points of the modeling functions with the actual values for 12 control points is obtained. The network is considered satisfactory if the coincidence is 2,5 %.

Table 2. **Coincidence of the calculated points of the models with the actual values of the control sample**

Fuel	Coincidence of the calculated points of the models with the actual ones in the control sample 12 values	
	Range of values 76 points, %	Range of values 88 points, %
Gross consumption, Natural gas	6,98	13,68
Gross consumption, Oil products	5,62	5,8
Gross consumption, Electricity	2,4	5,13

For one function such a result has been obtained, but for other groups of fuels, such a match has not yet been achieved (Table 2).

The best modeling function and forecast of *natural gas* consumption for 2 years are shown in the fig. 16 (left).

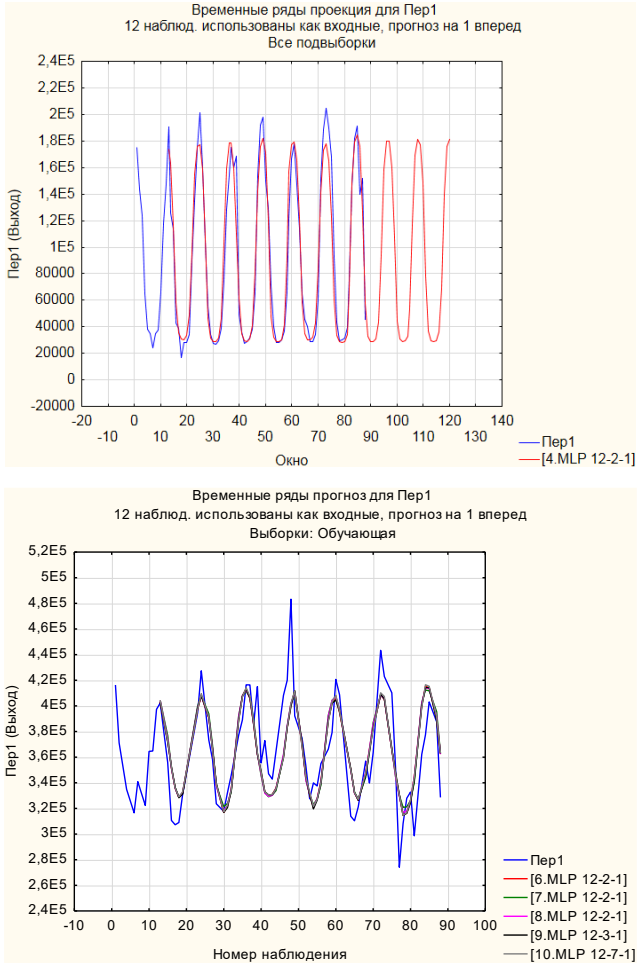


Fig. 16. Predictive neural network models for Gross consumption (on the left – natural gas; on the right – electricity)

The five best neural network models and *electricity* consumption forecasts are shown in the fig. 16 (right).

As can be seen from the table above, the best functions were obtained for the production of electricity, and for a time series of 76 points. Increasing the length of the series to 88 points did not lead to an improvement in the result. Experiments based on 88 points can be considered only as intermediate ones, and it is necessary to continue modeling.

Research results. *Comparison of predicted values of gas, oil products and electricity consumption by 2 methods*. For oil products, it is possible to compare the results of forecasts using 2 methods – extrapolation and neural networks, for which the best result was obtained for a series of 76 points (with a 5,62 % coincidence with the actual values), table 3.

Table 3. **Comparison of the predicted values of gas, oil products and electricity consumption by 2 methods**

Gross consumption oil production	Method 1-extrapolation	Method 2-neural network model
	ktep	ktep
2020	946 (fact)	972
2021	969 (forecast)	987
2022	994 (forecast)	996

Forecasts of Gross consumption of *oil products* for 2022 by both methods have similar values (994 and 996 ktep). This allows us to draw conclusions about the applicability of both methodological approaches for further similar experiments.

Forecast quality analysis for 6 working cycles. Predicted values of fuel consumption for each year compared with the actual ones and the discrepancies for each group of fuels were presented in Table 4.

Table 4. **Discrepancies between the predicted and actual values by fuel groups for 6 completed cycles**

	Circle 6 (2021–2022)	Circle 5 (2020–2021)	Circle 4 (2019–2020)	Circle 3 (2018–2019)	Circle 2 (2017–2018)	Circle 1 (2016–2017)
Coal	–20,70 %	+16,3 %	–	–	–	–
Natural gas	–2,2 %	–6,3 %	–9,99 %	1,95 %	5,4 %	–
Oil products	–8,9 %	–2,1 %	–3,39 %	3,01 %	6,3 %	–
Biofuels	–0,2 %	–20,5 %	2,54 %	3,68 %	–	–
Electricity	–5,9 %	–1,6 %	0	–0,67 %	–1,0 %	–

Symbol: «–» – a greater value was predicted than the actual fact (overestimated); «+» – a lower value was predicted than the fact turned out (underestimated).

Forecasts of *coal* consumption have the largest discrepancy with the actual data. For several cycles, it was not possible to make a comparison at all, since the energy

balance publications contained recalculations for previous years, as well as jumps in time series.

Natural gas consumption forecasts differ from actual values by 2 % in 2 cycles; at the level of 5–6 % – in 2 cycles; at the level of 10 % – in 1 cycle.

Consumption of *oil products* has a discrepancy with the actual values at the level of 3 % in 3 cycles; at the level of 6 % – in 2 cycles; at the level of 9 % – in 1 cycle.

Biomass has a discrepancy at the level of 3 % in 3 cycles; at the level of 20 % – in 1 cycle.

Electricity best matched the forecast and the fact. Full match is in 1 cycle, discrepancy within 0,6–2 % is in 3 cycles; at the level of 3–6 % is in 1 cycle;

Heating has a discrepancy at the level of 0–3 % in 2 cycles; at the level of 6 % is in 2 cycles; at the level of 9 % is in 1 cycle.

If we consider all the values in the table 4, then can be noted the following: full "hit" –1 time; match at 0–1 % – 3 times, 1,01–3 % –6 times, match at 3.01–6 % – 6 times, match at 6,01–7 %, –3 times, match at level of 7,01–10 % – 3 times, the maximum discrepancy (16–20 %) occurred 3 times. There are 8 "overestimated" values, and the rest are "underestimated".

For each group of fuels, conclusions can be drawn about the quality of the forecast, and, accordingly, about the adequacy of the forecasting method used. In particular, it can be noted the necessary to use other methodological approaches to coal forecasts.

Conclusions. Short-term forecasts of fuel consumption in the form of special annual documents based on a proven European methodology have been prepared in Moldova for the last 7 years. This made it possible to perform an analysis of the quality of forecasts of energy balances for 6 cycles.

The dynamics of fuel flows for 4 groups of fuels and a 10-year time series has a general growth trend, and for 2 groups (coal and heat) a decreasing trend.

Two methods were used to forecasts: extrapolation (European methodology) based on accounting for fuels by years and neural network analysis based on accounting for fuels by months.

Neural network analysis was considered for two variants of time series (76 and 88 points) for 3 indicators – natural gas, oil products, electricity (Gross consumption). More adequate results were obtained for a time series of 76 points. A comparison is made of the forecasts obtained by 2 methods for oil products.

Comparisons are also made of the actual values of the energy balances of the current year with those predicted in the previous cycle to generalize conclusions on the adequacy of the applied methodology. It is shown that satisfactory results were obtained for 5 groups of fuels, and unsatisfactory for coal.

The analysis carried out is important for the further development of works in the country, and may also be useful to scientists of similar works in other countries.

References

1. Harmonisation of electricity standards : Project INOGATE, 01.09.2009–31.03.2011 [Electronic resource] // INOGATE. – Mode of access: http://www.inogate.org/projects?collection=2009_2014&lang=ru&order=date_start_desc. – Date of access : 15.05.2022.

2. World Energy Outlook 2018 [Electronic resource] // International Energy Agency. – Mode of access: www.iea.org. – Date of access : 17.05.2022.

3. ITS Technical Assistance to Molodova in the field of Energy Statistics in the extension period Feb. 2015 – Jan. 2016 [Electronic resource] // INOGATE. – Mode of access: http://www.inogate.org/countries/7?lang=en&section=activities #activities. – Date of access : 20.06.2022.

4. Balanța Energetică a Republicii Moldova 2020. Culegere statistică [Electronic resource] // Biroul Național de Statistică al Republicii Moldova. – 2021. – 63 p. – Mode of access: https://statistica.gov.md/public/files/publicatii_electronice/balanta_energetica/Balanta_energetica_2020_ro.pdf. – Date of access : 15.06.2022.

5. Perspective energy balance of the Republic of Moldova for 2021 [Electronic resource] // Guvernatorul Republicii Moldova Ministerul Economiei. – Mode of access: https://me.gov.md/ro/documents-terms/energetic %C4 %83-rapoarte. – Date of access : 06.10.2022.

6. Perspective energy balance of the Republic of Moldova for 2020 [Electronic resource] // Guvernatorul Republicii Moldova Ministerul Economiei. – Mode of access: https://me.gov.md/ro/documents-terms/energetic%C4%83-rapoarte. – Date of access : 06.10.2022.

7. Perspective energy balance of the Republic of Moldova for 2019 [Electronic resource] // Guvernatorul Republicii Moldova Ministerul Economiei. – Mode of access: https://me.gov.md/ro/documents-terms/energetic%C4%83-rapoarte. – Date of access : 06.10.2022.

8. Podolets, R. Z. Energy balance of Ukraine: modeling and forecasting / R. Z. Podolets. – Kiev : In-t econ. that forecasting, 2007. – 174 p.

9. Proposals for the development of a methodology for the formation of a medium-term forecast of demand for electricity, taking into account the dynamics of the development of the economy of the country and regions of Russia / A. Makarov [et al.] // Professional Journal. – 2013 – Vol. 5 (110). – P. 33–39.

10. Kononov, Yu. D. A phased approach to improving the validity of long-term forecasts for the development of the fuel and energy complex and to assessing strategic threats [Electronic resource] / Yu. D. Kononov // Proceedings of the Academy of Sciences. Energy. – 2014. – № 2. – Mode of access: http://naukarus.com/poetapnyy-podhod-k-povysheniyu-obosnovannosti-dolgosrochnyh-prognozov-razvitiya-tek-i-k-otsenke-strategicheskih-ugroz-. – Date of access : 1.06.2022.

11. Evolution of world energy markets and its consequences for Russia / N. A. Arhipov [et al.] ; ed. A. A. Makarova, L. M. Grigorieva, T. A. Mitrova. – M. : ERI RAN, 2015. – 400 p.

12. Шапот, Д. В. Опыт развития методологии и разработки управленческих моделей межотраслевого баланса / Д. В. Шапот, В. А. Малахов. – М. : МЭИ, 2018. – 176 с.

13. Bykova, E. V. Methodological approaches in the construction of short-term balances of the fuel and energy balance / E. V. Bykova, V. P. Berzan // Energy of Moldova – 2016. Regional aspects of development : proceedings of the 3rd Internat. conf., Chisinau, 29 Sept. – 1 Oct. 2016 / Energy In-te of the ASM. – Chisinau, 2016. – P. 18–27.

14. Bykova, E. V. Short-term outlook energy balance to the analysis of energy security / E. V. Bykova // International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2017. journals@begellhouse.com'>journals@begellhouse.com

15. Bykova, E. Short-Term Forecasts of Fuels Consumption in the Analysis of Energy Security / E. Bykova, V. Berzan, M. Grodetsky // proceedings 2017 Internat. Conf. on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN-2017). – Chisinau, 2017. – P. 557–561.

16. Bykova, E. V. Software development for building flowcharts of the fuel and energy balance and calculating energy security indicators / E. V. Bykova, V. P. Berzan, S. V. Burtsev // Sustainable development of the energy sector of the Republic of Belarus: state and prospects : Internat. scientific conf., Minsk, 1–2 Oct. 2020 : sat. dokl. / ed. T. G. Zorina. – Minsk : Belarus. Navuka, 2020. – P. 6–18.

17. Bykova, E. V. Application of neural networks to build short-term forecasts of energy security indicators / E. V. Bykova // Proceedings of the Energy Security Laboratory. – 2020. – № 11 (26). – P. 49–56.

УДК 621.313

Г. Р. Валеева[1], Ю. Н. Зацаринная[2]

ОРГАНИЗАЦИЯ РЕМОНТА ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ. ПРИНЦИПЫ ПЛАНИРОВАНИЯ

[1]Казанский государственный энергетический университет, Институт электроэнергетики и электротехники, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация
[2]Кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный энергетический университет, Институт электроэнергетики и электротехники, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Аннотация. Вопрос планирования ремонта оборудования на объектах электроэнергетики всегда остается актуальным, потому что техническое состояние оборудования обеспечивает надежность и бесперебойность снабжения потребителей. В настоящей работе описаны ключевые принципы скользящего планирования ремонта оборудования, а также приницы составления программ ремонтов.

Ключевые слова: ремонт, энергетическое оборудование, планирование ремонта, программа ремонтов, скользящее планирование ремонтов.

G. R. Valeeva[1], Y. N. Zatsarinnaya[2]

ORGANIZATION OF REPAIR OF ENERGY FACILITIES. PLANNING PRINCIPLES

[1]Kazan State Power Engineering University, Institute of Electricity and Electrical Engineering, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation
[2]Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Kazan State Power Engineering University, Institute of Electric Power and Electrical Engineering, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Annotation. The issue of planning equipment repairs at electric power facilities always remains relevant, because the technical condition of the equipment ensures the reliability and continuity of supply to consumers. This paper describes the key principles of rolling equipment repair planning, as well as the principles of drawing up repair programs.

Keywords: repair, power equipment, repair planning, repair program, rolling repair planning.

Введение. Под стоимостью владения оборудованием (новым и существующим) понимается совокупная величина затрат, необходимых для обеспечения требуемого функционала оборудования на всех этапах жизненного цикла.

Стоимость владения новым оборудованием включает объем инвестиционных вложений, расходную и рисковую составляющие эксплуатации за весь срок службы оборудования (от монтажа до утилизации).

Стоимость владения существующим оборудованием включает:

объем инвестиционных вложений за срок службы эксплуатации от момента проведения расчета до конца периода жизни актива;

расходную (эксплуатационные затраты) и рисковую составляющие эксплуатации оборудовании за прогнозируемый период (не учитываются прошлые затраты на эксплуатацию и обслуживание за период, предшествующий моменту проведения расчета) [1].

Результаты исследования и их обсуждение. Формирование программ технологических воздействий представляет собой процесс определения состава и сроков технологических воздействий на оборудование.

При скользящем планировании производится регулярная ежегодная корректировка программ технологических воздействии различных горизонтов на основе данных об изменении состояния оборудования.

Необходимость применения «скользящего планирования» связана с отсутствием возможности точного долгосрочного прогнозирования внешних и внутренних факторов, оказывающих влияние на деятельность компаний.

Прогнозный период:

для определения срока замены оборудования и оценки экономической эффективности вариантов технологических воздействий прогнозный период составляет 30 лет;

для формирования программ технологических воздействий (инвестиционной и производственной программ): годовая программа – 1 год; среднесрочная программа – 6 лет; долгосрочная программа – 15 лет.

Организация ремонта оборудования требует выполнения следующих этапов [2, 3].

Этап 1. Описание активов. На данном этапе осуществляется формирование классификаторов и справочников активов.

Этап 2. Анализ и оценка текущего технического состояния оборудования. На данном этапе производится оценка технического состояния каждой единицы оборудования электростанции и его конструктивных элементов, что выражается в определении текущего индекса технического состояния. Результаты этапа используются для прогнозирования вероятности отказа и определения остаточного ресурса оборудования.

Этап 3. Прогнозирование вероятности отказа оборудования и остаточного ресурса. На данном этапе производится прогнозирование вероятности отказа и определение остаточного ресурса каждой единицы оборудования электростанции и его конструктивных элементов. Результаты этапа используются при оценке текущего и прогнозного уровня рисков.

Этап 4. Оценка последствий от отказов оборудования. На данном этапе осуществляется финансово-экономическая оценка влияния отказа оборудования на деятельность компании, что выражается в определении величины денежного ущерба, который возникает в случае отказа конкретного оборудования и его конструктивных элементов. Результаты этапа используются при оценке текущего уровня рисков каждой единицы оборудования.

Этап 5. Оценка текущего уровня рисков. На данном этапе производится оценка текущего уровня рисков, для каждой единицы оборудования электро-

станций. Результаты этапа используются при планировании состава технологических воздействий и формировании программ воздействий.

Этап 6. Определение состава воздействий. На данном этапе проводится моделирование сценариев технологических воздействий, технико-экономический анализ и выбор оптимального сценария воздействий на каждую единицу оборудования и энергоблок в целом. Результаты этапа используются как исходная база при формировании программ технологических воздействий.

Этап 7. Формирование программ технологических воздействий. На данном этапе осуществляется планирование программ технологических воздействий на оборудование, а также их ранжирование и приоритезация в соответствии с возникающими технологическими, финансовыми и прочими ограничениями и требованиями.

Список использованных источников

1. Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики [Электронный ресурс] : приказ М-ва энергетики Рос. Федерации, 25 окт. 2017 г., № 1013 // Информационно-правовой портал Гарант. – Режим доступа : https://base.garant.ru/71907490/. – Дата доступа : 07.05.2022.

2. Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей [Электронный ресурс] : приказ М-ва энергетики Рос. Федерации, 26 июл. 2017 г., № 676 // Информационно-правовой портал Гарант. – Режим доступа : https://base.garant.ru/71779722/. – Дата доступа : 07.05.2022.

3. Uncertainty and risk in global automotive [Electronic resource] // Thomsonreuters. – Mode of access : https://www.thomsonreuters.com/content/dam/ewp-m/documents/thomsonreuters/en/pdf/reports/global-automotive-industry-report-thomson-reuters.pdf. – Date of access : 07.05.2022.

References

1. Pravila organizacii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta ob»ektov elektroenergetiki [Electronic resource] : prikaz M-va energetiki Ros. Federacii, 25 okt. 2017 g., № 1013 // Informacionno-pravovoj portal Garant. – Mode of access : https://base.garant.ru/71907490. – Date of access : 07.05.2022.

2. Metodika ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya osnovnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya i linij elektroperedachi elektricheskih stancij i elektricheskih setej [Electronic resource] : prikaz M-va energetiki Ros. Federacii, 26 iyul. 2017 g., № 676 // Informacionno-pravovoj portal Garant. – Mode of access : https://base.garant.ru/71779722. – Date of access : 07.05.2022.

3. Uncertainty and risk in global automotive [Electronic resource] // Thomsonreuters. – Mode of access : https://www.thomsonreuters.com/content/dam/ewp-m/documents/thomsonreuters/en/pdf/reports/global-automotive-industry-report-thomson-reuters.pdf. – Date of access : 07.05.2022.

УДК 621.31

И. Р. Камалов

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ОБРЫВА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Казанский государственный энергетический университет,
Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Аннотация. Нередко под влиянием природных или технических факторов на воздушных линиях (ВЛ) электропередачи возникают различного рода повреждения, что приводит к выходу линии из строя. Аварийные ситуации могут повлечь за собой нарушение электроснабжения, недоотпуск энергии, а также уменьшение качества и надежности электроснабжения, что чревато большими экономическими потерями.

Соответственно, максимально быстрое определение места повреждения (ОМП) ВЛ и проведение ремонтных работ являются одними из важнейших задач ремонтных служб предприятий электросетей. В данной статье рассмотрены актуальные методы ОМП.

Ключевые слова: ОМП, методы ОМП, аварийный режим ЛЭП.

I. R. Kamalov

METHODS FOR DETERMINATION OF OPEN AND SHORT CIRCUIT POINTS ON OVERHEAD POWER LINES

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

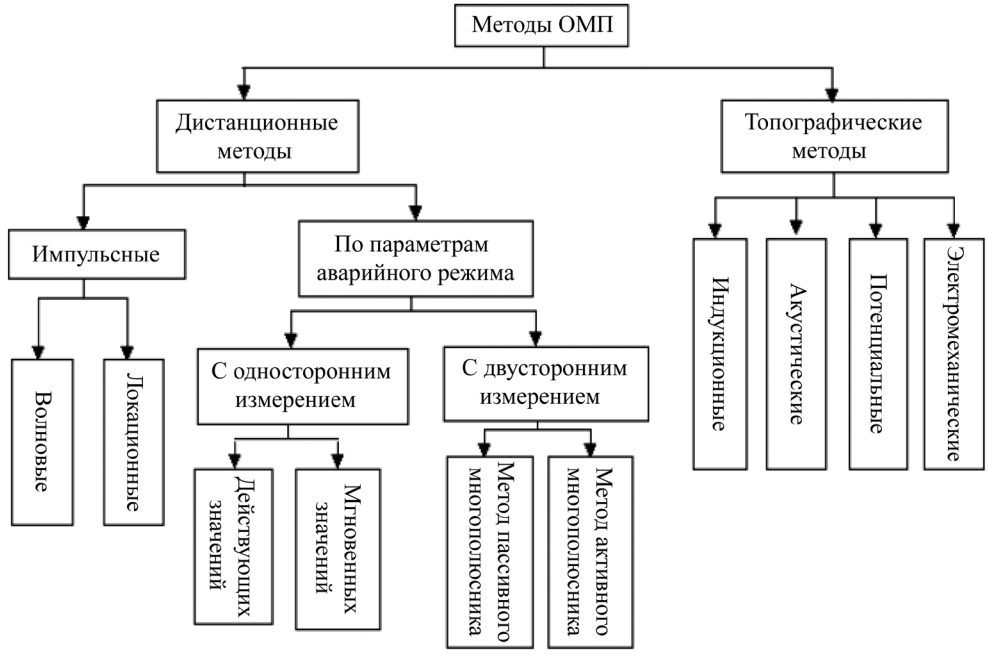
Annotation. Often, under the influence of natural or technical factors, various types of damage occur on overhead lines (VL) of power transmission, which leads to the failure of the line. Emergencies can lead to disruption of power supply, undersupply of energy, as well as a decrease in the quality and reliability of power supply, which is fraught with large economic losses.

Accordingly, the most rapid determination of the fault location (DFL) of overhead lines and the implementation of repair work are among the most important tasks of the repair services of power grid enterprises. This article discusses the actual methods of MFD.

Keywords: MFD, methods of MFD, emergency mode of power transmission lines.

Введение. Сбои ЛЭП могут стать причиной нарушения работы энергетической системы, тем самым снижая качество электроэнергии и увеличивая объем ее потерь. Для возврата к обычному режиму необходимо в кратчайшие сроки провести ремонтные работы по восстановлению ВЛ; 75 % времени восстановления поврежденной линии уходит на локализацию поврежденного места [1].

Материалы и методы исследования. Можно выделить два основных класса методов ОМП: дистанционные и топографические. Первая группа методов основана на определении расстояния от начала линии ВЛ (или концов поврежденной линии) до МП. Средства для дистанционного ОМП устанавливаются на подстанции. При ОМП топографическими методами используются переносные приборы, которые позволяют точно локализовать МП на трассе воздушной линии. При возникновении аварии необходимо производить осмотр всей воз-



Классификация методов ОМП по принципу действия

душной линии. Это главный недостаток применения топографических методов. Топографические методы наиболее точные, но очень затратные по времени в отличие от дистанционных.

Разделение методов по принципу действия представлено на рисунке.

Можно выделить два основных вида дистанционных методов: методы ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР) и импульсные методы. В свою очередь, импульсные методы делятся на локационные и волновые:

локационный метод. В ВЛ посылается зондирующий электрический импульс и фиксируется время между его посылкой и моментом достижения начала ВЛ отраженного от МП импульса;

волновые методы основываются на замерах времени достижения концов линии электромагнитными волнами, исходящими из МП.

Импульсные методы отличаются наибольшей точностью, но имеют определенные недостатки, такие как необходимость больших денежных вложений и малая эффективность на неоднородных линиях из-за «паразитных» отражений импульсов.

Методы ОМП по ПАР получили большее распространение, так как их применение целесообразнее с экономической точки зрения, что обусловлено возможностью использования алгоритмов и аппаратуры, применяемых для реализации устройств релейной защиты и автоматики электросетей [2]. Данные методы применяются в сетях с глухозаземленной нейтралью и основываются на фиксации параметров ВЛ в аварийном режиме.

Методы ОМП по ПАР подразделяются на односторонние и двусторонние. Односторонние методы фиксируют сопротивление участка воздушной линии, пропорциональное расстоянию до МП, а также параметры ВЛ на одном конце линии. Двусторонние методы фиксируют параметры ВЛ по обоим концам линии. Расстояние до МП рассчитывается по аналитической формуле на основе уравнений теории цепей [3].

Из топографических методов будут рассмотрены только индукционные и электромеханические, так как остальные применяются для ОМП кабельных линий. Индукционные методы используют специальные приборы для фиксации изменений магнитного поля рядом с МП. При применении электромеханических методов фиксируются создаваемые энергией тока КЗ механические усилия (электродинамические или электромагнитные). Приборы для реализации электромеханических методов ОМП устанавливаются на опорах ВЛ и в распределительных устройствах [4, 5, 6].

Заключение. Таким образом, в данной статье были кратко рассмотрены принципы применения наиболее актуальных на сегодняшний день методов определения мест повреждения воздушных линий электропередачи, а также их основные преимущества и недостатки.

Список использованных источников

1. Арцишевский, Я. Л. Определение мест повреждения линий электропередачи в сетях с заземленной нейтралью : учеб. пособие / Я. Л. Арцишевский. – М. : Высш. шк., 1988. – 94 с.

2. Малый, А. С. Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима / А. С. Малый, Г. М. Шалыт, А. И. Айзенфельд. – М. : Энергия, 1972. – 216 с.

3. Шалыт, Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях / Г. М. Шалыт. – М. : Энергоиздат, 1982. –312 с.

4. Айзенфелъд, А. И. Методы определения мест короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи при помощи, фиксирующих приборов / А. И. Айзенфельд. – М. : Энергия, 2014. – 98 с.

5. Аржанников, Е. А. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Е. А. Аржанников, В. Ю. Лукоянов, М. Ш. Мисриханов ; под ред. В. А. Шуина. – М. : Энергоатомиздат, 2013. – 272 с.

6. Секретарев, Ю. А. Оценка влияния на надежность системы электроснабжения различного рода дефектов ее основных элементов / Ю. А. Секретарев, В. М. Левин // Вестн. Казан. Гос. энергет. ун-та. – 2019. – Т. 11, № 4 (44). – С. 55–63.

References

1. Arcishevskij, Ya. L. Opredelenie mest povrezhdeniya linij elektroperedachi v setyah s zazemlennoj nejtral’yu : ucheb. posobie / Ya. L. Arcishevskij. – M. : Vyssh. shk., 1988. – 94 s.

2. Malyj, A. S. Opredelenie mest povrezhdeniya linij elektroperedachi po parametram avarijnogo rezhima / A. S. Malyj, G. M. Shalyt, A. I. Ajzenfel’d. – M. : Energiya, 1972. – 216 s.

3. Shalyt, G. M. Opredelenie mest povrezhdeniya v elektricheskih setyah / G. M. Shalyt. – M. : Energoizdat, 1982. –312 s.

4. Ajzenfel”d, A. I. Metody opredeleniya mest korotkogo zamykaniya na vozdushnyh liniyah elektroperedachi pri pomoshchi, fiksiruyushchih priborov / A. I. Ajzenfel’d. – M. : Energiya, 2014. – 98 s.

5. Arzhannikov, E. A. Opredelenie mesta korotkogo zamykaniya na vysokovol'tnyh liniyah elektroperedachi / E. A. Arzhannikov, V. Yu. Lukoyanov, M. Sh. Misrihanov ; pod red. V. A. Shuina. – M. : Energoatomizdat, 2013. – 272 s.
6. Sekretarev, Yu. A. Ocenka vliyaniya na nadezhnost' sistemy elektrosnabzheniya razlichnogo roda defektov ee osnovnyh elementov / Yu. A. Sekretarev, V. M. Levin // Vestn. Kazan. gos. energet. un-ta. – 2019. – T. 11, № 4(44). – S. 55–63.

УДК 621.039.564

И. Р. Камалов

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ – МОНИТОРИНГ ПОДСТАНЦИЙ И ДРУГИХ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрено контрольно-измерительное оборудование понижающих подстанций, в частности, цифровое оборудование, которое способно работать без участия человека и контролировать режимы работы всего электрооборудования на трансформаторных подстанциях.

Ключевые слова: цифровое оборудование, автоматизация работы, интеллектуальное устройство.

I. R. Kamalov

CONTROL AND MEASURING EQUIPMENT – MONITORING OF SUBSTATIONS AND OTHER POWER FACILITIES

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Annotation. Considers the control and measuring equipment of step-down substations, in particular, digital equipment that can operate without human intervention and control the operating modes of all electrical equipment at transformer substations.

Keywords: digital equipment, automation of work, intelligent device.

Введение. В связи с активной цифровизацией в области электроэнергетики внедряются электронные устройства, позволяющие осуществлять мониторинг всех параметров любого оборудования как на объекте генерации и потребителе, так и на энергетической системе. Данные устройства могут предоставить большое количество необходимой информации об износе электрооборудования и рентабельности объекта [1–2].

Результаты исследования и их обсуждение. Интеграция таких устройств позволит автоматизировать работу повышающих и понижающих подстанций. Внедрение единого программного обеспечения для автоматизации в системы подстанций позволяет получить доступ ко всей информации о любом устройстве, а также имеет ряд преимуществ перед традиционными средствами управления [3]:

структуризация всего контрольно-измерительного комплекса, позволяющая объединить как технологическое, так и электрическое управление в одну экосистему;

полный доступ ко всем показаниям электроустановки. Используя данный принцип можно управлять электроэнергетической системой с любого рабочего места в зависимости от закрепленных прав у пользователя (должности работника);

единый пользовательский интерфейс. Одинаковая системная среда позволяет ускорять процессы аварийно-восстановительных работ и проводить ручной мониторинг или диагностику оборудования, а также улучшить качество и удобство работы;

запись и архивирование данных. Единая программная среда позволяет создать и собрать сервер для сбора всех данных в одном цифровом формате, позволяющем унифицировать и использовать изолированную площадку для проведения анализа процессов и сдачи отчетности;

формирование собственной методической и учебной системы для подготовки кадров. Обслуживающему персоналу проще работать на одном обеспечении, следственно качество и скорость работы возрастает [4–5];

безопасность системы. Наличие единой системы может обеспечить наиболее эффективную защиту оборудования от различных кибератак и прочего вредоносного программного обеспечения;

систематизированная и автоматическая передача данных в реальном времени на сервер;

удаленное соединение с диспетчерскими управлениями и частичное управление оборудованием;

Заключение. Сведение к одной системе управления сэкономит значительные усилия по внедрению такого программного комплекса и обслуживанию электроэнергетических систем и сетей [6–8].

К сожалению, реализация такого проекта занимает много времени и требует много средств для его успешной реализации и интеграции на платформы энергетических сетей. Обмен данными между разными инструментами сложен.

Список использованных источников

1. Adamiak, M. IEC 61850 Communication networks and systems in substations / M. Adamiak, R. Mackiewicz // Protection and control log. – 2009. – Ed. 8th. – P. 61–68.

2. Brand, K.-P. Maximizing the user benefits of IEC 61850 / K.-P. Brand, P. Reinhardt, I. De Mesmaeker // PRAXIS Profiline. – 2005. – P. 48–50.

3. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния электротехнического оборудования / М. Ф. Низамиев [и др.] // Электрика. – 2015. – № 6. – С. 18–25.

4. Актуальные подходы к организации образовательного процесса для подготовки специалистов энергетических систем и комплексов / Р. Р. Хуснутдинов [и др.] // Вест. Казанского гос. энергет. ун-та. – 2017. – № 3 (35). – С. 153–160.

5. Попов, С. А. Delphi и 1С: Предприятие. Программирование информационного обмена / С. А. Попов. – М. : БХВ ; Пб., 2007. – 592 с.

6. Профессиональная разработка в системе 1С: Предприятие 8 / А. Габец [и др.]. – М. : 1С-Паблишинг, 2006. – 704 с.

7. IED 670 Getting started Guide, 1MRK 500 078-SEN [Electronic resource] // ABB. – Mode of access : https://library.e.abb.com/public/37cc3658aa6c2cb3c12576ff0070719d/3BUS095133_en_Process_and_Substation_Integration_White_Paper.pdf. – Date of access : 12.03.2022.

8. Исследование работоспособности и качества функционирования трансформаторного оборудования электротехнических систем / А. Р. Денисова [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 23–35.

References

1. Adamiak, M. IEC 61850 Communication networks and systems in substations / M. Adamiak, R. Mackiewicz // Protection and control log. – 2009. – 8th ed. – P. 61–68.

2. Brand, K.-P. Maximizing the user benefits of IEC 61850 / K.-P. Brand, P. Reinhardt, I. De Mesmaeker // PRAXIS Profiline. – 2005. – P. 48–50.

3. Izmeritel'no-diagnosticheskij kompleks dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya elektrotekhnicheskogo oborudovaniya / M. F. Nizamiev [et al.] // Elektrika. – 2015. – № 6. – S. 18–25.

4. Aktual'nye podhody k organizacii obrazovatel'nogo processa dlya podgotovki specialistov energeticheskih sistem i kompleksov / R. R. Husnutdinov [et al.] // Vest. Kazan. gos. energet. un-ta. – 2017. – № 3 (35). – S. 153–160.

5. Popov, S. A. Delphi i 1S: Predpriyatie. Programmirovanie informacionnogo obmena / S. A. Popov. – M. : BHV ; Pb., 2007. – 592 s.

6. Professional'naya razrabotka v sisteme 1S: Predpriyatie 8 / A. Gabec [et al.]. – M. : 1S-Pablishing, 2006. – 704 s.

7. IED 670 Getting started Guide, 1MRK 500 078-SEN [Electronic resource] // ABB. – Mode of access : https://library.e.abb.com/public/37cc3658aa6c2cb3c12576ff0070719d/3BUS095133_en_Process_and_Substation_Integration_White_Paper.pdf. – Date of access : 12.03.2022.

8. Issledovanie rabotosposobnosti i kachestva funkcionirovaniya transformatornogo oborudovaniya elektrotekhnicheskih sistem / A. R. Denisova [et al.] // Izv. vyssh. ucheb. zavedenij. Problemy energetiki. – 2020. – T. 22, № 3. – S. 23–35.

УДК 502.3:621.31.005.412(476)

Л. Л. Полещук, В. Н. Шевченок

«ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ» ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ КАК ВЕКТОР СИСТЕМНОЙ ПОЛИТИКИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Департамент по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассматриваются важнейшие направления развития энергетического сектора Республики Беларусь. Поэтапное преобразование национальной экономики, основанное на внедрении принципов «зеленой» экономики и достижении целей устойчивого развития, позволят обеспечить энергетическую безопасность и надежность энергоснабжения отраслей экономики и населения.

Ключевые слова: энергоэффективность, инновационные технологии, экология, устойчивое развитие энергетики, энергетическая безопасность, надежность энергоснабжения.

L. L. Poleshchuk, V. N. Shevchenok

«INTELLIGENT» ENERGY EFFICIENCY AS A VECTOR OF THE SYSTEM POLICY OF ENERGY SAVING

Department of the State Committee for Standardization of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The article discusses the most important directions of development of the energy sector of the Republic of Belarus. The gradual transformation of the national economy, based on the introduction of the principles of a green economy and the achievement of sustainable development goals, will ensure energy security and reliability of energy supply to sectors of the economy and the population.

Keywords: energy efficiency, innovative technologies, ecology, sustainable energy development, energy security, energy supply reliability.

Введение. Наряду с вопросами энерго- и ресурсосбережения в Республике Беларусь особую важность приобретают вопросы дальнейшей энергетической трансформации, направленной на создание устойчивой системы обеспечения энергоресурсами, продвижения современных и эффективных решений по интеграции различных видов энергии в энергосистему страны за счет широкомасштабного распространения современных инновационных технологий, систем и решений в различных секторах экономики.

Материалы и методы исследования. В новых экономических условиях энерго- и ресурсосбережение в различных отраслях экономики является значимой задачей. В целях обеспечения надежной работы национальной экономики необходимо продолжать рациональное использование традиционных энергоресурсов и расширять использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (ВИЭ), активнее разрабатывать «умные» сети, развивать на их базе автоматизацию управления технологическими процессами, а также использовать технологии аккумулирования тепловой и электрической энергии. Приоритеты устойчивого развития Республики Беларусь закреплены в Национальной стратегии устойчивого социально-экономического развития на период до 2030 года (НСУР-2030) [1]. При этом необходимо соблюдать баланс, с одной стороны, экономической выгоды, с другой – сохранения природной красоты родной Беларуси, ее биологического разнообразия, экологической чистоты.

С каждым годом тема создания «интеллектуальной» системы энергоэффективности в различных отраслях экономики становится все более актуальной.

Уже сегодня мы все становимся строителями новой цифровой реальности, которая является основой всех процессов будущего. В вопросах повышения энергоэффективности страна ориентирована на достижение уровня развитых стран и обеспечение конкурентоспособности отечественной продукции на мировых рынках. Беларусь последовательно шаг за шагом приближается к лучшим мировым стандартам по энергоемкости ВВП. Для достижения уровня раз-

витых стран по энергоемкости ВВП необходимо обеспечить объем экономии топливно-энергетических ресурсов (в период 2015–2030 гг.) не менее 1 млн т у. т. ежегодно [2].

Результаты исследования и их обсуждение. В настоящее время строятся современные энергоэффективные предприятия; при реконструкции и модернизации применяются наилучшие энергоэффективные технологии; из вырабатываемых в стране 67 млн Гкал тепла в год более трети (38,4 %) отпускается населению [3]. Благодаря государственной поддержке и развитию инвестиционной привлекательности использование ВИЭ в стране в 2022 г. составило 7,5 % в валовом потреблении топливно-энергетических ресурсов (свыше 600 МВт электрогенерирующих установок работает в стране с использованием возобновляемой энергии).

В 2021–2025 годах за счет реализации мероприятий, направленных на повышение энергетической эффективности и укрепление энергетической самостоятельности и безопасности государства, планируется добиться снижения энергоемкости не менее чем на 7 %, и выйти на уровень 330,5 кг у. т/млн руб. ВВП.

Отрадно отметить, что в последнее время рост ВВП страны обеспечивается не только со значительной экономией ТЭР, но и с уменьшением их потребления за счет применения «умных» энергоэффективных технологий.

Современная политика энергосбережения Республики Беларусь в дальнейшем будет строиться на развитии «интеллектуальной» энергоэффективности во всех отраслях экономики.

Например, при строительстве комбинированных котельных на биотопливе и природном газе будут применяться современные технологии по производству тепловой энергии на базе «умных решений». Внедряемое энерготехнологическое оборудование (конденсационные котлы и экономайзеры) соответствует требованиям энергоэффективности и оснащается автоматизированной системой регулирования и контроля процесса производства тепловой энергии, в том числе с учетом изменения температуры наружного воздуха. Процессы управления оборудованием котельной, где это возможно, будут осуществляться без присутствия человека.

Наряду со строительством современных котельных проводится оптимизация систем теплоснабжения с модернизацией тепловых сетей, реконструкцией центральных и строительством новых индивидуальных тепловых пунктов, а также внедрением поквартирного регулирования потребления тепловой энергии и эффективного учета.

Общая площадь жилищного сектора 254,4 млн м^2, в том числе многоквартирный жилищный фонд – 178,0 млн м^2 (70 %). В существующей структуре жилищного фонда 90 % многоквартирных домов, построенных до 1996 г., не являются энергоэффективными, 16 % зданий многоквартирного жилищного фонда потребляют на отопление в среднем 161–200 кВт·ч/м^2 в год. Всего

9 % зданий потребляют менее 90 кВт·ч/м^2 в год [4]. В рамках проводимой социальной политики население оплачивает порядка 20 % себестоимости тепловой энергии

До конца 2025 г. планируется ввести в эксплуатацию 91 теплоисточник, работающий на древесном топливе, суммарной тепловой мощностью 540 МВт, что позволит заместить использование импортируемого природного газа на 145 тыс. т у. т., сократить потребление природного газа на 126 млн м^3, выбросы парниковых газов на 232 тыс. т CO_2.

В сфере жилищно-коммунального хозяйства автоматизация и удаленное регулирование процессов теплоснабжения и водоснабжения, контроль основных параметров на входе и выходе давно стали привычными процессами. Работы по тепловой модернизации таких многоквартирных жилых домов экономически целесообразно осуществлять в процессе проведения их планового капитального ремонта, основной задачей которого должно стать доведение параметров удельного теплопотребления каждого жилого многоквартирного дома до уровня не выше 90 кВт·ч/м^2 в год [5].

Создание качественно новой информационной системы расчетов населения за жилищно-коммунальные и другие услуги, единство и унификация систем и программного обеспечения банков и производителей услуг, хранение банка данных, повышение качества обслуживания населения на базе единой информационной системы АИС «Расчет-ЖКУ» позволили повысить уровень бережливого отношения граждан к потребляемым ресурсам.

Электротранспорт и зарядная инфраструктура – один из векторов стратегического развития страны и эффективной загрузки БелАЭС. С целью стимулирования покупки электромобилей 10 ноября 2018 г. была принята Программа создания государственной зарядной сети для зарядки электромобилей (далее – Программа) [6]. Цель Программы – создание в Республике Беларусь развитой сети электрозарядных станций, соответствующей мировым стандартам (ЭЗС).

В Беларуси создана крупнейшая в странах ЕАЭС сеть быстрых зарядных станций для электромобилей (486 станций), обеспечивающая возможность беспрепятственного перемещения электромобилей по всей стране. На основных автомагистралях установлены также быстрозарядные станции, обеспечивающие зарядку аккумуляторной батареи на 100 км за 6 минут.

Интеллектуальная энергоэффективность в промышленности позволит обеспечить внедрение в производство современных энергоэффективных электротехнологий и модернизацию действующих производств, а также получить порядка 25 % экономии энергоресурсов от общей экономии ТЭР в целом по республике.

Уже сегодня на повестке дня обсуждаются следующие вопросы:

интеграция установок ВИЭ в энергетическую сеть за счет цифровизации, использование цифровых подстанций и виртуальных хранилищ мощности;

балансирование электроэнергетического рынка и «умной» зарядки электромобилей;

системное интегрированное управление спросом за счет дигитализации (оцифровки);

использование технологии «Блокчейн» для торговли электроэнергией в пределах одного дома, района, квартала;

построение «умных» сетей, домов, кварталов в городах, позволяющих рационально использовать не только энергетические ресурсы, но и утилизировать отходы;

использование технологий аккумулирования электрической энергии, позволяющих отделить генерацию от потребления и реализовать стратегии декарбонизации конечного потребителя;

внедрение технологий получения водорода из избыточной электроэнергии и ВИЭ, и обратно, из водорода энергии.

Проведенный в республике комплекс работ позволяет делать ставки и на увеличение доли возобновляемых источников энергии [7].

Заключение. Совокупность проводимой системной политики энергосбережения, основанной на Директиве Президента Республики Беларусь № 3 «О приоритетных направлениях укрепления экономической безопасности государства», Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь, Программе социально-экономического развития Беларуси на 2021–2025 годы, иных директивных документах, в основу которой положена «интеллектуальная» энергоэффективность, позволят комплексно и успешно решать задачи энергетической независимости и безопасности страны и повышать конкурентоспособность белорусской экономики.

Список использованных источников

1. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь до 2030 года // Эконом. бюл. НИЭИ М-ва экономики Респ. Беларусь. – 2015. – № 4. – С. 4–99.

2. Государственная программа «Энергосбережение» на 2016–2020 годы [Электронный ресурс] : в ред. постановления Совета Министров Респ. Беларусь, 31 дек. 2019 г., № 972 // Нац. центр правовой информации Респ. Беларусь. – Минск, 2019.

3. Малашенко, М. П. Главный принцип решения вопросов в области энергосбережения – экономическая выгода и целесообразность / М. П. Малашенко // Энергоэффективность. – 2016. – № 9. – С. 8–10.

4. О повышении энергоэффективности многоквартирного жилищного фонда : коммент. к проекту Указа Президента Респ. Беларусь // Энергоэффективность. Приложение. – 2018. – № 10. – С. 1–3.

5. Шевченок, В. Н. Возможности энергосбережения в сфере строительства огромны / В. Н. Шевченок // Энергоэффективность. – 2018. – № 6. – С. 3–4.

6. Об утверждении создания государственной зарядной сети для зарядки электромобилей : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 10 окт. 2018 г., № 731 // Энергетика и ТЭК. – 2018. – № 11/12. – С . 27–39.

7. Полещук, Л. Как в Беларуси используют энергию солнца, воды и ветра / Л. Полещук // Энергоэффективность. – 2019. – № 7. – С. 14–15.

References

1. Nacional'naya strategiya ustojchivogo social'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Belarus' do 2030 goda // Ekonom. byull. NIEI M-va ekonomiki Resp. Belarus'. – 2015. – № 4. – S. 4–99.

2. Gosudarstvennaya programma «Energosberezhenie» na 2016–2020 gody [Electronic resource] : v red. postanovleniya Soveta Ministrov Resp. Belarus', 31 dek. 2019 g., № 972 // Nac. centr pravovoj informacii Resp. Belarus'. – Minsk, 2019.

3. Malashenko, M. P. Glavnyj princip resheniya voprosov v oblasti energosberezheniya – ekonomicheskaya vygoda i celesoobraznost' / M. P. Malashenko // Energoeffektivnost'. – 2016. – № 9. – S. 8–10.

4. O povyshenii energoeffektivnosti mnogokvartirnogo zhilishchnogo fonda : komment. k proektu Ukaza Prezidenta Resp. Belarus' // Energoeffektivnost'. Prilozhenie. – 2018. – № 10. – S. 1–3.

5. Shevchenok, V. N. Vozmozhnosti energosberezheniya v sfere stroitel'stva ogromny / V. N. Shevchenok // Energoeffektivnost'. – 2018. – № 6. – S. 3–4.

6. Ob utverzhdenii sozdaniya gosudarstvennoj zaryadnoj seti dlya zaryadki elektromobilej : postanovlenie Soveta Ministrov Resp. Belarus', 10 okt. 2018 g., № 731 // Energetika i TEK. – 2018. – № 11/12. – S. 27–39.

7. Poleshchuk, L. Kak v Belarusi ispol'zuyut energiyu solnca, vody i vetra / L. Poleshchuk // Energoeffektivnost'. – 2019. – № 7. – S. 14–15.

УДК 504.03

А. Г. Айвазян[1], А. Р. Барсегян[2], В. С. Давтян[3]

О НЕКОТОРЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКАХ РАЗВИТИЯ МАЛОЙ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ В АРМЕНИИ

[1]Национальный политехнический университет Армении, Ереван, Республика Армения
[2]Кандидат технических наук, Инженерная академия Армении, Ереван, Республика Армения
[3]Доктор политических наук, профессор, Российско-Армянский университет, Ереван, Республика Армения

Аннотация. Рассмотрены некоторые экологические риски развития малой гидроэнергетики в Армении в условиях вызовов сохранения положительного энергетического баланса. Показан потенциал развития малой гидроэнергетики в Армении, представлены данные по водным ресурсам страны. На примере реки Карчахбюр выявлены такие риски развития малых гидроэлектростанций (МГЭС), как изменение русла реки и окружающего ландшафта, нарушение места обитания эндемичных видов рыб и т. д. Выявлено, что для полноценного развития малой гидроэнергетики необходимо прогнозировать экологические риски и выносить их на обсуждение как с ответственными государственными органами, так и с населением во избежание социальных рисков.

Ключевые слова: малая гидроэнергетика, Армения, экология, риски, реки.

A. G. Ayvazyan[1], A. R. Barseghyan[2], V. S. Davtyan[3]

ON SOME ENVIRONMENTAL RISKS OF SMALL HYDROPOWER DEVELOPMENT IN ARMENIA

[1]National Polytechnic University of Armenia, Yerevan, Republic of Armenia
[2]Ph. D. in Engineering Science, Engineering Academy of Armenia, Yerevan, Republic of Armenia
[3]Doctor of Political Science, Professor, Russian-Armenian University, Yerevan, Republic of Armenia

Annotation. Some environmental risks of the development of small hydropower in Armenia are considered in the conditions of the challenges of maintaining a positive energy balance. The potential for the development of small hydropower in Armenia is shown, and data on the country's water resources are presented. In the example of the Karchaghbyur River, such risks of the development of small hydroelectric power plants as a change in the riverbed and the surrounding landscape, violation of the habitat of endemic fish species, etc. are identified. It is revealed that for the full development of small hydropower it is necessary to predict environmental risks and bring them up for discussion both with the responsible state institutions and with the population in order to avoid social risks.

Keywords: small hydropower, Armenia, ecology, risks, rivers.

Введение. Энергопотребление в мире продолжает расти, несмотря на снижение темпов экономического развития [1]. Это обусловлено помимо прочих факторов также беспрецедентными темпами роста населения в мире [2]. В целом прогнозы относительно энергопотребления в мировом масштабе неутешительны [3]. В докладе ЕЭК ООН рассмотрены различные сценарии устойчивого энергетического развития в мире. Примечательно, что во всех этих сценариях роль ископаемого топлива в ближайшем будущем достаточно заметна [4]. Вместе с тем «зеленая» энергетика также продолжает оказывать влияние на формирование глобальных тенденций энергопотребления.

Армения лишена запасов таких ископаемых источников энергии, как нефть и газ, потребности в которых удовлетворяются посредством импорта. Однако геополитические процессы формируют серьезные риски для стабильного осуществления этих поставок. Вместе с тем Армения является экспортером электроэнергии. Баланс объемов производства, экспорта и импорта электроэнергии в Армении является положительным. По данным Национальной статистической службы Армении, с января по декабрь 2021 г. баланс электроэнергии составил 7 млрд 048,2 млн кВт·ч [5, 6].

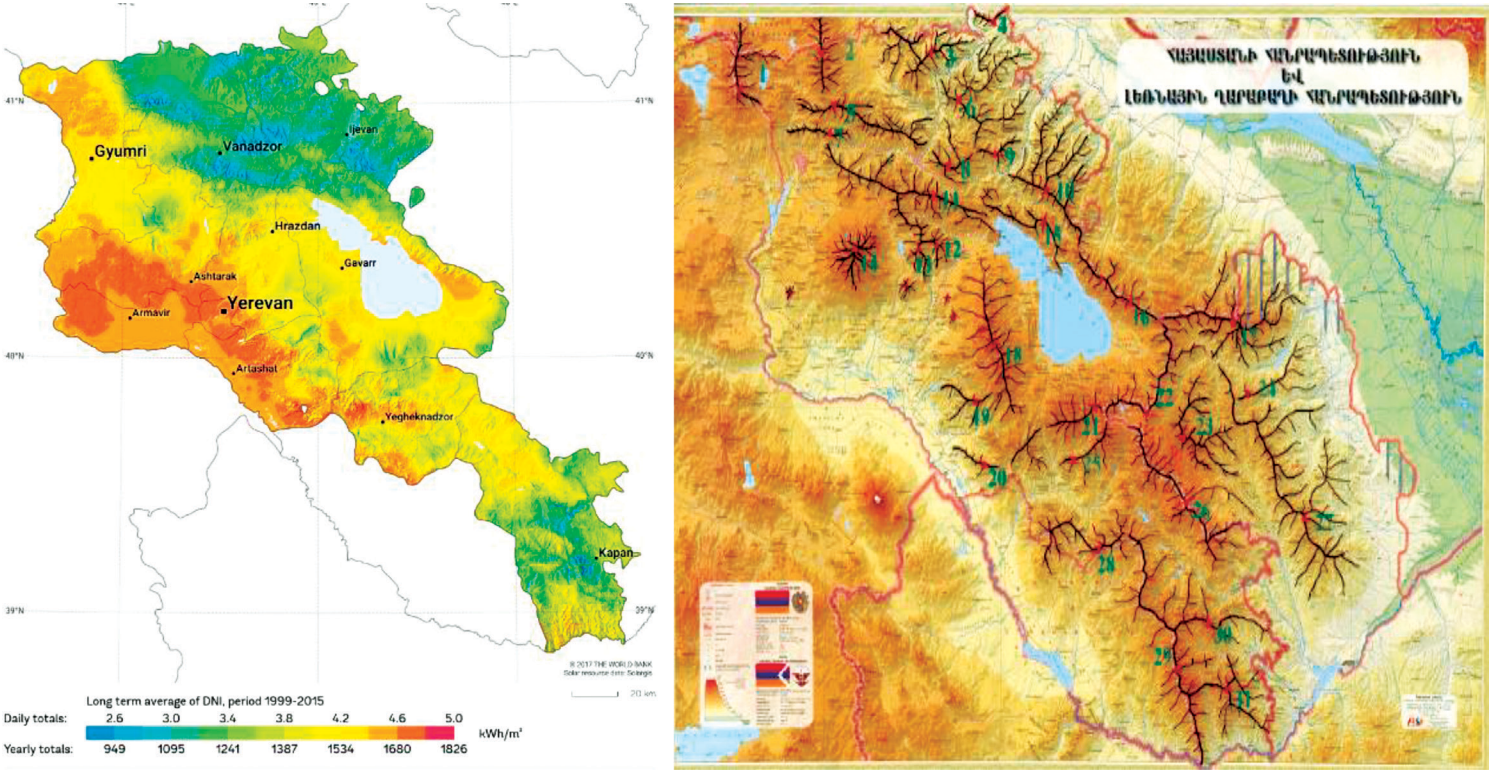
Геологическое расположение Армении благоприятно для развития возобновляемой энергетики. Изобилие солнца и горная местность с богатыми малыми реками (рис. 1) создают хорошие условия для развития таких альтернативных энергетических направлений, как солнечная энергетика и гидроэнергетика. В республике протекает более 200 рек и ручьев, каждая длиной 10 км и более. Наибольшим энергетическим потенциалом располагают вытекающая из озера Севан река Раздан, а также реки Аракс, Воротан и Дебет. Потенциальные водные энергоресурсы Армении составляют 21,8 млрд кВт·ч, в том числе крупные и средние реки – 18,6 млрд кВт·ч, малые реки – 3,2 млрд кВт·ч [7–9].

Основной потенциал гидроэнергетики в Армении возможно использовать посредством эксплуатации существующих крупнейших гидрообъектов – Севан-Разданского и Воротанского каскадов ГЭС, а также построив ГЭС средней мощности и освоив потенциал малых ГЭС.

По состоянию на 1 января 2019 г, электроэнергию вырабатывали 188 малых ГЭС с суммарной установленной мощностью около 369 МВт. При этом годом ранее эти показатели составляли соответственно 178 МГЭС и 328 МВт [6].

Несмотря на то, что малая гидроэнергетика считается экологически чистой технологией производства электроэнергии, однако не существует таких гидроэлектростанций, которые не воздействуют на геоэкологию и, в частности, на экосистему рек. Во время строительства МГЭС изменяется русло реки, окружающий ландшафт, нарушаются места обитания эндемичных видов рыб и т. д.

В работах разных исследований [11–14] подтверждается отрицательное воздействие некоторых МГЭС на биоразнообразие. Построение электростанций стали причиной больших колебаний уровней воды, что в некоторых водохранилищах неблагоприятно сказывается на воспроизводстве рыб. Плотины преграждают путь (на нерест) проходным рыбам. На некоторых водохранилищах



а *б*

Рис. 1. Карта солнечной активности Армении (*а*); физическая карта Армении (*б*)

развиваются процессы эвтрофирования, в основном обусловленные сбросом в реки и водоемы сточных вод, содержащих большое количество биогенных элементов. Во всех рассмотренных случаях, независимо от местности русла рек, сезона и погоды, наблюдаются изменения температуры воды, скорости течения, структуры донного покрытия, индекса разнообразия.

Результаты исследования и их обсуждение. В работе [10] приведен анализ изменений ряда показателей реки Карчахбюр в результате возведения МГЭС. Изучены как структура донного покрытия, так и температура, а также скорость течения. Если выше МГЭС галька составляла больше половины донного покрытия (около 55 %), то ниже она существенно снизилась (до 15 %), появилась мелкая галька (около 20 %). В составе донного покрытия количество ила снизилось с 30 до 15 %. Наблюдается увеличение доли микрофитов от 5 до 40 %. Исследование показало, что снизилась скорость течения. Также наблюдаются изменения биотического индекса (БИ) фауны реки Карчахбюр до и после возведения МГЭС. Согласно исследованию, в реке Карчахбюр не было зарегистрировано ни одного вида рыб, тогда как до постройки МГЭС река была местом нереста эндемичных рыб. Исследователями показана динамика изменения биотического индекса (БИ) фауны реки Карчахбюр до и после возведения МГЭС (рис. 2).

Исследования показывают, что эксплуатация МГЭС приводит к изменению гидрологического режима рек. При постройке происходит изменение и перераспределение стока, изменение уровневого режима и режимов течений. Скорости течения воды могут уменьшаться в десятки раз, а в отдельных зонах водохранилища могут возникать полностью застойные участки. Приведенные ниже фотографии демонстрируют это наиболее наглядно (рис. 3) [13].

Изучая влияние некоторых МГЭС, исследователи констатируют, что работа МГЭС на речных экосистемах Армении приводит к непрогнозируемым изменениям количественного и качественного состава гидробиологических сообществ, таких как фито- и зоопланктон, к отсутствию экологической системы регулирования стока и рыбохода, что вызывает разрушение участков рек и препятствует миграции рыб, мешая их естественному воспроизводству, снижая скорость и сток реки. Все это приводит к усилению антропогенного загрязнения (минеральный азот и соли) за счет снижения степени разбавления на участках рек [13].

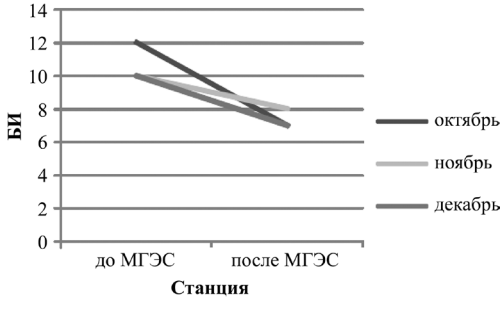


Рис. 2. Изменения биотического индекса (БИ) фауны реки Карчахбюр до и после возведения МГЭС

Таким образом, при постройке МГЭС необходимо учесть, что строительство МГЭС может:

вызвать загрязнение окружающей среды;

изменить гидрологический режим рек;



Рис. 3. Фотографии реки Аргичи до и после постройки МГЭС

сократить рыбные запасы в случае плохой работы рыбоподъемников;

уменьшить самоочищающую способность.

В работе [11] на основе изучения воздействия МГЭС на окружающую среду и биоразнообразие Армении предложено провести паспортизацию всех рек и водоемов с целью выделения следующих трех зон:

запрещенная зона для любой хозяйственной деятельности;

хозяйственная деятельность возможна при условии восстановления биологического разнообразия и биологической продуктивности;

хозяйственная деятельность возможна при условии соблюдения всех природоохранных мер.

Заключение. Таким образом, при строительстве МГЭС необходимо учесть негативное воздействие на экологию, спрогнозировать возможные отрицательные последствия и найти решения для их устранения. В работе [15] предлагается определенный подход для оценки воздействия на окружающую среду. Думается, что для каждого отдельного случая должно быть изучено влияние конкретной МГЭС с учетом характерных параметров местности. Для оценки влияния существуют много методов, один из них – матрица Леопольда.

Полученные результаты должны быть обнародованы, согласованы как с соответствующими государственными органами, так и населением данной местности во избежание различных социальных рисков.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета по науке Республики Армения в рамках научного проекта № 21T-2H107.

Список использованных источников

1. В 2022 году темпы роста экономики в Европе и Центральной Азии снизятся почти наполовину по сравнению с предыдущим годом [Электронный ресурс] // United Nations. – Режим доступа : https://news.un.org/ru/story/2022/01/1416772. – Дата доступа : 27.05.2022.

2. Рост населения мира [Электронный ресурс] // The World Bank. – Режим доступа : https://web.worldbank.org/archive/website01558/WEB/IMAGES/WNR_03.PDF. – Дата доступа : 27.05.2022.

3. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 [Электронный ресурс] / Ин-т энергетических исследований РАН, Центр энергетики Москов. шк. управления «Сколково». – М., 2019. – Режим доступа : https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019_Rus.pdf. – Дата доступа : 27.05.2022.

4. Пути перехода к устойчивой энергетике: ускорение энергетического перехода в регионе ЕЭК ООН [Электронный ресурс] / ЕЭК ООН. – Женева, 2020. – Режим доступа : https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/images/PATHWAYS/Home/FINAL_Report_-_Pathways_to_Sustainable_Energy_-_RUSSIAN.pdf. – Дата доступа : 27.05.2022.

5. В Армении баланс объемов производства, экспорта и импорта электроэнергии – положительный [Электронный ресурс] // ArmenPress. – Режим доступа : https://armenpress.am/rus/news/1075300.html. – Дата доступа : 27.05.2022.

6. Энергетический баланс Республики Армения (в формате МЭА) [Электронный ресурс] // Стат. ком. Респ. Армения. – Режим доступа : https://armstat.am/file/doc/99524988.pdf. – Дата доступа : 27.05.2022.

7. Геоэкологические последствия и проблемы гидроэнергетики в Армении / С. А. Минасян [и др.] // Вестн. Инженерной академии Армении. – 2018. – Т. 15, № 2. – С. 307–312.

8. Егиазарян, Г. М. К вопросу обоснования разработки противоэрозионных мероприятий в проектах землеустройства / Г. М. Егиазарян // Изв. Нац. аграр. ун-та Армении. – 2014. – № 2. – С. 98–103.

9. Захарян, Г. А. Малые ГЭС как основа развития ВИЭ в Армении / Г. А. Захарян // Географы в годы войны и мира : сб. ст. / Санкт-Петербург. гос. ун-т. : под ред В. В. Дмитриева [и др.]. – СПб., 2015. – С. 58–61.

10. Бошян, Т. В. Оценка воздействия малой гидроэлектростанции на гидроэкосистему реки Карчахбюр по состоянию сообщества макрозообентоса / Т. В. Бошян, С. А. Акопян, Г. А. Геворгян // Биологическое разнообразие и проблемы охраны фауны Кавказа – 2 : материалы Междунар. науч. конф., Ереван, 26–29 сент. 2011 г. / отв. секр. Г. А. Карагян; НАН РА, Науч. центр зоологии и гидроэкологии ; Америк. ун-т Армении фонд (Центр окружающей среды им. Акопяна). – Ереван, 2014. – С. 82–86.

11. Environmental Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Armenian River Ecosystems: Case Study of Lake Sevan and Debed River Catchment Basins / G. A. Gevorgyan [et al.] // Polish Journal of Environmental Studies. – 2016. – № 25 (6). – P. 2387–2399.

12. Investigation of different environmental factors role in the formation of zooplankton community in the Arpa river (Armenia) and its Main Tributaries / A. H. Hayrapetyan [et al.] // Proceedings of the Yerevan State University. – 2016. – № 241 (3). – P. 53–59.

13. Hydroecological Risk Assessment of Small Hydropower Plants Operation in Armenia (Based on Example of Vardenis, Karchaghbyur and Arpa Rivers) / A. Gevorgyan [et al.] // Eurasian Journal of Sustainable – Americanagriculture. – 2017. – № 11 (5). – P. 59–67.

14. Rubenyan, A. R. Influence of Hydropower Industry to Biodiversity of Hydroecosystems of Armenia / A. R. Rubenyan, B. K. Gabrielyan // Biological Diversity and Conservation Problems of the Fauna of the Caucasus : proceedings of the Internat. conf., Yerevan, 26–29 sept. 2011 / National acad. of sciences of the Republic of Armenia, American un-ty fund of Armenia. – Yerevan, 2011. – P. 256–261.

15. Черников, В. А. Агроэкология. Методология, технология, экономика / В. А. Черников, И. Г. Грингоф, В. Т. Емцев. – М. : Колос, 2004. – 400 с.

References

1. V 2022 godu tempy rosta ekonomiki v Evrope i Central'noj Azii snizyatsya pochti napolovinu po sravneniyu s predydushchim godom [Electronic resource] // United Nations. – Mode of access : https://news.un.org/ru/story/2022/01/1416772. – Date of access : 27.05.2022.

2. Rost naseleniya mira [Electronic resource] // The World Bank. – Mode of access : https://web.worldbank.org/archive/website01558/WEB/IMAGES/WNR_03.PDF. – Date of access : 27.05.2022.

3. Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii 2019 [Electronic resource] / Institut energeticheskih issledovanij RAN, Centr energetiki Mosk. shk. upravleniya «Skolkovo». – M., 2019. – Mode of access : https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019_Rus.pdf. –Date of access : 27.05.2022.

4. Puti perekhoda k ustojchivoj energetike: uskorenie energeticheskogo perekhoda v regione EEK OON [Electronic resource] / EEK OON. – ZHeneva, 2020. – Mode of access : https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/images/PATHWAYS/Home/FINAL_Report_-_Pathways_to_Sustainable_Energy_-_RUSSIAN.pdf. – Date of access : 27.05.2022.

5. V Armenii balans ob"emov proizvodstva, eksporta i importa elektroenergii – polozhitel'nyj [Electronic resource] // ArmenPress. – Mode of access : https://armenpress.am/rus/news/1075300.html. – Date of access : 27.05.2022.

6. Energeticheskij balans Respubliki Armeniya (v formate MEA) [Electronic resource] // Statisticheskij komitet Respubliki Armeniya. – Mode of access : https://armstat.am/file/doc/99524988.pdf. – Date of access : 27.05.2022.

7. Geoekologicheskie posledstviya i problemy gidroenergetiki v Armenii / S. A. Minasyan [et al.] // Vestn. Inzhenernoj akademii Armenii. – 2018. – T. 15, № 2. – S. 307–312.

8. Egiazaryan, G. M. K voprosu obosnovaniya razrabotki protivoerozionnyh meropriyatij v proektah zemleustrojstva / G. M. Egiazaryan // Izv. Nac. agrar. un-ta Armenii. – 2014. – № 2. – S. 98–103.

9. Zaharyan, G. A. Malye GES kak osnova razvitiya VIE v Armenii / G. A. Zaharyan // Geografy v gody vojny i mira : sb. st. / Sankt-Peterburg. gos. un-t. : pod red V. V. Dmitrieva [et al.]. – SPb., 2015. – S. 58–61.

10. Boshyan, T. V. Ocenka vozdejstviya maloj gidroelektrostancii na gidroekosistemu reki Karchahbyur po sostoyaniyu soobshchestva makrozoobentosa / T. V. Boshyan, S. A. Akopyan, G. A. Gevorgyan // Biologicheskoe raznoobrazie i problemy ohrany fauny Kavkaza – 2 : materialy Mezhdunar. nauch. konf., Erevan, 26–29 sent. 2011 g. / otv. sekr. G. A. Karagyan; NAN RA, Nauch. centr zoologii i gidroekologii ; Amerik. un-t Armenii fond (Centr okruzhayushchej sredy im. Akopyana). – Erevan, 2014. – S. 82–86.

11. Environmental Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Armenian River Ecosystems: Case Study of Lake Sevan and Debed River Catchment Basins / G. A. Gevorgyan [et al.] // Polish Journal of Environmental Studies. – 2016. – № 25 (6). – P. 2387–2399.

12. Investigation of different environmental factors role in the formation of zooplankton community in the Arpa river (Armenia) and its Main Tributaries / A. H. Hayrapetyan [et al.] // Proceedings of the Yerevan State University. – 2016. – № 241 (3). – P. 53–59.

13. Hydroecological Risk Assessment of Small Hydropower Plants Operation in Armenia (Based on Example of Vardenis, Karchaghbyur and Arpa Rivers) / A. Gevorgyan [et al.] // Eurasian Journal of Sustainable – Americanagriculture. – 2017. – 11 (5). – P. 59–67.

14. Rubenyan, A. R. Influence of Hydropower Industry to Biodiversity of Hydroecosystems of Armenia / A. R. Rubenyan, B. K. Gabrielyan // Biological Diversity and Conservation Problems of the Fauna of the Caucasus : proceedings of the Internat. Conf., Yerevan, 26–29 sept. 2011 / National acad. of sciences of the Republic of Armenia, American un-ty fund of Armenia. – Yerevan, 2011. – P. 256–261.

15. Chernikov, V. A. Agroekologiya. Metodologiya, tekhnologiya, ekonomika / V. A. Chernikov, I. G. Gringof, V. T. Emcev. – M. : Kolos, 2004. – 400 s.

УДК 621.039.516.4

Д. С. Кузенкова[1], В. Ю. Бландинский[2]

РАЗРАБОТКА ЖИДКОСОЛЕВОЙ ПЕТЛИ РЕАКТОРА МБИР

[1]НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация
[2]Кандидат технических наук, НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В целях обоснования экспериментальных возможностей реактора МБИР для исследования жидкосолевых топливных композиций предложены и верифицированы инструменты расчета изменения изотопного состава топливной соли в петлевом канале.

Ключевые слова: МБИР, жидкосолевая петля, ЖСР, моделирование циркуляции.

D. S. Kuzenkova[1], V. Yu. Blandinskiy[2]

MOLTEN SALT LOOP DEVELOPMENT OF THE MBIR REACTOR

[1]NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation
[2]Ph. D. in Engineering Science, NRC «Kurchatov Institute» Moscow, Russian Federation

Annotation. To substantiate the experimental capabilities of the MBIR reactor for studying molten-salt fuel compositions, the tools for calculating changes in the isotopic composition of the fuel salt in the loop channel were developed and verified.

Keywords: MBIR, molten-salt reactors, MSR, molten-salt loop.

Введение. В «ГНЦ НИИАР» в Димитровграде идет строительство многоцелевого быстрого исследовательского реактора «МБИР». ИЯУ МБИР включает в свой состав реакторную установку с двумя натриевым контурами охлаждения и третьим пароводяным контуром, паротурбинную установку, транспортно-технологические системы, петлевые установки, вертикальные и горизонтальные экспериментальные каналы, комплекс исследовательских защитных камер, лабораторный комплекс. На базе реактора МБИР открыт международный центр исследований (МЦИ) [1], в котором планируется проведение ряда перспективных исследований, в том числе и международных. Суть программы заключается в создании новой технологической платформы ядерной энергетики, основой которой является переход на замкнутый ядерный топливный цикл с реакторами, работающими на быстрых нейтронах. Сооружение реактора МБИР должно обеспечить не только преемственность экспериментальных и исследовательских программ, выполняемых на реакторе БОР-60, но и инновационное развитие экспериментальной базы отрасли. В первую очередь это связано с необходимостью достижения более высокой плотности потока нейтронов в экспериментальных каналах и проведения исследований топлива и материалов для обоснования перспективных реакторных технологий с различными типами теплоносителей и топливных композиций – от газа до расплавов топливных солей, что требует создания автономных петлевых установок.

Предполагается, что МБИР станет современным инструментом международного коллективного пользования в экспериментальных исследованиях для обоснования инновационных реакторных технологий. Экспериментальные петлевые каналы с возможностью автономной циркуляции также позволят более обоснованно разрабатывать жидкосолевую тематику, в частности, исследовать свойства бланкетной соли на основе тория в качестве объекта разработки.

Жидкосолевые топливные композиции могут использоваться как в перспективных реакторах деления [2], так и в бланкетах гибридных термоядерных реакторов [3]. Внедрение ториевых топливных композиций в бланкет термоядерного источника нейтронов позволит наработать U-233, что позволит решить проблемы обеспеченности ресурсами рынка ядерного топлива на длительный период времени.

Материалы и методы исследования. Программные комплексы на основе метода Монте-Карло (MCU, MCNP...) позволяют выполнять огромное количество различных нейтронно-физических расчетов без создания реальных установок.

Примером такого программного комплекса является программная система (ПС) ISTAR (Integrated System for Transmutation Analysis of Reactors and Fuel Cycles) [4, 6], предназначенная для расчетных исследований сложных структур систем ядерной энергетики, включая различные процессы трансформации нуклидов: ядерные реакторы, хранилища отработавшего топлива, предприятия по переработке и фабрикации топлива и т. п., и потоки нуклидов между ними.

Расчеты могут проводиться как для стационарных режимов (состояние равновесия), так и для нестационарных – режимов выгорания и выдержки.

Заложенные в ISTAR подходы объединены в программную систему посредством электронных таблиц (базы данных) и оболочки, позволяющей с ними оперировать. Поэтому изначально для разработки данной программной системы был выбран язык программирования со встроенной и развитой поддержкой оперирования с базами данных формата dBaseIII/IV – Clipper. В конце 1980-х и начале 1990-х гг. Clipper был очень популярен как один из основных средств программирования для приложений, связанных с использованием баз данных. Однако в 1997 г. компания-разработчик объявила о прекращении дальнейшей его разработки, оставив пишущих на нем программистов наедине с 16-разрядной, рассчитанной на применение в среде MS-DOS системой программирования. Для адаптации программного обеспечения, написанного на языке Clipper, к новым реалиям был создан язык программирования Harbour. Язык использует традиционные конструкции Clipper, объектную нотацию, принятую в языке C++, а также дает возможность писать на языке C. Harbour активно развивается, и в язык включаются некоторые современные технологии программирования.

Исходный код ПС ISTAR адаптирован под компилятор Harbour 3.0, что позволило создать версию ПС, способную работать в современных операционных системах семейства Windows (версии 7 и 10). А в дальнейшем выбор данного

языка программирования позволит перенести ПС ISTAR и на другие платформы, в частности ОС семейства Unix/Linux.

На его основе в ходе работы над моделированием процессов, происходящих с жидкосолевой топливной композицией экспериментальном петлевом канале реакторной установки МБИР [4, 5], авторами статьи создана программа, способная рассчитать изменяющиеся со временем концентрации изотопов в процессе непрерывной циркуляции топлива через активную зону реактора. Моделирование нестационарной изотопной кинетики системы (петли) с циркулирующим топливом реализовано в программе [5] в виде поэтапного моделирования выгорания нуклидов: в поле нейтронов (петля в активной зоне реактора) и во время движения во внешнем контуре.

В данной статье особое внимание уделено вопросу верификации некоторых модулей ISTAR, отвечающих за выгорание топлива применительно к расплавам солей и выходу на равновесное состояние.

Результаты исследований и их обсуждение. Верификация программной среды ISTAR для обоснования расчетов равновесного состояния применимо к исследованиям жидкосолевых топливных композиций включает в себя описание элементарной модели, проведение расчета выгорания одним из модулей ISTAR и равновесного состава другим модулем, оценку достижимости равновесного состояния путем длительного выгорания топлива по конкретным нуклидам, а также сравнение полученных результатов с аналитическим решением системы уравнений выгорания.

Приемлемым считается случай, когда по интересующим нас нуклидам (торий, уран, протактиний) значения концентраций, полученные путем длительного выгорания с приемлемой степенью точности, совпадают с расчетами равновесного состояния, а также согласуются с аналитическими расчетами.

В программе MCNP5 построена расчетная модель, которая представляет собой куб со стенкой в 5 см, заполненный солью LiF–ThF_4. По построенной модели и проводились расчеты.

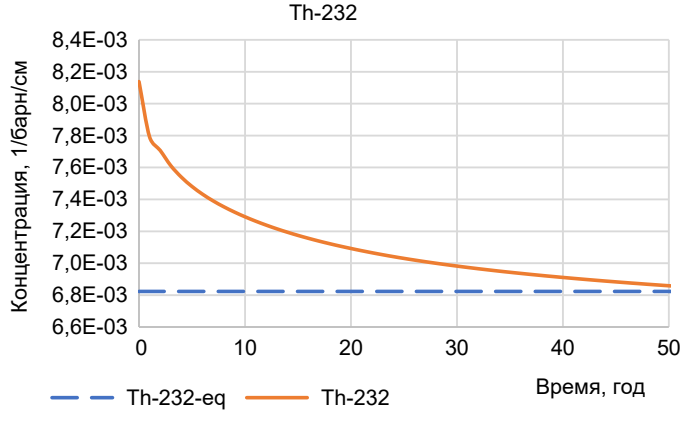


Рис. 1. График изменения концентрации тория-232 от времени

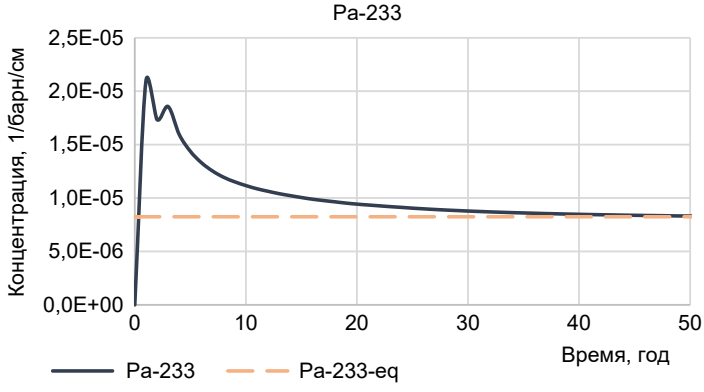


Рис. 2. График изменения концентрации протактиния-233 от времени

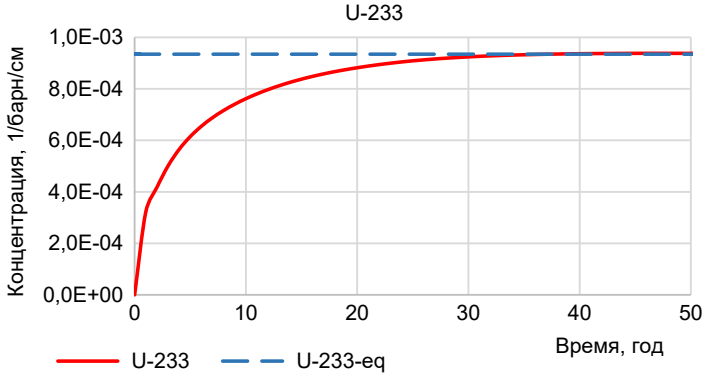


Рис. 3. График изменения концентрации урана-233 от времени

Первый этап верификации связан с возможностью в ПС ISTAR задать процесс выгорания топлива таким образом, чтобы через какое-то время его состав вышел на равновесие. При моделировании такого процесса была подобрана подпитка торием, и из топлива выводились продукты деления. На графиках можно наблюдать процесс выхода нуклидов тория-232 (рис. 1), протактиния-233 (рис. 2) и урана-233 (рис. 3) в равновесное состояние.

Результаты сравнения с учетом погрешности представлены в таблице.

Результаты сравнения концентраций основных нуклидов при равновесном составе и с последнего шага выгорания, 1/(барн·см)

Нуклид	Концентрация с последнего шага выгорания	Равновесная концентрация	Погрешность, %
Th-232	$6{,}818 \cdot 10^{-03}$	$6{,}823 \cdot 10^{-03}$	0,08
Th-233	$4{,}638 \cdot 10^{-09}$	$4{,}659 \cdot 10^{-09}$	0,46
Pa-233	$8{,}208 \cdot 10^{-06}$	$8{,}245 \cdot 10^{-06}$	0,45
U-233	$9{,}348 \cdot 10^{-04}$	$9{,}348 \cdot 10^{-04}$	0,00

Для того чтобы оценить достоверность результатов расчета выгорания произведен сравнительный анализ. Интересующие нас нуклиды занимают первые места в цепочке, поэтому решим систему из четырех дифференциальных уравнений выгорания.

$$\begin{aligned}
\frac{dN^{\mathrm{Th}^{232}}}{dt} &= -\sigma_a^{\mathrm{Th}^{232}} \cdot N(t)^{\mathrm{Th}^{232}} \cdot \varphi + q \\
\frac{dN^{\mathrm{Th}^{233}}}{dt} &= \sigma_c^{\mathrm{Th}^{232}} \cdot N(t)^{\mathrm{Th}^{232}} \cdot \varphi - \sigma_a^{\mathrm{Th}^{233}} \cdot N(t)^{\mathrm{Th}^{233}} \cdot \varphi - \lambda^{\mathrm{Th}^{233}} \cdot N(t)^{\mathrm{Th}^{233}} \\
\frac{dN^{\mathrm{Pa}^{233}}}{dt} &= \lambda^{\mathrm{Th}^{233}} \cdot N(t)^{\mathrm{Th}^{233}} - \sigma_a^{\mathrm{Pa}^{233}} \cdot N(t)^{\mathrm{Pa}^{233}} \cdot \varphi - \lambda^{\mathrm{Pa}^{233}} \cdot N(t)^{\mathrm{Pa}^{233}} \\
\frac{dN^{\mathrm{U}^{233}}}{dt} &= \lambda^{\mathrm{Pa}^{233}} \cdot N(t)^{\mathrm{Pa}^{233}} - \sigma_a^{\mathrm{U}^{233}} \cdot N(t)^{\mathrm{U}^{233}} \cdot \varphi
\end{aligned}, \qquad (1)$$

где $N(t)$ – изменение концентрации нуклидов со временем, 1/(барн·см); σ_a – сечение поглощения нуклида, барн; σ_c – сечение захвата нуклида, барн; q – подпитка, 1/(барн·см·с); φ – плотность потока нейтронов, 1/(см^2·с); λ – постоянная распада нуклида, 1/с.

На рис. 4–6 представлены сравнительные графики изменения концентрации изотопов Th-232, Pa-233, U-233 двумя методами: путем практического расчета в ПС ISTAR и методом аналитического решения системы уравнений (1). Нейтронные данные (сечения, плотности потока нейтронов и постоянные распада) для аналитического решения этой системы на каждом промежутке времени взяты из соответствующего шага программного расчета.

Расхождения в концентрациях некоторых нуклидах достигают максимум 3 %, что свидетельствует о высокой точности расчета и может быть вызвано невозможностью в аналитическом решении учесть все пути образования этих изотопов.

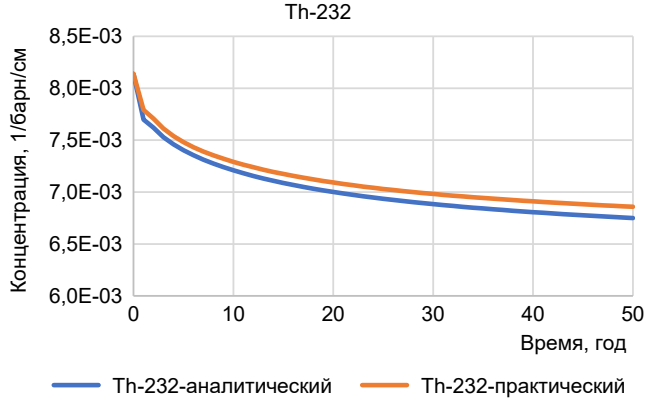


Рис. 4. График изменения концентрации тория-232 от времени для расчета аналитическим методом и для практического расчета в ПС ISTAR

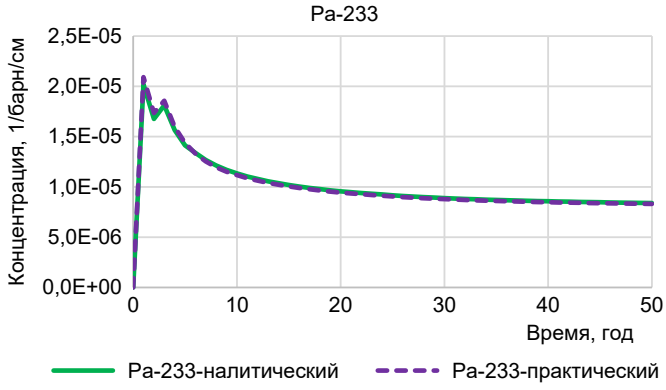


Рис. 5. График изменения концентрации протактиния-233 от времени для расчета аналитическим методом и для практического расчета в ПС ISTAR

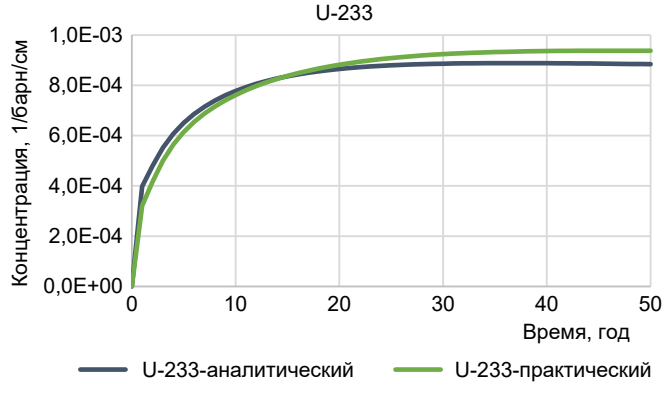


Рис. 6. График изменения концентрации урана-233 от времени для расчета аналитическим методом и для практического расчета в ПС ISTAR

Заключение. В данной статье рассмотрены некоторые инструменты моделирования расчетных нейтронно-физических задач, способные обеспечить приемлемое качество математического моделирования процессов, которые происходят при экспериментах в петлевых установках реактора МБИР.

Список использованных источников

1. Ганжур, О. МБИР объединяющий / О. Ганжур // Страна Росатом. – 2022. – № 28 (540). – С. 4–5.

2. Nuclear reactors of enhanced safety. Analysis of conceptual developments / V. M. Novikov [et al.]. – M. : Energoatomizdat, 1993. – 384 p.

3. Велихов, Е. П. Приемлемость замыкания топливного цикла ядерной энергетики / Е. П. Велихов [и др.] // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2021. – Т. 44, № 1. – С. 5–12.

4. Blandinskii, V. Y. Computational Validation of Experiments with Molten-Salt Thorium-Uranium Fuel Compositions in MBIR Test Loop / V. Y. Blandinskii, D. S. Kuzenkova // Atomic Energy. – 2020. – Т. 128, № 5. – С. 271–276.

5. Программа для расчета изотопной кинетики в системах с циркулирующим топливом на базе ПС ISTAR : свид. о гос. рег. ПрЭВМ № 2022614236 / Д. С. Кузенкова, В. Ю. Бландинский. – Рег. 17.03.2022.

6. Программа моделирования изотопной кинетики в многокомпонентных структурах ядерной энергетики «ISTAR» : свид. о гос. рег. ПрЭВМ № 2020619218 / А. А. Дудников. – Рег. 13.08.2020.

7. Blandinskiy, V. Y. Calculations of Spent Fuel Isotopic Composition for Fuel Rod from VVER-440 Fuel Assembly Benchmark Using Several Evaluated Nuclear Data Libraries / V. Y. Blandinskii, A. A. Dudnikov // Kerntechnik. – 2018, – Vol. 83, № 4. – P. 325–330.

References

1. Ganzhur, O. MBIR ob”edinyayushchij / O. Ganzhur // Strana Rosatom. – 2022. – № 28 (540). – S. 4–5.

2. Nuclear reactors of enhanced safety. Analysis of conceptual developments / V. M. Novikov [et al.]. – M. : Energoatomizdat, 1993. – 384 p.

3. Velihov, E. P. Priemlemost’ zamykaniya toplivnogo cikla yadernoj energetiki / E. P. Velihov [et al.] // Vopr. atomnoj nauki i tekhniki. Ser. Termoyadernyj sintez. – 2021. – T. 44, № 1. – S. 5–12.

4. Blandinskii, V. Y. Computational Validation of Experiments with Molten-Salt Thorium-Uranium Fuel Compositions in MBIR Test Loop / V. Y. Blandinskii, D. S. Kuzenkova // Atomic Energy. – 2020. – T. 128, № 5. – S. 271–276.

5. Programma dlya rascheta izotopnoj kinetiki v sistemah s cirkuliruyushchim toplivom na baze PS ISTAR : svid. o gos. reg. PrEVM № 2022614236 / D. S. Kuzenkova, V. Yu. Blandinskij. – Reg. 17.03.2022.

6. Programma modelirovaniya izotopnoj kinetiki v mnogokomponentnyh strukturah yadernoj energetiki «ISTAR» : svid. o gos. reg. PrEVM № 2020619218 / A. A. Dudnikov. – Reg. 13.08.2020.

7. Blandinskiy, V. Y. Calculations of Spent Fuel Isotopic Composition for Fuel Rod from VVER-440 Fuel Assembly Benchmark Using Several Evaluated Nuclear Data Libraries / V. Y. Blandinskii, A. A. Dudnikov // Kerntechnik. – 2018, – Vol. 83, № 4. – P. 325–330.

УДК 338.2

Г. А. Рудченко

КОМПАРАТИВНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЫНКОВ ЗАРУБЕЖНЫХ СТРАН В КОНТЕКСТЕ ФОРМИРОВАНИЯ НАЦИОНАЛЬНОГО РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Кандидат экономических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Гомель, Республика Беларусь

Аннотация. В данной статье выполнен анализ моделей электроэнергетических рынков зарубежных стран. Рассматриваются особенности формирования и функционирования рынков электрической энергии в отдельных государствах. Устанавливается необходимость глубокой проработки позитивного и негативного мирового опыта при создании отечественного электроэнергетического рынка.

Ключевые слова: электроэнергетика, рынок электрической энергии, реформирование энергетических рынков.

G. A. Rudchenko

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODELS OF ELECTRIC POWER MARKETS OF FOREIGN COUNTRIES IN THE CONTEXT OF THE FORMATION OF THE NATIONAL ELECTRICITY MARKET OF THE REPUBLIC OF BELARUS

Ph. D. in Economics, Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Republic of Belarus

Annotation. This article analyzes the models of the electric power markets of foreign countries. The features of the formation and functioning of electric energy markets in individual states are considered. The necessity of in-depth study of positive and negative world experience in the creation of the domestic electric power market is established.

Keywords: electric power industry, electric energy market, reforming of energy markets.

Введение. На современном этапе динамично изменяющейся ситуации в мировой и национальной экономике, происходящей активизации интеграционных процессов в рамках Союзного государства, направленных на выравнивание условий деятельности хозяйствующих субъектов в разных областях экономики, для построения единых энергетических рынков, формирования общей энергетической политики требуется трансформация институциональной среды, выработка новых принципов, формирование адекватных складывающимся условиям моделей и механизмов функционирования национального рынка электроэнергии.

В контексте происходящих и планируемых изменений интерес представляет опыт формирования и функционирования электроэнергетического рынка в зарубежных странах с целью адаптации успешно применяемых подходов и мер в отечественной практике.

Материалы и методы исследования. Теоретической основой для исследований послужили труды отечественных и зарубежных авторов по вопросам функционирования энергетических рынков. Применены общелогические (анализ, синтез, сравнение) и специальные (исторический, монографический) методы познания.

Результаты исследования и их обсуждение. По материалам исследований, представленных в работах [1–5], а также собственного анализа были выделены мотивы, ключевые цели, основные направления и характер развития, роль государства, регулирующие органы, участники и сегменты рынка, способы торговли, подходы к обеспечению надежности и безопасности энергосистем для рассматриваемых моделей организации конкурентных электроэнергетических рынков.

Характеристика модели национального рынка электроэнергии Австралии представлена в табл. 1.

Итогом проводимых мер стало выстраивание достаточно эффективной модели функционирования электроэнергетики и создание благоприятных условий для притока инвестиций.

Таблица 1. **Особенности формирования и функционирования рынка электрической энергии Австралии**

Основные особенности	Характеристика
Состояние	Наличие вертикально интегрированных муниципальных предприятий отдельных штатов, осуществляющих поставку электроэнергии потребителям; полное отсутствие или слабые электрические связи между штатами; ограниченная рамками соседних штатов торговля электроэнергией; полная автономия правительства каждого штата в вопросах эксплуатации сетей и тарифообразования
Год начала реформирования	1991 г.
Ведущие мотивы	Повышение эффективности функционирования отрасли через создание общей энергетической системы с электрическими связями между самостоятельными вертикально интегрированными энергосистемами отдельных штатов, которые должны сформировать единый конкурентный рынок электроэнергии страны
Ключевые цели	Переход к конкурентному ценообразованию для снижения цен на электроэнергию; привлечение частного капитала в развитие отрасли для покрытия растущих потребностей в электроэнергии
Основные направления и характер развития	Разделение деятельности по генерации, передаче, распределению и поставке электроэнергии в вертикально интегрированных компаниях; предоставление недискриминационного доступа участникам рынка к передающим и распределительным сетям; обеспечение потребителям права выбора поставщика; создание условий для торговли между штатами; разработка и аккумулирование единых правил регулирования взаимоотношений между участниками рынка в Национальном электроэнергетическом кодексе
Роль государства	Минимальное участие государства, заключающееся в контроле над недопущением проявления рыночной власти
Регулирующие органы	Администратор Национального электроэнергетического кодекса, осуществляющий: надзор за исполнением и внесение поправок в Кодекс; определение процедур решения споров; информационные услуги. Австралийская комиссия по защите конкуренции, функции которой: установление тарифов на передачу электроэнергии; согласование изменений в Кодекс. Австралийская комиссия по ценным бумагам и инвестициям, занимающаяся регулированием рынка финансовых инструментов по страхованию рисков
Участники рынка	Генерирующие объекты (электрические станции): а) диспетчируемые генераторы мощностью более 30 МВт, обязанные согласовывать поставки в сеть с Национальной компанией по управлению рынком электроэнергии путем подачи заявки с указанием объемов и цен на каждые полчаса следующего дня; б) недиспетчируемые генераторы мощностью менее 30 МВт, не обязанные согласовывать поставки в сеть с Национальной компанией по управлению рынком электроэнергии

Окончание табл. 1

Основные особенности	Характеристика
Участники рынка	Потребители: а) свободные, самостоятельно выбирающие поставщика электроэнергии и заключающие с ним прямой контракт на поставку; б) зависимые, приобретающие электроэнергию по стандартному тарифу поставщика, работающего в соответствующем районе. Сетевые компании: а) передающие сетевые компании, управляющие линиями высокого напряжения; б) распределительные сетевые компании, эксплуатирующие сети низкого напряжения; в) рыночные сетевые компании, имеющие в собственности линии высокого напряжения, соединяющие энергосистемы штатов
Сегменты рынка	Рынок «за день вперед»; спотовый рынок (рынок «реального времени»); рынок финансовых контрактов «на разницу»
Способы торговли	Используются следующие способы торговли: заключение прямых двусторонних контрактов между поставщиками и потребителями; аукцион с участием Национальной компании по управлению рынком электроэнергии
Подходы к обеспечению надежности и безопасности энергосистемы	Ответственность за безопасность и надежность работы энергосистемы несет Национальная компания по управлению рынком электроэнергии управляющая ее ключевыми техническими характеристиками (частота, напряжение, загрузка сети, системный перезапуск и поддержание необходимых резервов)

Отличительные особенности модели электроэнергетического рынка Англии и Уэльса сгруппированы нами в табл. 2.

Таблица 2. **Особенности электроэнергетического рынка Англии и Уэльса**

Основные особенности	Характеристика
Состояние	Функционирование государственной монопольной структуры, включавшей Центральное агентство по производству электроэнергии (владело всеми генерирующими мощностями и передающими сетями, осуществляло оптовую продажу электроэнергии) и 12 региональных энергетических агентств (осуществляли монопольное распределение и продажу электроэнергии розничным потребителям на обслуживаемой территории). Государственное управление отраслью через Департамент энергетики, в функции которого входило также централизованное установление тарифов на электроэнергию
Год начала реформирования	1988 г.
Ведущие мотивы	Уменьшение роли государства в регулировании отрасли; создание конкурентной среды; обеспечение более высокой эффективности электроэнергетики

Окончание табл. 2

Основные особенности	Характеристика
Ключевые цели	Приватизация предприятий отрасли; отделение деятельности по производству электроэнергии от ее передачи и распределения; формирование Национальной передающей сети и региональных распределительных сетей
Основные направления и характер развития	Учреждение независимого регулятора («Управление рынков газа и электроэнергии») в сфере энергетики; формирование независимых генерирующих компаний при обеспечении необходимого импорта из Франции и Шотландии; переход передающих сетей под контроль Национальной передающей сети, а распределительных – региональных энергетических компаний; создание условий потребителям для выбора конкурирующих между собой поставщиков электроэнергии (региональных энергетических компаний, производителей, торговцев)
Роль государства	Отсутствие прямого участия государства, косвенный контроль за ценами и применением нормативно-правовых актов через независимую структуру «Управление рынков газа и электроэнергии»
Регулирующие органы	Системный оператор (Национальная энергопередающая организация), управляющий Национальной передающей сетью; агент по суммированию контрактных объемов электроэнергии, осуществляющий сбор и анализ информации о контрактных объемах поставки и потребления электроэнергии, заявках «на отклонение»; центр по расчету дисбалансов, выявляющий дисбалансы между плановым и фактическим объемом потребления и определяющий цены дисбалансов
Участники рынка	Генерирующие объекты; потребители; сбытовые компании
Сегменты рынка	Форвардный рынок; спотовый рынок; финансовый рынок, позволяющий страховать сделки на физическую поставку электроэнергии от изменений рыночной цены (фьючерсы, опционы, свопы)
Способы торговли	Применяются следующие способы торговли: прямые двусторонние контракты между поставщиками и потребителями; биржевая торговля электроэнергией
Подходы к обеспечению надежности и безопасности энергосистемы	Безопасность и надежность работы энергосистемы обеспечивается Национальной энергопередающей организацией, путем регулирования частоты, реактивной мощности, запуска электростанций в случае системной аварии, обеспечения необходимых резервов мощности

Функционирование электроэнергетического рынка Англии и Уэльса позволило достичь стабилизации оптовых цен на электроэнергию, снижения цен на розничном рынке, добиться роста генерирующих мощностей.

В результате проведения процессов реформирования рынок электрической энергии Германии стал самым конкурентным в Европе, было достигнуто

существенное снижение цен на электрическую энергию и, как следствие, на потребительские товары. Характеристика модели рынка электроэнергии Германии представлена в табл. 3.

Таблица 3. **Особенности формирования и функционирования рынка электрической энергии Германии**

Основные особенности	Характеристика
Состояние	Электроэнергетический сектор включал 9 региональных вертикально интегрированных компаний, совместно эксплуатировавших высоковольтную сеть, координировавших и планировавших работу своих электростанций; сети низкого напряжения находились в собственности региональных и локальных генерирующих компаний; имелись развитые электрические связи с европейскими странами
Год начала реформирования	1996 г.
Ведущие мотивы	Основным мотивом проведения реформ являлась необходимость повышения эффективности функционирования энергетической отрасли
Ключевые цели	Переход от регулируемого ценообразования к конкурентному; достижение посредством рыночных механизмов оптимального уровня генерирующих мощностей в энергосистеме; интеграция с рынками электроэнергии стран Европейского Союза
Основные направления и характер развития	Предоставление всем производителям электроэнергии открытого доступа к электросетям вертикально интегрированных компаний; финансовое и управленческое отделение производства и торговли электроэнергией от передачи и распределения без дезинтеграции вертикально интегрированных компаний; постепенное объединение вертикально интегрированных компаний
Роль государства	Установление минимальных требований о равном и недискриминационном доступе к электрическим сетям
Регулирующие органы	Отсутствует регулирующий орган, роль координирующего органа отведена Ассоциации немецких операторов сети, осуществляющей разработку нормативной базы и контроль за соблюдением правил рынка
Участники рынка	Транспортный системный оператор (включает 4 вертикально интегрированные компании), функциями которого являются: управление рынком; планирование режима производства и потребления электроэнергии и ее передача на напряжении 380–220кВ; распределение электроэнергии на напряжении 110–0,4 кВ; поставка электроэнергии потребителям (сбытовые подразделения вертикально интегрированных компаний); балансовые группы, включающие потребителей, электростанции, субгруппы (потребители и/или производители, делегирующие менеджерам балансовых групп полномочия по взаимодействию с системным оператором); менеджеры балансовых групп, представляющие собой крупные электростанции, потребителей или трейдеров, осуществляющие от имени участников рынка подачу транспортному системному оператору суточных графиков поставки-потребления электроэнергии и несущие коммерческую ответственность перед ним за дисбалансы

Окончание табл. 3

Основные особенности	Характеристика
Сегменты рынка	Рынок двусторонних контрактов на физическую поставку электроэнергии; рынок централизованной торговли (биржа) краткосрочными «на сутки вперед» и долгосрочными (месяц, квартал, год) контрактами; рынок централизованной торговли правами на пропускную способность межгосударственных линий электропередачи 220–380 кВ между субъектами из Нидерландов, Бельгии и Германии, осуществляющими экспорт и импорт; рынок системных услуг, предоставляемых оператором системы (регулирование частоты, напряжения, реактивной мощности, диспетчерское управление энергосистемой, резервирование мощностей, предотвращение и ликвидация аварийных ситуаций); рынок вспомогательных услуг, приобретаемых оператором системы (предоставление автоматически вводимого, холодного, вращающегося резервов мощности, компенсация реактивной мощности, регулирование напряжения в узлах энергосистемы); рынок финансовых инструментов хеджирования сделок по купле-продаже электроэнергии от изменений рыночной цены
Способы торговли	Двусторонние контракты на физическую поставку электроэнергии; биржевая торговля электроэнергией
Подходы к обеспечению надежности и безопасности энергосистемы	Транспортный системный оператор обеспечивает надежное и безопасное функционирование и централизованное балансирование энергосистемы

Менее успешные результаты были достигнуты в процессе реформирования электроэнергетического рынка Калифорнии в США. Итогом предпринятых действий стало возникновение в 2000 г. кризиса в электроэнергетике указанного штата, потребовавшего принятия мер по переходу к более жесткой централизованной модели рынка электроэнергии. Отличительные особенности модели электроэнергетического рынка Калифорнии представлены в табл. 4.

Таблица 4. **Особенности электроэнергетического рынка Калифорнии в США**

Основные особенности	Характеристика
Состояние	Доминирование трех вертикально интегрированных частных компаний, производивших и поставлявших две трети электрической энергии; функционирование крупных и мелких муниципальных энергокомпаний; недостаточная пропускная способность линий электропередачи в отдельных частях штата; регулирование деятельности энергокомпаний Комиссией по коммунальным предприятиям
Год начала реформирования	1996 г.
Ведущие мотивы	Основным мотивом проведения реформ стала необходимость снижения крайне высокой стоимости электрической энергии

Окончание табл. 4

Основные особенности	Характеристика
Ключевые цели	Создание условий для конкуренции на электроэнергетическом рынке
Основные направления и характер развития	Отделение деятельности по производству электроэнергии от ее передачи; ликвидация доминирования вертикально интегрированных частных компаний путем принудительной продажи их генерирующих мощностей независимым производителям энергии; предоставление потребителям права выбора поставщика электроэнергии; учреждение участниками рынка некоммерческого Независимого Системного Оператора; создание энергетической биржи в форме государственной некоммерческой организации
Роль государства	Принятие прямых и косвенных мер в случае кризисных ситуаций
Регулирующие органы	Независимый Системный Оператор осуществляющий: составление диспетчерских графиков по данным биржи и координаторов графиков; управление перегрузками в передающей электрической сети; управление рынком «реального времени»; организацию торговли вспомогательными и системными услугами; расчет дисбалансов; координацию графиков плановых отключений и ремонтов; долгосрочное планирование развития электрических сетей. Калифорнийская биржа электроэнергии, функции которой заключаются в проведении аукционов по купле-продаже электроэнергии; предоставлении Независимому Системному Оператору сбалансированных графиков поставки-потребления электроэнергии по результатам аукционов; информировании участников рынка о ценах на электроэнергию
Участники рынка	Производители: вертикально интегрированные компании; муниципальные энергетические компании; розничные поставщики; потребители; координаторы графиков, осуществляющие: расчет плановых балансов производства-потребления электроэнергии; предоставление Независимому Системному Оператору сбалансированных графиков поставки-потребления электроэнергии; координация деятельности генераторов и розничных продавцов на обслуживаемой территории
Сегменты рынка	Рынок «за день вперед»; рынок «за час вперед»; рынок «реального времени»; рынок вспомогательных услуг (формирование оперативных и эксплуатационных резервов; регулирование реактивной мощности; поддержание допустимых уровней напряжения; восстановление энергосистемы после аварий)
Способы торговли	Двусторонние контракты на куплю-продажу электроэнергии; биржевая торговля электроэнергией «за день вперед» и «за час вперед»
Подходы к обеспечению надежности и безопасности энергосистемы	Обеспечение надежности и безопасности энергосистемы входит в обязанности Независимого Системного Оператора

Примечание. Таблицы составлены автором на основе аналитического обзора источников [1–5].

В Республике Беларусь предпринимаются шаги в направлении построения рынка электрической энергии. В ходе проведения реформ в национальной электроэнергетической отрасли предстоит выполнить глубокую проработку позитивного и негативного мирового опыта, создать эффективный законодательный базис для осуществления трансформационных процессов, а также учесть особые характеристики сложившейся в стране модели энергообеспечения.

Заключение. Таким образом, проведенный анализ моделей формирования и функционирования электроэнергетических рынков зарубежных стран позволяет сделать следующие выводы: во-первых, наличие энергорынков является общемировой тенденцией; во-вторых, рынки электрической энергии разных странах имеют как схожие (сегменты рынка, способы торговли, подходы к обеспечению надежности и безопасности энергосистемы), так и особенные черты (ведущие мотивы, ключевые цели, основные направления и характер развития, роль государства, регулирующие органы, участники рынка); в-третьих, решение вопросов по переходу к конкурентному рынку электрической энергии в Республике Беларусь будет происходить в ближайшей перспективе.

Список использованных источников

1. Тукенов, А. А. Рынок электроэнергии: от монополии к конкуренции / А. А. Тукенов. – М. : Энергоатомиздат, 2009. – 416 с.

2. Мировой энергетический рынок и топливно-энергетический комплекс Беларуси / Л. П. Падалко [и др.]. – Минск : Право и экономика, 2011. – 196 с.

3. Конкурентные рынки оптовой и розничной электроэнергии в России / В. А. Андреев [и др.] ; под общ. ред. С. А. Баронина. – М. : ИНФРА-М, 2016. – 261 с.

4. Антонов, Г. Д. Управление конкурентоспособностью организации: учеб. пособие / Г. Д. Антонов, О. П. Иванова, В. М. Тумин. – М. : ИНФРА-М, 2012. – 300 с.

5. Гительман, Л. Д. Энергетический бизнес : учеб. / Л. Д. Гительман, Б. Е. Ратников. – Изд. 3-е. – М. : Дело АНХ, 2008. – 416 с.

References

1. Tukenov, A. A. Rynok elektroenergii: ot monopolii k konkurencii / A. A. Tukenov. – M.: Energoatomizdat, 2009. – 416 s.

2. Mirovoj energeticheskij rynok i toplivno-energeticheskij kompleks Belarusi / L. P. Padalko [et al.]. – Minsk : Pravo i ekonomika, 2011. – 196 s.

3. Konkurentnye rynki optovoj i roznichnoj elektroenergii v Rossii / V. A. Andreev [et al.] ; pod obshch. red. S. A. Baronina. – M. : INFRA-M, 2016. – 261 s.

4. Antonov, G. D. Upravlenie konkurentosposobnost'yu organizacii: ucheb. posobie / G. D. Antonov, O. P. Ivanova, V. M. Tumin. – M. : INFRA-M, 2012. – 300 s.

5. Gitel'man, L. D. Energeticheskij biznes : ucheb. / L. D. Gitel'man, B. E. Ratnikov. – Izd. 3-e. – M. : Delo ANH, 2008. – 416 s.

УДК 338.27

Liu Xueyao, Zhai Zhuang

THE PATHS OF SUSTAINABLE ENERGY DEVELOPMENT IN REGIONS OF CHINA

Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. This paper analyses the current state and problems of sustainable energy development in regions of China and proposes practicable development paths. The construction of symbiotic network with dematerialization is suggested.

Keywords: energy sustainability, ecology and environment, entropy weight method, paths of sustainable energy development, cross-regional energy deployment, symbiotic network with dematerialization.

Лю Сюэяо, Чжай Чжуан

ПУТИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ В РЕГИОНАХ КИТАЯ

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной статье анализируются текущее состояние и проблемы устойчивого развития энергетики в регионах Китая и предлагаются практические пути развития – создание симбиотической сети с дематериализацией.

Ключевые слова: энергетическая устойчивость, экология и окружающая среда, метод энтропийного веса, пути устойчивого энергетического развития, межрегиональное энергетическое развертывание, симбиотическая сеть с дематериализацией.

Introduction. The process of industrialisation in all countries around the world inevitably involves a huge demand for energy and environmental damage caused by pollution. China's industrialisation began in 1953 with a development strategy that prioritised heavy industry. As a result, China's industrialisation had a strong demand for energy and, in addition, the pollution problems associated with development were not given much attention for a while. Although the huge energy input at that time contributed to social construction and economic development, it caused varying degrees of disruption to the resources and environment in various regions of China. In the 1990s, sustainable development, as a new development mode that pursues economic growth in harmony with the ecology and environment, was positively received and practised in countries around the world. The essence of sustainable development is to coordinate the development of human and nature and to deal with the relationship between economic construction, population growth, the use of resources and ecological and environmental protection. Sustainable energy development requires a balance among energy security and supply, economic competitiveness and environmental sustainability. China is a vast country with regional differences in resource endowments, energy needs, social development and ecological conditions. There are differences in the status and direction of sustainable energy

development in each region. In recent years, with the advancement of cross-regional energy flows and the clustering of industries caused by a variety of factors, the differences in sustainable energy development among regions have been intensified. More people have begun to pay attention to and consider the future direction of sustainable development in regions with various characteristics in China [1, 2].

The current state and problems of energy sustainability in the regions of China. In order to understand the state of sustainable energy development in regions of China, we applied entropy weight method to calculate the energy sustainability index for each region. Energy sustainability is an integrated development issue, associated with energy security and supply, economic competitiveness and ecology. From these three aspects, we select nine indicators to measure the level of sustainable energy development of the regions. The specific indicators and their explanations are shown in Table 1 [3–6].

Table 1. **Indicators for energy sustainability index**

Factor	Indicator	Explanation
Energy secure and supply	Proportion of dominant energy	Proportion of main energy consumption and total energy consumption
	Proportion of self-owned energy	Share of self-owned energy to total energy consumption
	Ratio of energy export and import	Ratio of export of main exported energy to import of main imported energy
Economic competitiveness	Share of the investment in energy	Share of investment in energy industry to total investment
	Share of output in energy sector	Share of value created by the energy industry to GDP
	Employment	Share of employed to total population
Ecology	Share of CO_2 emission in energy sector	Proportion of CO_2 emission in energy industry and total CO_2 emission
	Forest coverage	Share of the forest area to the total area
	Share of clean energy	Share of clean energy generation to total energy generation

Based on the indicators, we applied the entropy weight method to calculate the energy sustainability index in regions of China. The specific calculations are as follows.

(1) Standardisation of data.

For positive indicators:

$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{1j},\ldots,x_{nj})}{\max(x_{1j},\ldots,x_{nj}) - \min(x_{1j},\ldots,x_{nj})}.$$

For negative indicators:

$$x_{ij} = \frac{\max(x_{1j},\ldots,x_{nj}) - x_{ij}}{\max(x_{1j},\ldots,x_{nj}) - \min(x_{1j},\ldots,x_{nj})},$$

x_{ij} is the value of indicator j in region i; $i \in [1,n]$, $j \in [1,n]$. For convenience, the non-negative data standardized are noted as x_{ij}.

(2) Calculate the proportion p_{ij} of indicator j in region i.

$$p_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} X_{ij}}$$

(3) Calculate the entropy e_j for indicator j.

$$e_j = -\left(\frac{1}{\ln n}\right)\sum_{i=1}^{n} p_{ij} \ln\left(p_{ij}\right), \quad 0 \le e_j \le 1.$$

(4) Calculate the coefficient of variation λ_j of indicator j.

$$\lambda_j = 1 - e_j.$$

(5) Calculate the weights w_j for each indicator.

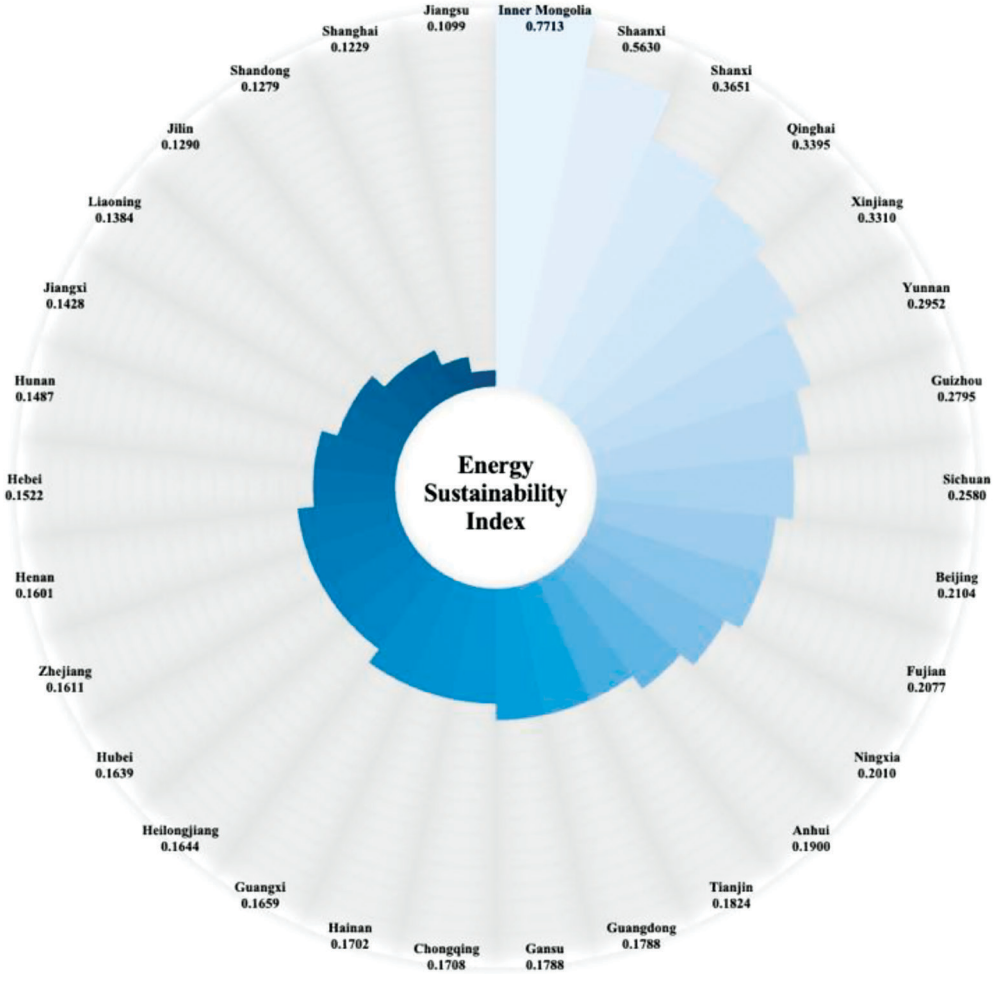
$$w_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{m} \lambda_j} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^{m} (1 - e_j)}.$$

(6) Calculate the energy sustainability index u_i for region i.

$$u_i = \sum_{j=1}^{m} w_j \cdot X_{ij}.$$

Based on the methodology, we calculate the energy sustainability index for each region of China with raw data from 30 Chinese provinces for 2019 and plot their index as shown in Figure.

The figure shows that the level of energy sustainability is not high in all regions of China and varies significantly across regions. In general, resource-based regions have higher levels of energy sustainability, such as Inner Mongolia, Shaanxi, Shanxi, Xinjiang and Guizhou. The possible reason for this is that resource-based regions can ensure the security and stability of energy supply. And as most of the resource-based regions in China are located in remote and peripheral areas, their social development is relatively backward and other industries are lagging behind, which makes these regions rely on the energy industry to sustain their economic development. As a result, there exists a flow of investment and labour to the energy sector in these regions, and the energy sector generates a relatively large share of gross regional domestic product. There are structural contradictions of industry with the industrial lock-in effect in these regions. Influenced by industrial lock-in effect, these regions are lagging behind in the development of high-tech industries and lack technological innovation to improve energy exploitation efficiency, utilisation efficiency and pollutant conversion technology. Consequently, their energy utilization is inefficient and there is serious energy waste. The traditional economic development mode in resource-based regions in China is a resource-dependent 'black' development mode, characterised by 'high exploitation, low utilisation and high emission'. Some resource-based regions have weak environmental regulations and fewer restrictions on pollutant emissions. This has resulted in increasing ecological damage caused by pollutant emissions



Energy sustainability index

in these areas. Overexploitation and waste, as well as ecological damage, may pose the risk of mineral depletion in resource-based regions.

Some of the more economically developed provinces in central or coastal areas have poor levels of energy sustainability, such as Jiangsu, Shandong, Henan and Zhejiang. This is because most provinces in China do not possess energy endowments, except for the traditional resource-based regions. Their energy needs are mainly met by energy supplies from other regions. These regions are therefore exposed to greater energy risks and have to strengthen their ties with other regions to encourage cross-regional energy deployment projects to maintain a stable energy supply. For other less developed and remote regions without resource endowments, they are faced with even more serious energy sustainability issues. On the one hand, they do not have the energy endowments to meet the energy needs and sustain their social development, and on the other hand, due to their remoteness and undeveloped economy, it is difficult to create and manage

complex and stable cross-regional energy deployment projects. In addition, the isolated location also makes information exchange with other regions difficult, and the lack of transportation network raises transport costs.

Paths of sustainable energy development. There are significant regional differences in China, with each province having different characteristics in energy sustainability. A variety of factors have contributed to the fact that current energy sustainability programmes throughout China are not well developed and the impetus for practical implementation is still absent. However, the issue of sustainable energy development in China is now an urgent one. In order to avoid a energy threat and to maintain normal economic and social development, implementing sustainable energy policies and accelerating sustainable energy development has become a major concern in China today.

For resource-based regions, strengthening energy sustainability begins with transforming the traditional development mode, characterised by 'high exploitation, low utilisation and high pollution'. In these regions, the efficiency of energy exploitation and utilization needs to be improved. Energy waste needs to be avoided through policy, market and technological innovations. The local government can strengthen the inspection to avoid wasting energy in the mining process. And they should further deepen the reform of the resource property rights system. In the absence of a clear definition of property rights for such public goods as natural resources, the tragedy of the commons has occurred from time to time. The rational division of rights and responsibilities over natural resources is of great importance for the sustainable energy development in resource-based regions. With market regulation, the government can also raise the price of raw ore to urge mining enterprises to minimise energy waste in the mining process. Reasonable price of natural resources will not only effectively drive the reduction of energy input by industrial enterprises and change the extensive economic growth characterised by excessive input of resources, but also enhance the awareness of energy saving in society as a whole. Most importantly, appropriate industrial restructuring will gradually promote the development of other industries, break the industrial lock-in effect and change the current predicament in resource-based regions. The pollution problem in resource-based regions also requires the government to impose strict environmental regulations to limit the pollutant emissions of major enterprises. It is necessary for major enterprises to increase or attract investment in the introduction or development of advanced pollutant conversion technologies, as well as multi-stage energy use and recycling technologies. This will not only solve the problem of pollutant emissions under regional environmental regulations, but will also reduce the material input of enterprises with recycling technologies and cut operating costs. The demand for green technology by resource-based enterprises will also drive the development of endogenous innovation capabilities.

As for other regions without resource endowments, the key to improving energy sustainability lies in strengthening connections with other regions to ensure an adequate and stable energy supply. This requires a good infrastructure for cross-regional energy deployment and a good exchange of information among regions. Particularly for remote

or economically underdeveloped regions, the integration into energy association network and the maintenance of timely information exchange among regions would be the main focus. Most regions in China are not endowed with resources. A few regions act as suppliers of energy and the practical risk should be high. Therefore, the establishment of comprehensive energy association network and the enhancement of energy deployment capabilities are the main ways to ensure sustainable energy development in most regions of China. In addition, China's primary energy production is dominated by raw coal and, secondly, crude oil. In order to achieve the goal of improving energy sustainability in the provinces and to reduce the possibility of exposure to internal energy risks, regions could make appropriate use of alternative energy, such as imported natural gas or electricity. And, at the same time, these regions should pay attention to improve the energy efficiency and reduce energy intensity. Some technologically advanced provinces can improve the energy efficiency through technological innovation. And there should be a call for the reduction of energy waste in daily lives.

China as a whole should make integrated arrangements and take advantage of its strengths to create a trend of common development on energy sustainability regions across the country. The construction of symbiotic network with dematerialization will become an effective path to enhance the overall sustainable energy development in China. Dematerialisation refers to the reduction of material consumption and waste emissions per unit of economic output. It is a new development mode proposed to alleviate the increasingly prominent contradiction between economic and social development and resource deficiency as well as environmental pollution. It emphasizes the reduction of inputs and the optimisation of outputs through technological reform and innovation, as well as the control over the total amount of inputs and the flow rate of natural capital in production. The aim of the symbiotic network is to ensure a stable supply of energy to all regions of the country and to realise the multi-stage use and recycling of energy. It is not only about the construction of transportation network, but also about the construction of information exchange platforms. First of all, the construction and optimization of the symbiotic network will facilitate the development of cross-regional energy deployment projects and realize a more stable and efficient supply of energy across the country, including the provinces in the peripheral areas. In addition, the construction of symbiotic network will promote the development of multi-stage use and recycling of energy, and thus increase energy efficiency. Due to a variety of factors, there could be aggregation of particular enterprises in the geographical distribution. The symbiotic network will enable the exchange of by-products between a variety of enterprises in different regions. These enterprises can reduce their waste treatment costs and at the same time generate additional income. And the pollution problems in the resource-based provinces, which are in a central position in the symbiotic network, will lead to an increased national demand for pollution transformation industries, and clean production technology industries. The construction of symbiotic network will increase investment in these industries and facilitate their development and growth. In addition, in order to ensure the effective operation of the symbiotic network, information services should be provided. The timely

dissemination of information on policy, technology, by-product exchange, resource deployment and waste treatment are crucial to the effectiveness of the network. The information platform should connect government, enterprises and research institutes to enhance the efficiency and effectiveness of the symbiotic network.

Conclusion. This paper applies the entropy weight method to calculate and analyses comprehensive energy sustainability index for 30 provinces in China. As the results tell, the level of energy sustainability is not high in all regions of China and varies significantly across regions. In general, resource-based regions have higher levels of energy sustainability. While, some of the more economically developed provinces in central or coastal areas have poor levels of energy sustainability. For resource-based regions, the main problem lies in the difficulty of transforming the traditional 'black' economic development mode. The phenomenon of high exploitation, high pollution and low utilisation cannot be curbed. The lack of development in other industries has left these regions exposed to industrial lock-in effect. For most other regions without resource endowments, the key factor influencing energy sustainability is the dependence on other regions. The dependence could increase the risk of energy shortages in these regions, especially in remote and economically underdeveloped regions.

In order to further realize the sustainable energy development in each region in China, different regions should adopt different targeted measures. For resource-based regions, local government should reinforce the regulation on mining activities to avoid energy wastage. With the aim of clarifying energy rights and responsibilities, a reform in the property rights system of resources needs to be further promoted by the government. With market dominance and government coordination, resource-based regions should optimize the pricing mechanism for natural capital. At the same time, the government should also adjust the local industrial structure, trying to avoid the plight of industrial lock-in. Resource-based enterprises should shoulder the responsibility of being the major technology innovator, actively introducing and developing energy-saving technologies and pollution transformation technologies. For other regions without energy endowments, improving energy sustainability lies mainly in enhancing energy cooperation with other regions or introducing and using a variety of alternative energy to reduce the possibility of confronting an energy crisis. From the perspective of nationwide sustainable energy development, the construction of a symbiotic network with dematerialization would effectively solve the energy and pollution problems of each region. The symbiotic network with dematerialization will not only reduce energy input and pollution output and improve energy efficiency through multi-stage use of energy, but will also promote the development and operational efficiency of cross-regional energy deployment projects and encourage the development of additional industries.

References

1. Zhang, H. P. Study on sustainable development of provincial energy systems in China / H. P. Zhang, Y. H. Li // Environmental science and management. – 2022. – Vol. 47, № 3. – P. 178–183.

2. Liu, C. Y. Waste to energy closed-loop supply chain: Recycling energy supply, collaborative operation and sustainability / C. Y. Liu, H. M. Yang // Transactions of the Chinese society of agricultural engineering. – 2021. – Vol. 37, № 10. – P. 182–191.

3. Shen, L. Regional differences and influencing factor for sustainable energy development of China / L. Shen, L. T. Liu // China population, resources and environment. – 2010. – Vol. 20, № 1. – P. 17–24.

4. Anderies, J. M. Economic Development, demographics, and renewable resource: a dynamical systems approach / J. M. Anderies // Environment and development economics. – 2003. – Vol. 45, № 8. – P. 219–246.

5. Giuseppe, D. V. Renewable resources and waste recycling / D. V. Giuseppe // Environmental modelling and assessment. – 2005. – Vol. 4, № 1. – P. 159–167.

6. Zhang, X. Y. A study on the economic development model of resource-based regions according to ecological economics / X. Y. Zhang. – Shanxi, 2015.

УДК 338.27

Yang Zhuxi

THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF CHINA'S ENERGY

Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The sustainable development of China's society and economy is first and foremost the sustainable development of energy. Studying how to solve and implement the problem of sustainable energy utilization is the fundamental guarantee for realizing the healthy and sustainable development of China's economy and society.

Keywords: sustainable energy, sustainable energy utilization, low-carbon economy.

Ян Чжуси

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ КИТАЯ

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Устойчивое развитие общества и экономики Китая – это прежде всего устойчивое развитие энергетики. Изучение способов решения и реализации проблемы устойчивого использования энергии является фундаментальной гарантией здорового и устойчивого развития экономики и общества Китая.

Ключевые слова: устойчивая энергетика, устойчивое использование энергии, низкоуглеродная экономика.

Introduction. Energy is not only an important and indispensable material basis for economic development and social life, but also an important source of pollution in reality. Solving the problem of China's sustainable energy development strategy is an important link to realize the sustainable development of our society. Research shows that China's sustainable development energy strategy should consider at least two aspects: one is how to ensure an economical and reasonable sustainable energy supply and efficient use; the other is how to solve the environmental problems related to the energy process at the same time.

Result and discussions. Since the 1980s, in the face of the rapid economic development brought about by reform and opening up, China's energy supply has been unable to meet the rapidly growing domestic demand, and at the same time, remarkable

achievements have been made in energy conservation. Since the initial establishment of the market economy, China's energy supply and demand relationship has undergone major changes, and energy prices have been adjusted through reforms to basically reflect the marginal cost of energy in the market.

At present, under the new market conditions, solving energy shortages is no longer the driving force for saving energy and improving energy efficiency. On the one hand, some energy supply sectors in China need to open up new consumer markets due to excess supply capacity, in order to stimulate the motivation and practice of energy consumption, and strive to gain a larger market share and economic interests; The concern and practical impact of economic benefits and related social issues are greater than the calls for energy conservation. That is to say, China's concern for long-term energy balance and energy security is difficult to organically link with short-term, direct economic operation interests.

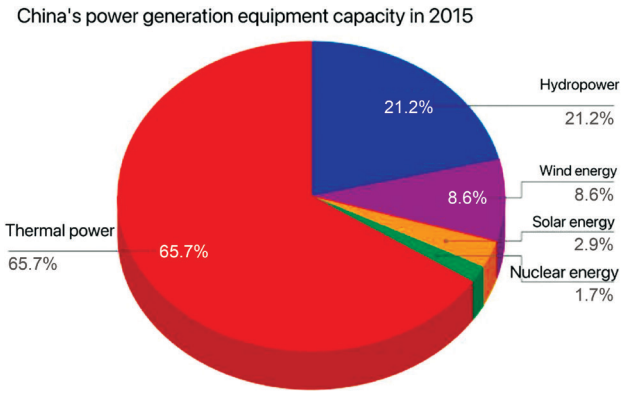
In this way, the functions and effects of China's original energy-saving management systems and mechanisms are challenged. The improvement of China's energy efficiency cannot rely solely on market mechanisms. After joining the WTO, China's labor costs may remain competitive for a long time, but resource costs, including land prices, especially energy costs, will not be competitive.

It can be foreseen that if China can truly achieve the goal of modernization by the middle of this century, China will face major energy challenges. At the current stage, it is still necessary to take appropriate policy measures in addition to the natural role of the market economy to raise the public's awareness of resource crises. China also needs to consider the design and implementation of sustainable consumption patterns at an early stage [1–3].

The first part: adapt to the changing trend of terminal energy demand and realize the transformation of energy structure.

China's energy structure has long been dominated by coal, which is an important cause of low energy efficiency and serious environmental pollution. In recent years, changes in the structure and total amount of China's terminal energy demand, as well as environmental protection requirements starting from central cities, make optimizing the primary energy structure an important trend in energy development. However, the rapid growth of oil imports, coupled with the sharp rise in international oil prices, have made China's energy supply security a concern from many parties. China's response to this is to actively develop natural gas energy. However, for China, the development and utilization of natural gas needs to rebuild the long-distance transportation infrastructure of natural gas on a large scale. For China, which covers a large area and has uncoordinated development between regions, whether the optimization of the energy structure can be realized still remains to be seen. There is uncertainty.

In the current century, oil and natural gas will still be the main energy sources in the world, especially the development of natural gas is in the ascendant. China's natural gas foundation is relatively weak. During the period of forming a natural gas infrastructure network, a large amount of government investment and policy support are required.



China’s power generation equipment capacity in 2015

The second part: Proceed from the actual situation, implement the clean utilization of coal.

There is no contradiction between optimizing the energy structure and making full and rational use of China’s coal resources. In the process of optimizing China’s energy structure, coal may withdraw from some fields of use, but the status of coal in China’s energy will still be very important. In the sustainable development of energy strategy, the use of coal must first solve the corresponding environmental pollution problems.

From the perspective of the development trend of the world energy system, the main application of coal in the future is still power generation. Starting from the actual situation in China, the clean utilization of coal should first solve the problem of air pollution caused by coal burning. Among them, the desulfurization problem of coal-fired power plants should be solved first. The vaporization and liquefaction of coal may serve as a long-term technical reserve. If considering coal as raw material to provide liquid or gas fuel, it must comprehensively analyze and evaluate its economic feasibility, and also consider the environmental impact of the whole process. In addition to this, the overall efficiency of the energy system must also be considered. On the other hand, the imminent constraints of global climate change will gradually make the use of coal severely constrained by carbon emissions. These factors must be fully considered in the development and future application of coal gasification and liquefaction technology.

The third part: Hydro power and nuclear power should implement long-term development plans and use clean energy

China’s oil and natural gas resources are very limited relative to the population. In the future final energy consumption structure, the proportion of electricity will continue to expand. China may have to make electricity a higher share of final energy than countries where oil and gas are relatively cheap. There should be a long-term plan for the power generation energy structure to avoid temporary and lack of system planning options.

First of all, we must use water resources as much as possible. China's hydropower resources are very rich, but the current utilization rate is very low, which also shows that China's hydropower resources have great potential for development. In fact, China's hydropower projects can be combined with flood control, drought resistance, and agricultural irrigation to achieve greater comprehensive social and economic benefits. Of course, the construction of hydropower dams may have an impact on the ecological environment of the river basin, which needs to be fully and properly considered in the design and construction of dams. China is taking the necessary steps to minimize these adverse effects. If the huge comprehensive social and economic benefits of hydropower are taken into account, the advantages of hydropower development are even more prominent.

On July 8, 2021, the International Energy Agency's "Natural Gas Analysis and Outlook 2021–2024" report conference was held in Beijing. Wang Jing, deputy director of the Petroleum and Natural Gas Department of the National Energy Administration, said at the meeting that the "China Natural Gas Development Report (2021)" white paper prepared by the Petroleum and Natural Gas Department of the National Energy Administration was released recently. The white paper had previously been published for five consecutive years. On August 21, 2021, the National Energy Administration and other departments released the "China Natural Gas Development Report (2021)". According to the "Report", the framework of the "one national network" of natural gas has initially formed, and the main pipeline network has covered all provinces except Tibet. Natural gas supply in key areas such as coastal areas. China's diversified natural gas supply system continues to improve, and the "one network for the whole country" has basically taken shape.

Nuclear power is a reliable and clean energy source, and the safety of nuclear power in China has reached a very high level. The development of nuclear power is also in line with China's strategic direction for sustainable energy development. From a long-term perspective, developing nuclear power is an inevitable choice for China to adjust its energy structure, ease the pressure on conventional energy supply and achieve the goal of reducing greenhouse gas emissions. Under the current background of China's accelerated economic transformation, coal and other fossil fuels cannot solve the problems of tight power supply and pressure on energy conservation and emission reduction. New energy sources such as wind power and solar energy are restricted by factors such as geographical environment, climatic conditions and erection of lines. In the process of national economic development, it can only play a supplementary and regulatory effect, and it is difficult to play a major role. In addition, the hydropower stations on China's major rivers are basically saturated, and the development potential of hydropower resources has been very limited. The choice of nuclear power with clean and efficient energy is an inevitable trend in China's energy development.

The forth part: Promote environmental protection and create necessary external conditions for the implementation of sustainable energy strategies.

Environmental protection is a basic point of sustainable development in China, and it is also one of the basic driving forces to promote the development of energy technology. Currently in developed countries, environmental protection requirements have become an important factor in determining energy structure and thus energy costs. In order to realize the energy strategy of sustainable development, China fully considers the needs of environmental protection in all aspects of energy development. In order to improve energy utilization efficiency and achieve coordinated development of energy utilization and environmental protection, China has taken the following measures and achieved remarkable results:

First, pay attention to the conservation and utilization of energy. Since the 1980s, China has put forward an energy policy that places equal emphasis on development and conservation. Since the 1990s, it has placed energy conservation as a priority in energy policy, and accordingly formulated a series of economic and technical policies related to energy conservation. Central, local and industry, enterprise three-level energy-saving system. It can be said that energy saving is also an effective measure for environmental protection and greenhouse gas emission reduction. Second, encourage the development of new energy and renewable energy. China has given financial subsidies and support to the scientific and technological development, engineering demonstration, and application of new and renewable energy; it has also provided discounted loans for the development and utilization of small hydropower and wind power, and implemented tax incentives and protective price policies. Wait. Driven by these measures, the energy consumption structure has been continuously optimized and the quality of energy supply has been improved. Third, promote rural energy construction. The Chinese government has always attached great importance to rural energy construction. Since the early 1980s, various large-scale demonstration projects such as primary electrification counties based on small hydropower, key biogas counties, and pilot counties for saving firewood have been carried out and widely promoted [4].

Conclusions. It is believed that as long as the strategic direction of energy development and utilization is well selected and unswervingly implemented, China can effectively solve the challenges of various energy and environmental problems in the new century. There is no doubt that achieving coordinated development of economy, energy and environment, preventing possible environmental risks, and promoting sustainable economic and social development is a major issue that China and other countries in the world face in development in the 21st century. This problem cannot be solved by one country. It requires countries to cooperate and coordinate actions to jointly contribute to the reduction of global greenhouse gas emissions and the protection of the global ecological environment.

Judging from China's successful experience, it is most important for Belarus to face up to its own national conditions and find the most suitable sustainable development method for itself. The government should also give certain support and help in the process of realizing the sustainable development of energy.

References

1. Meng, H. Energy and CO2 Emissions Status, the Counter measures to Slow Down Climate Change in the United Kingdom and Their Enlightenment to China / H. Meng, Y. Chen // Chinese Soft Science. – 2010. – P. 25–35.

2. Wang, C. An indicator approach to industrial sustainability assessment: the case of China's capital economic circle / C. Wang, L. Wang, S. Dai // Journal of clean production. – 2018. – Vol. 194. – P. 473–482.

3. Yu, Y. L. On a sustainability indicator system for regional energy development / Y. L. Yu, D. Q. Zhao, Y. Chen // China opening journal. – 2011. – P. 63–66.

4. A Research on evaluation of the decision-making efficiency for governance and optimization of regional ecological economy / W. B. Jiang [et al.] // Science research management. – 2018. – P. 40–49.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

УДК 357+544.653.1:546

Г. А. Вардан

ЭЛЕКТРОМЕМБРАННЫЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ГИПОХЛОРИТА НАТРИЯ

НПО «Экоатом», Ереван, Республика Армения

Аннотация. Способ получения гипохлорита натрия, при котором водный раствор хлорида натрия подвергается электрохимическому растворению с получением водного раствора гидроксида натрия и газообразного хлора, затем они подвергаются взаимодействию, отличается тем, что электрохимическое разложение осуществляется в трехкамерном электродиализаторе, выделенный из анолита (анодный раствор) газообразный хлор непосредственно перемешивают с католитом (водный раствор гидроокиси натрия).

Ключевые слова: гипохлорит натрия, трехкамерный электродиализатор, хлор, гидроксид натрия.

G. A. Vardan

ELECTROMEMBRANE METHOD FOR PRODUCING SODIUM HYPOCHLORITE

NPO «Ecoatom», Yerevan, Republic of Armenia

Annotation. The method for producing sodium hypochlorite, according to which an aqueous solution of sodium chloride is subjected to electrochemical dissolution to obtain an aqueous solution of sodium hydroxide and gaseous chlorine, then they are interacted, differs in that electrochemical decomposition is carried out in a three-chamber electrodialyzer, gaseous chlorine separated from the anolyte (anode solution) directly mixed with catholyte (aqueous sodium hydroxide solution).

Keywords: sodium hypochlorite, three-chamber electrodialyzer, chlorine, sodium hydroxide.

Введение. Работа относится к области электрохимии, в частности, к электромембранным способам получения гипохлорита натрия и может быть использована также для получения гипохлоридов других основных металлов [1, 2].

Гипохлорит натрия является одним из самых востребованных продуктов на мировом рынке [3].

Промышленное и бытовое использование гипохлорита натрия включает в себя (рис. 1):

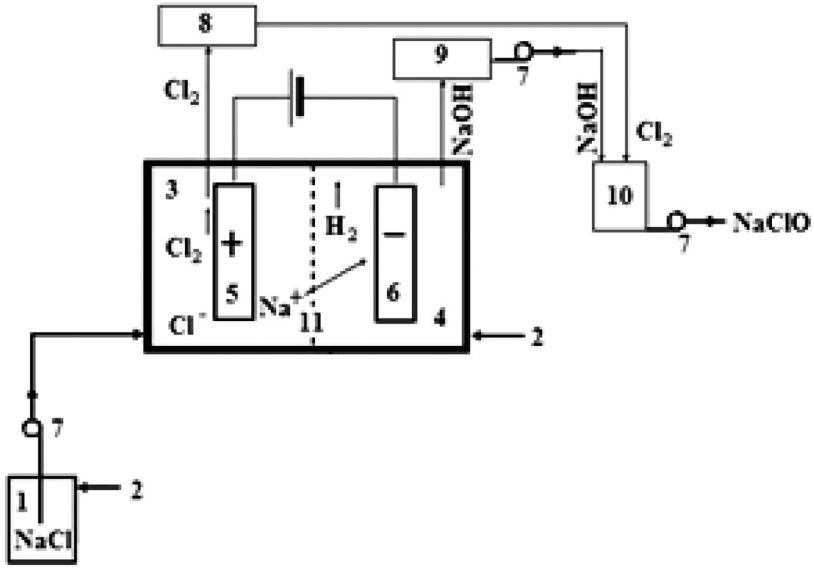


Рис. 1. Принципиальная схема традиционного электромембранного способа получения гипохлорита: *1* – бак раствора хлорида натрия; *2* – смягченная вода; *3* – анодная ячейка; *4* – катодная ячейка; *5* – анод; *6* – катод; *7* – насос; *8* – баллон хлора; *9* – бак раствора гидроокиси натрия; *10* – бак раствора гипохлорида натрия; *11* – диафрагма (или ионообменная мембрана)

использование в качестве средства для дезинфекции и антибактериальной обработки;

использование для отбеливания тканей;

химическое растворение санитарно-технических отложений.

промышленное отбеливание ткани, древесной массы и некоторых других продуктов;

промышленная дезинфекция и санитарно-гигиеническая обработка;

очистка и дезинфекция питьевой воды для систем коммунального водоснабжения;

очистка и обеззараживание промышленных стоков;

химическое производство.

Материалы и методы исследования. В работе способ получения гипохлорита натрия представляет собой следующий процесс: в катодной камере (*4*) в качестве католита используется предварительно смягченная вода, такой же водой в баке (*1*) подготавливается раствор хлорида натрия (плотностью 50–100 г/л) и закачивается в анодную камеру. Катодная и анодная камеры разделены между собой ионообменной мембраной или диафрагмой.

В действительности, во время электролиза обеспечивается непрерывное перемешивание электролита, что способствует уменьшению нецелевых потерь хлора и интенсификации электродных реакций. Процесс осуществляется при температуре 20–25 °С и высокой плотности электрического тока [4, 5].

Образовавшийся хлор собирается в (*8*), а гидроокись натрия в (*9*) тарах, затем они определенным образом перемешиваются между собой для образования гипохлорита и накапливаются в предусмотренном для этого баке (*10*). В качестве металла для катода используется сталь, а анода титан с покрытием из окиси рутения или иридия.

Цели изобретения – повышение эффективности способа получения гипохлорита натрия, безопасность и степень чистоты конечного продукта.

Суть работы заключаетася в том, что из водного раствора хлорида натрия (NaCl) получающиеся гидроокись натрия (NaOH) и газообразный хлор образуются в разных камерах и вступают во взаимодействие в водокольцевом насосе вследствие специально организованного процесса, при котором для обеспечения разреженности газа в среде, вместо воды, циркулирует католит трехкамерного электродиализатора.

На рис. 2. показана принципиальная схема процесса, с помощью которого предлагаемым способом осуществляется получение гипохлорита натрия из водного раствора хлорида натрия.

Водный раствор хлорида натрия (*1*) с помощью насоса (*4*) с определенной скоростью циркулирует по рабочей камере трехкамерного электродиализатора (*8*). В качестве католита и анолита используется смягченная вода, первый из которых с помощью водокольцевого насоса (*5*), в котором вместо воды используемый католит, осуществляет циркуляцию, проходя через катодную камеру (*7*) и бак (*2*), создавая разрежение в баке (*3*), находящемся в анодном циркуляционном контуре и внедряя, при этом, освободившийся газообразный хлор в католит, а второй, с помощью насоса (*6*) циркулирует проходя по анодной камере (*9*) и баку (*3*).

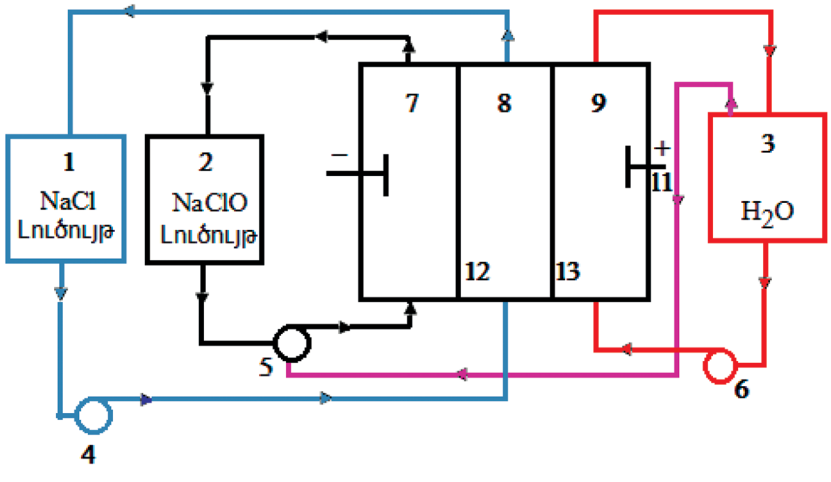


Рис. 2. Принципиальная схема предлагаемого электромембранного способа получения гипохлорита натрия: *1* – бак раствора хлорида натрия; *2* – бак раствора гипохлорида натрия; *3* – смягченная вода; *4*; *6* – насос; *5* – водокольцевой вакуумный насос; *7* – катодная ячейка; *8* – рабочая камера электродиализатора; *9* – анодная ячейка; *10* – катод; *11* – анод; *12* – катионообменная мембрана; *13* – анионообменная мембрана

Предлагаемый способ не требует раздельного накопления и хранения газообразного хлора и водного раствора гидроокиси натрия в процессе производства, что резко повышает уровень безопасности. Создается возможность упрощенного контроля плотности и степени чистоты конечной продукции. В результате турбулентного снабжения ионов снижается энергоемкость процесса, благодаря чему повышается эффективность процесса по сравнению с прототипом [6].

Эффективность в этом случае выражается в том, что та же производительность гипохлорита в предлагаемой системе по сравнению со способом электролиза достигается при более меньших размерах и более низких производственных затратах.

Пример 1.

Бак (*1*) установки приведенной на рис. 2, заполняется водным раствором NaCl концентрацией 25 г/л, откуда он с помощью насоса со скоростью 50 л/ч закачивается в рабочую камеру электродиализатора.

Параметры трехкамерного электродиализатора:

напряжение	10в;
тип мембран	mk-40, ma-40;
площадь мембран	225 см^2;
расстояние между мембранами	0,8 см.

В качестве катода используется нержавеющая сталь, а анода – титан, покрытый окисью рутения. Емкость баков (*1*, *2*, *3*) 2 л.

В результате работы при плотности тока 4 А/дм^2 в течение 1 часа вырабатывается и накапливается в катодном баке (*2*) 2 литра 20 %-ного водного раствора гипохлорита натрия.

Схема, представляющая производство гипохлорита натрия, показана на рис. 3.

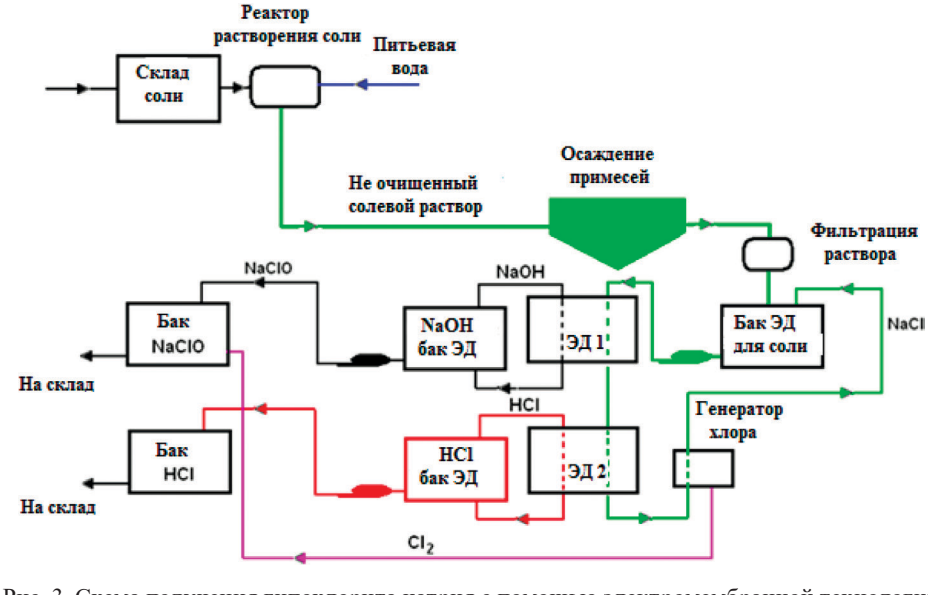


Рис. 3. Схема получения гипохлорита натрия с помощью электромембранной технологии

Заключение. Технология производства гипохлорита натрия (NaClO) на месте основана на новой технологии электродиализа хлорида натрия. Сначала соль растворяется чистой водой в специальном реакторе, рассол направляется в реактор, где осаждаются нерастворенные примеси, и раствор дополнительно очищается с помощью фильтра, а затем поступает в специальный резервуар. Из этого бака раствор закачивается в электродиализатор и под действием электрического потенциала диссоциирует на ионы Na^+ и Cl^-, которые разделяются ионообменными мембранами, после чего образуется гидроксид натрия и хлорсодержащий газ. Гидроксид натрия накапливается в специальном баке и перекачивается в генератор NaClO. Газообразный хлор перемещается в другой (нижний) электродиализатор, где формируются соляная кислота и хлорид натрия. Хлор производится в специальном генераторе и перекачивается в бак для гипохлорита натрия, а полученная чистая соляная кислота хранится баке для HCl для различных областей применения. Как известно, традиционный способ производства NaClO основан на смешивании раствора NaOH с газообразным хлором. Однако предлагаемый новый метод позволяет производить дополнительно HCl. Согласно этой схеме, если необходимо получение соляной кислоты, то выключается источник питания генератора хлора и включается электродиализатор для производства HCl. В случае, когда нужно получить NaClO, выполняется противоположная операция, то есть выключается электродиализатор для производства HCl и включается генератор хлора.

Список использованных источников

1. Способ получения хлора и хлорсодержащих окислителей и установка для его осуществления : пат. RU 2315132C2 / А. Д. Рябцев, Н. М. Немков, В. И. Титаренко, Е. В. Мамылова, В. М. Низковский, Е. В. Низковский, П. М. Постников, Г. Н. Шумаков. – Опубл. 20.01.2008.

2. Method and apparatus for water treatment [Electronic resource]: pat. US 6547947B1/ U. Masaharu, W. Shuhei, S. Nakamatsu, Y. Nishiki. – Publ. date: 15.03.2000. – Mode of access : https://patentimages.storage.googleapis.com/71/aa/fb/d7604cddedfe63/US6547947.pdf. – Date of access : 12.02.2022.

3. Натрия гипохлорит // Химическая энциклопедия : в 5 т. ; гл. ред. И. Л. Кнунянц. – М. : Сов. энцикл., 1992. – Т.3. – С. 355.

4. Хлорные дезинфектанты и их применение в современной водоподготовке / А. Б. Швецов [и др.] // Молекулярные технологии. – 2009. – № 3. – С. 98–121.

5. Фурман, Л. А. Гипохлорит натрия / Л. А. Фурман // Хлорсодержащие окислительно-отбеливающие и дезинфицирующие вещества. – М. : Химия, 1976. – Гл. 3. – С. 48–57.

6. Ronco, C. Disinfection by Sodium Hypochlorite: Dialysis Applications / C. Ronco, G. J. Mishkin // Contributions to nephrology. – 2007. – Vol. 154. – 157 p.

References

1. Sposob polucheniya hlora i hlorsoderzhashchih okislitelej i ustanovka dlya ego osushchestvleniya : pat. RU 2315132C2 / A. D. Ryabcev, N. M. Nemkov, V. I. Titarenko, E. V. Mamylova, V. M. Nizkovskij, E. V. Nizkovskij, P. M. Postnikov, G. N. Shumakov. – Opubl. 20.01.2008.

2. Method and apparatus for water treatment [Electronic resource]: rat. US 6547947B1/ U. Masaharu, W. Shuhei, S. Nakamatsu, Y. Nishiki. – Publ. date: 15.03.2000. – Mode of access : https://patentimages.storage.googleapis.com/71/aa/fb/d7604cddedfe63/US6547947.pdf. – Date of access : 12.02.2022.

3. Natriya gipohlorit // Himicheskaya enciklopediya : v 5 t. ; gl. red. I. L. Knunyanc. – M.: Sov. encikl., 1992. – T. 3. – S. 355.

4. Hlornye dezinfektanty i ih primenenie v sovremennoj vodopodgotovke / A. B. Shvecov [et al.] // Molekulyarnye tekhnologii. – 2009. – № 3. – S. 98–121.

5. Furman, L. A. Gipohlorit natriya / L. A. Furman // Hlorsoderzhashchie okislitel'no-otbelivayushchie i dezinficiruyushchie veshchestva. – M. : Himiya, 1976. – Gl. 3. – S. 48–57.

6. Ronco, C. Disinfection by Sodium Hypochlorite: Dialysis Applications / C. Ronco, G. J. Mishkin // Contributions to nephrology. – 2007. – Vol. 154. – 157 p.

УДК 669.712:669.054.83

Г. А. Вардан[1], Р. Н. Барсегян[2], Г. А. Мартоян[3]

ИЗВЛЕЧЕНИЕ СКАНДИЯ ИЗ КРАСНОГО ШЛАМА

[1]НПО «Экоатом», Ереван, Республика Армения
[2]Кандидат технических наук, доцент, Инженерная академия Армении, Ереван, Республика Армения
[3]Кандидат химических наук, НПО «Экоатом», Ереван, Республика Армения

Аннотация. Работа посвящена извлечению редкоземельных элементов из промышленного отхода – красного шлама, образуемого при производстве алюминия из бокситовых руд по методу Байера. Представлена технологическая схема извлечения компонентов и их глубокую очистку от посторонних примесей.

Ключевые слова: красный шлам, редкоземельные элементы, электромембранные методы, скандий.

G. A. Vardan[1], R. N. Barseghyan[2], G. A. Martoyan[3]

RECOVERY OF SCANDIUM FROM RED MUD

[1]NPO «Ecoatom», Yerevan, Republic of Armenia
[2]Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Engineering Academy of Armeny, Yerevan, Republic of Armenia
[3]Ph. D. of Chemical Science, NPO «Ecoatom», Yerevan, Republic of Armenia

Annotation. The work is devoted to the extraction of rare-earth elements from industrial waste: red mud formed in the production of aluminium from bauxite ores by the Bayer method. The technological scheme is presented for extracting components from red mud and their deep cleaning from impurities.

Keywords: red mud, rare-earth elements, electromembrane methods, scandium.

Введение. Извлечение полезных и токсичных элементов из промышленных отходов является актуальной задачей. В процессе производства алюминия из бокситовых руд образуется большое количество отходов в виде красного шлама (КШ) [1]. Как следует из [2], уже в ближайшем будущем количество отходов в виде красного шлама приблизится к 200 млн т. Его химический состав варьирует в зависимости от состава и свойств выщелачиваемого боксита.

Как правило, красный шлам хранится в больших резервуарах или в хвостохранилищах, которые занимают огромные площади, пригодные для сельского хозяйства, загрязняя почву и грунтовые воды. Кроме того, его хранение требует соблюдения строгих мер, поскольку красный шлам является очень токсичным и агрессивным соединением.

Материалы и методы исследования. Разработано много вариантов использования красного шлама, приводящих к извлечению из них ценных металлов [3–14] и использованию других отходов в качестве строительного материала. Однако ни на одном из предприятий не было проведено комплексной переработки КШ. Основными областями применения КШ являются производство цемента, дорожное строительство, производство чугуна и т. д. При этом теряется много ценных редких металлов, а также многие токсичные вещества попадают в строительные материалы, загрязняя окружающую среду. Основной задачей исследователей является извлечение из КШ наиболее ценных металлов, например, скандия а также токсичных веществ с использованием гидрометаллургических методов.

В результате нашего исследования было обнаружено, что гипохлорит натрия является эффективным реагентом для выщелачивания РЗМ, который будучи щелочным, как и КШ, не вызывает дополнительных проблем и может быть получен непосредственно на месте использования.

В процессе переработки КШ электромембранной технологией определенные группы металлов извлекаются в виде водных растворов, после чего целевые металлы избирательно разделяются стандартными методами, такими как седиментация, сорбция и экстракция. Таким образом, комплексная разработка КШ позволит использовать все компоненты, содержащиеся в этих отходах, включая железо и алюминий, и перевести токсичные отходы в продукты, пользующиеся высоким спросом.

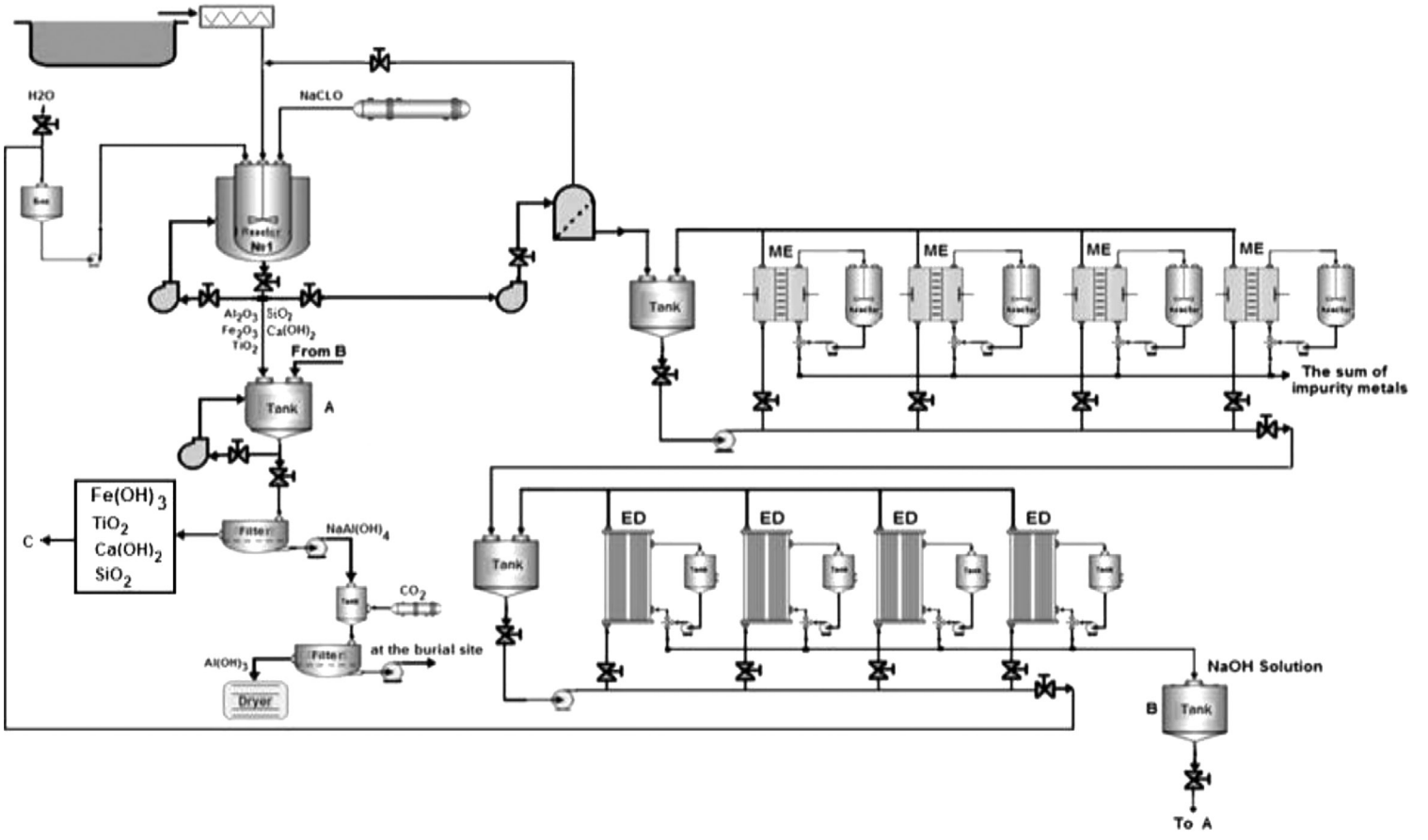
Результаты исследования и их обсуждения. Образцы красного шлама были взяты из отходов переработки глинозема по процессу Байера с завода Ирана. В табл. 1 приведен средний химический состав основных и примесных металлов, анализ состава элементов был выполнен с помощью масс-спектрометра ELAN 9000 ICP.

Таблица 1. **Состав основных компонентов красного шлама**

Fe_2O_3	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	TiO_2	S	P_2O_5	Na_2O
44–46	8–11	8–9,5	13–18	0,2–1,6	4–5	3,6	0,2–0,65	2,5–6,5

Содержание редких и редкоземельных элементов приведено в табл. 2.

Установка для переработки КШ (см. рисунок) состояла из различных реакторов, резервуаров, насосов, электрохимических аппаратов (электролизеров и электродиализаторов). Гипохлорит натрия производился из хлорида натрия на месте с применением метода электродиализа.



Общая схема переработки красного шлама

Таблица 2. **Состав примесных элементов в КШ Иранского завода**

Элемент	Содержание, г/кг	Элемент	Содержание, г/кг
Sc	0,019358	Cu	0,068480
Ti	24,298205	Zn	0,235932
V	0,277970	Ge	0,005525
Cr	0,151777	Ga	0,030868
Mn	2,974695	As	0,031339
Fe	78,037918	Y	0,001937
Co	0,078870	Mo	0,002424
Ni	0,303276	Cd	0,001026

Как показано на рисунке, процесс переработки начинается с заполнения реактора с мешалкой № 1 красным шламом, а также чистой водой и расчетным количеством гипохлорита натрия. Общая схема показывает маршруты извлечения глинозема и растворимых соединений редкоземельных элементов, а также соединений железа, титана, кальция и кремния. Гипохлорит натрия готовится отдельно, в специальной установке. После мягкого выщелачивания красного шлама нерастворенные остатки (Al_2O_3, SiO_2, Fe_2O_3, $Ca(OH)_2$, TiO_2 и другие соединения) транспортируются в контейнер А для дальнейшей обработки с целью получения отдельных продуктов.

Растворенная часть красного шлама, содержащая примесные элементы, включая редкоземельные, подвергается специальной активации кавитационным насосом, что является ноу-хау авторов. Затем смесь перерабатывают в системе мембранных электролизеров (верхняя часть), после чего сумма металлов накапливается в специальном баке, а остаток направляется в систему электродиализаторов (нижняя часть), где раствор NaOH разделяется в баке В и возвращается в бак А.

Доля полезных элементов в красном шламе значительно уменьшается после переработки, что означает, что большинство из них переходит в раствор, например, содержание скандия в КШ уменьшается почти в 150 раз.

Последующее разделение этих элементов на отдельные чистые металлы осуществляется с использованием стандартных методов, упомянутых выше, а также с помощью технологии электро-мембранных методов, а глубина очистки обеспечивается мембранным электролизом путем предварительного преобразования металлов в нерастворимые соли.

Следует отметить, что аналогичные результаты были получены после переработки КШ из уральского завода.

Заключение. Разработан новый метод переработки КШ из отходов производства алюминия с извлечением ценных металлов и соединений, а также создана и апробирована экспериментальная установка, для осуществления предложенной технологии.

Список использованных источников

1. Ritters, S. K. Making the most of red mud / S. K. Ritters // Chemical and Engineering News. – 2014. – Vol. 92, № 8. – P. 33.

2. All about aluminum [Electronic resource]. – Mode of access : http://www.aluminiumleader.com/economics/how_aluminium_market_works. – Date of access : 18.04.2022.

3. Pontikes, Y. Bauxite residue in Cement and cementious applications: Current state and possible way forward / Y. Pontikes, G. N. Angelopoulos // Resources, conservation and recycling. – 2013. – Vol. 73. – P. 53–63.

4. Biswas, W. K. Sustainability Assessment of Red SandTM as a sub-stitute for Virgin Sand and Crushed Limestone / W. K. Biswas, D. J. Cooling // Journal of Industrial Ecology. – 2013. – Vol. 17, iss. 5. – P. 756–762.

5. Schmitz, C. Red Mud Disposal / C. Schmitz // Handbook of aluminium recycling. – Munich : Vulkan-Verlag GmbH, 2006. – P. 18–39.

6. Liu, W. Review on treatment and utilization of bauxite residues in China / W. Liu, J. Yang, B. Xiao // International Journal of Mineral Processing. – 2009. – Vol. 93. – P. 220–231.

7. Yadav, H. Study of Red Mud as an Alternative Building Material for Interlock-ing Block Manufacturing in Construction Industry / H. Yadav, A. Gard // International Journal of Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 3, iss. 4. – P. 295–300.

8. Martoyan, G. A. New technology of extracting the amount of rare earth metals from the red mud / G. A. Martoyan, G. G. Karamyan, G. A. Vardan // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 112, iss. 1. – P. 1–5.

9. Smith, P. Waste treatment: Aluminium future out of mud / P. Smith // Resourceful. – 2015. – Iss. 7. – P. 6.

10. Способ пирометаллургической переработки красных шламов : пат. WO 2013070121 A1 / А. А. Голубев, Ю. А. Гудим. – 16.05.2013.

11. Организация производства РЗМ при комплексной переработке фосфогипса. Актуальные вопросы / А. М. Абрамов [и др.] // Актуальные вопросы добычи, производства и применения редкоземельных элементов в России. РЗМ-2013 : материалы Всерос. конф. по редкоземельным материалам, Томск, 20–21 нояб. 2013 г. / Нац. исслед. ядерный ун-т МИФИ. – Томск, 2013.

12. Интернет-портал STRF [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://strf.ru/material.aspx?CatalogId=222&d_no=88685#.VgJYtX3CaKI. – Дата доступа : 24.01.2021.

13. The extraction of heavy metals by means of a new electrolytic method / Z. G. Guiragossian [et al.] // WM'04 Conference. – Tucson, 2004. – P. 4304.

14. Корнеев, В. И. Красные шламы – свойства, складирование, применение / В. И. Корнеев, А. Г. Сусс, А. И. Цеховой. – М. : Металлургия, 1991. – 144 с.

References

1. Ritters, S. K. Making the most of red mud / S. K. Ritters // Chemical and Engineering News. – 2014. – Vol. 92, № 8. – P. 33.

2. All about aluminum [Electronic resource]. – Mode of access : http://www.aluminiumleader.com/economics/how_aluminium _market_works. – Date of access : 18.04.2022.

3. Pontikes, Y. Bauxite residue in Cement and cementious applications: Current state and possible way forward / Y. Pontikes, G. N. Angelopoulos // Resources, conservation and recycling. – 2013. – Vol. 73. – P. 53–63.

4. Biswas, W. K. Sustainability Assessment of Red SandTM as a sub-stitute for Virgin Sand and Crushed Limestone / W. K. Biswas, D. J. Cooling // Journal of Industrial Ecology. – 2013. – Vol. 17, iss. 5. – P. 756–762.

5. Schmitz, C. Red Mud Disposal / C. Schmitz // Handbook of aluminium recycling. – Munich : Vulkan-Verlag GmbH, 2006. – R. 18–39.

6. Liu, W. Review on treatment and utilization of bauxite residues in China / W. Liu, J. Yang, B. Xiao // International Journal of Mineral Processing. – 2009. – Vol. 93. – R. 220–231.

7. Yadav, N. Study of Red Mud as an Alternative Building Material for Interlock-ing Block Manufacturing in Construction Industry / N. Yadav, A. Gard // International Journal of Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 3, iss. 4. – P. 295–300.

8. Martoyan, G. A. New technology of extracting the amount of rare earth metals from the red mud / G. A. Martoyan, G. G. Karamyan, G. A. Vardan // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016, – Vol. 112, iss. 1. – P. 1–5.

9. Smith, P. Waste treatment: Aluminium future out of mud / P. Smith // Resourceful. – 2015. – Iss. 7. – P. 6.

10. Sposob pirometallurgicheskoj pererabotki krasnyh shlamov : pat. WO 2013070121 A1 / A. A. Golubev, Yu. A. Gudim. – 16.05.2013.

11. Organizaciya proizvodstva RZM pri kompleksnoj pererabotke fosfogipsa. Aktual'nye voprosy / A. M. Abramov [et al.] // Aktual'nye voprosy dobychi, proizvodstva i primeneniya redkozemel'nyh elementov v Rossii. RZM-2013 : materialy Vseross. konf. po redkozemel'nym materialam, Tomsk, 20–21 noyab. 2013 g. / Nac. issled. yadernyj un-t MIFI. – Tomsk, 2013.

12. Internet-portal STRF [Electronic resource]. – Mode of access : http://strf.ru/material.aspx?CatalogId=222&d_no=88685#.VgJYtX3CaKI. – Date of access : 24.01.2021.

13. The extraction of heavy metals by means of a new electrolytic method / Z. G. Guiragossian [et al.] // WM'04 Conference. – Tucson, 2004. – P. 4304.

14. Korneev, V. I. Krasnye shlamy - svojstva, skladirovanie, primenenie / V. I. Korneev, A. G. Suss, A. I. Cekhovoj. – M. : Metallurgiya, 1991. – 144 s.

УДК 662.997÷ 621.47

Ф. Ш. Касимов[1], Ш. К. Ниязов[2]

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДНЕВНОГО КОЛИЧЕСТВА НАКОПЛЕННОГО В ЕМКОМПРИЕМНИКЕ ПОЛЕЗНОГО ТЕПЛА ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

[1]Доктор философии по техническим наукам, Физико-технический институт Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент, Республика Узбекистан
[2]Кандидат технических наук, доцент, Гулистанский государственный университет, Ташкент, Республика Узбекистан

Аннотация. В статье представлена методика обработки результатов экспериментальных исследований дневного количества накопленного в емком приемнике полезного тепла плоских солнечных водонагревательных коллекторов с донным поглощением солнечного излучения и теплоизолированными плоскими основаниями.

Ключевые слова: емкий приемник, донное поглощение солнечного излучения, теплоизолированное плоское основание, местные строительные материалы, сезонные системы горячего водоснабжения.

F. Sh. Kasimov[1], Sh. K. Niyazov[2]

METHOD OF PROCESSING OF THE EXPERIMENTAL STUDIES RESULT OF THE DAY AMOUNT OF USEFUL HEAT ACCUMULATED IN THE CAPACITIVE RECEIVER OF FLAT-PLATE SOLAR WATER-HEATING COLLECTORS

[1]Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Physics-Technical Institute of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan
[2]Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Gulistan State University, Tashkent, Republic of Uzbekistan

Annotation. The article presents a method for processing the results of experimental studies of the daily amount of useful heat accumulated in a capacious receiver of flat-plate solar water-heating collectors with bottom absorption of solar radiation and heat-insulated flat-plate bases.

Keywords: capacitive receiver, solar radiation bottom absorption, thermal insulated flat-plate base, local building materials, seasonal hot water-supply systems.

Введение. На основе комплекса выполненных научных исследований по тепловому расчету плоских солнечных водонагревательных коллекторов (ПСВК) с емкостными поглотителями солнечного излучения (ПСИ) и с донным поглощением солнечного излучения (СИ) и теплоизолированными плоскими основаниями нами разработаны и сравнительно испытаны в натурных условиях опытные образцы солнечных коллекторов рассматриваемого типа [1].

Результаты исследования и их обсуждение. В целях выявления возможностей создания простых и дешевых солнечных водонагревательных коллекторов (СВК) из местных строительных материалов и использования их в сезонных системах горячего водоснабжения (СГВС) нами созданы и экспериментально исследованы в натурных условиях опытные и опытно-производственные образцы ПСВК рассматриваемого типа. Опытные образцы ПСВК с донным поглощением СИ в количестве 2 шт., имеющие четырехугольную лотковую форму, габаритные размеры по наружным меркам: длина – 1,6 м; ширина – 0,8 м; фронтальная поверхность (включая фронтальные поверхности боковых стенок) – 1,28 м^2.

Боковые стенки и дно коллекторов выполнены из строительного бетона и имеют толщину 0,1 м. Внутренние поверхности коллекторов защищены водонепроницаемым слоем из черного строительного битума.

Коллекторы установлены в горизонтальном расположении на земле. Донные части коллекторов теплоизолированы от земли камышитовой теплоизоляционной плитой, имеющей толщину 0,1 м.

Исследуемые коллекторы отличаются тем, что в одной из них нагреваемая вода находится в полиэтиленовом контейнере, а в другом – в непосредственном контакте с окружающей средой, т. е. имеет открытую поверхность испарения.

Лучевоспринимающие поверхности коллекторов (в первом с полиэтиленовым мешком и во втором – с открытой поверхностью испарения) равны и составляют 0,84 м^2. Коллекторы установлены рядом друг с другом и в процессе исследований находились в одинаковых внешних условиях.



Образцы плоских солнечных водонагревательных коллекторов с емкостными поглотителями солнечного излучения, частично проницаемого для инфракрасного излучения с донным поглощением солнечного излучения

На рисунке представлены образцы экспериментальных плоских солнечных водонагревательных коллекторов с донным поглощением солнечного излучения и теплоизолированными плоскими основаниями.

Методы тепловых испытаний солнечных коллекторов с проточными приемниками излучения [2–12] из-за их малоинерционности по сравнению с коллекторами с емкими приемниками не приемлемы для испытания последних. В связи с тем, что в солнечный коллектор (СК) с емкими приемниками полезно-поглощенное и преобразованное в низкопотенциальное тепло энергии СИ накапливается в течение светового дня, для обработки результатов измерений основных экспериментальных данных нами усовершенствован и применен интегральный метод, основанный на использовании среднедневных (или осредненных за определенный промежуток времени светового дня) значений измеряемых параметров и соответствующих теплотехнических характеристик.

В связи с тем, что количество нагреваемой в коллекторах воды в течение дня постоянно, т. е. в период одного цикла экспериментов дневной забор горячей воды из коллекторов не производится, дневное количество накопленного в емком приемнике полезного тепла $(Q_{\text{пол}}^{\text{пад}})$ может определяться по начальной $(t_{\text{в}9})$ и конечной $(t_{\text{в}16})$ температурами воды в исследуемых коллекторах, т. е.

$$Q_{\text{пол}}^{\text{дн}} = V_{\text{вн}} \rho c_{p_{\text{в}}} (t_{\text{в}16} - t_{\text{в}9}), \tag{1}$$

или с учетом, что

$$V = \delta_{\text{в}} F_{\text{фр}}, \tag{2}$$

и $p_{\text{в}} = 1000$ кг/м^3 и $c_{p_{\text{в}}} = 4{,}1868$ Дж/(кг·°С) выражение (1) примет вид:

$$Q_{\text{пол}}^{\text{дн}} = 4186{,}8 \delta_{\text{в}} F_{\text{фр}}. \tag{3}$$

Значение среднедневной тепловой эффективности или КПД коллектора рассматриваемого типа определяется из известного отношения

$$\eta = \frac{Q_{\text{пол}}^{\text{дн}}}{Q_{\text{пад}}^{\text{дн}}}, \tag{4}$$

с учетом значений

$$Q_{\text{пол}}^{\text{дн}} \text{ и } Q_{\text{пад}}^{\text{дн}} = Q_{\text{пад}}^{\text{дн}} \cdot F_{\text{фр}} \tag{5}$$

отношение (4) может быть представлено в виде

$$\eta = \frac{4186{,}8\delta_{\text{в}}}{Q_{\text{пад}}^{\text{дн}}} \cdot K_{\text{зап}}, \tag{6}$$

где

$$K_{\text{зап}} = \frac{F_{\text{тп}}}{F_{\text{фр}}} - \tag{7}$$

коэффициент заполнения коллектора рассматриваемого типа.

Заключение. Разработана методика обработки результатов экспериментальных исследований теплопроизводительности и тепловой эффективности солнечных абсорбционных емких плоских солнечных водонагревательных коллекторов, изготовленных из местных строительных материалов с донным поглощением солнечного излучения.

Список использованных источников

1. Авезова, Н. Р. Экспериментальное исследование теплопроизводительности и тепловой эффективности солнечных абсорбционных емких водонагревательных коллекторов, изготовленных из местных материалов / Н. Р. Авезова, Ф. Ш. Касимов, Ш. К. Ниязов // Гелиотехника. – 2010. – № 4. – С. 25–28.

2. Gillett, W. Solar Collectors Testing in the European Community / W. Gillett, E. Aranovitch, J. Moon // International Journal of Solar Energy. – 1982. – Vol. 1, № 5. – P. 317–341.

3. Gillett, W. B. The equivalence of outdoor and mixed indoor / outdoor solar collectors testing / W. B. Gillett // Solar Energy. – 1980. – Vol. 25, iss. 6. – P. 543–548.

4. Hill, J. E. A method of testing for rating solar collectors based on thermal performance / J. E. Hill, E. R. Streed // Solar Energy. – 1976. – Vol. 18, № 5. – P. 421–429.

5. Method of testing solar collectors based on thermal performance : SRAE standart 93–77. – New York : Of Heating Refrigerating and Air-Conditions Engineers. – 1977. – 65 p.

6. Capters solaries. Measure des performances thermiques : AFNOR P50 501. – Paris : Association de Normalisation. – 1977. – 59 p.

7. Фрид, С. Е. Методы тепловых испытаний солнечных коллекторов / С. Е. Фрид. – М. : ИВТАН СССР, 1988. – 57 с.

8. Коллекторы солнечные. Общие технические условия : ГОСТ 28310-89. – Введ. 01.07.1990. – М. : Гос. ком. по управлению качеством продукции и стандартам. – 17 с.

9. Устройства солнечного горячего водоснабжения QMQ 204.16-96 // Гос. ком. по архитектуре и строительству Респ. Узбекистан. – Ташкент, 1996. – 31 с.

10. Коллекторы солнечные. Общие технические условия : РСТ Уз 744-96. – Ташкент : Гос. ком. по архитектуре и строительству Респ. Узбекистан. – 49 с.

11. Osório, T. Testing of solar thermal collectors under transient conditions / T. Osório, M. J. Carvalho // SHC 2012. Energy Procedia. – 2012. – Vol. 30. – P. 1344–353.

12. Klein, S. A. Calculation of flat-plate collector loss coefficients / S. A. Klein // Journal of Solar Energy. – 1975. – Vol. 17, № 1. – P. 79–80.

References

1. Avezova, N. R. Eksperimental'noe issledovanie teploproizvoditel'nosti i teplovoj effektivnosti solnechnyh absorbcionnyh emkih vodonagrevatel'nyh kollektorov, izgotovlennyh iz mestnyh materialov / N. R. Avezova, F. SH. Kasimov, SH. K. Niyazov // Geliotekhnika. – 2010. – № 4. –S. 25–28.

2. Gillett, W. Solar Collectors Testing in the European Community / W. Gillett, E. Aranovitch, J. Moon // International Journal of Solar Energy. – 1982. – Vol. 1, № 5. – P. 317–341.

3. Gillett, W. B. The equivalence of outdoor and mixed indoor / outdoor solar collectors testing / W. B. Gillett // Solar Energy. – 1980. – Vol. 25, iss. 6. – P. 543–548.

4. Hill, J. E. A method of testing for rating solar collectors based on thermal performance / J. E. Hill, E. R. Streed // Solar Energy. – 1976. – Vol. 18, № 5. – P. 421–429.

5. Method of testing solar collectors based on thermal performance : SRAE standart 93–77. – New York : Of Heating Refrigerating and Air-Conditions Engineers. – 1977. – 65 p.

6. Capters solaries. Measure des performances thermiques : AFNOR R50 501. – Paris : Association de Normalisation. – 1977. – 59 p.

7. Frid, S. E. Metody teplovyh ispytanij solnechnyh kollektorov / S. E. Frid. – M. : IVTAN SSSR, 1988. – 57 s.

8. Kollektory solnechnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya : GOST 28310-89. – Vved. 01.07.1990. – M. : Gos. kom. po upravleniyu kachestvom produkcii i standartam. – 17 s.

9. Ustrojstva solnechnogo goryachego vodosnabzheniya QMQ 204.16-96 // Gos. kom. po arhitekture i stroitel'stvu Resp. Uzbekistan. – Tashkent, 1996. – 31 s.

10. Kollektory solnechnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya : RST Uz 744-96. – Tashkent: Gos. kom. po arhitekture i stroitel'stvu Resp. Uzbekistan. – 49 s.

11. Osório, T. Testing of solar thermal collectors under transient conditions / T. Osório, M. J. Carvalho // SHC 2012. Energy Procedia. – 2012. – Vol. 30. – P. 1344–1353.

12. Klein S. A. Calculation of flat-plate collector loss coefficients / S. A. Klein // Journal of Solar Energy. – 1975. –Vol. 17, № 1. – P. 79–80.

УДК 549.7:662.756

М. В. Малько[1], С. В. Василевич[2], К. В. Добрего[3], Д. В. Дегтеров[4], А. Н. Асадчий[5]

ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МИНЕРАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕАКЦИИ РАЗЛОЖЕНИЯ ПИРОЛИЗНОЙ СМОЛЫ

[1]Кандидат физико-математических наук, Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

[2]Кандидат технических наук, Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь

[3]Доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский Национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

[4,5]Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе обсуждаются результаты экспериментального исследования термического разложения пиролизной смолы. Определены скорость гомогенного процесса термического разложения смолы и предельные степени разложения.

Ключевые слова: пиролизные смолы, кинетика разложения, энергия активации, предэкспоненциальный фактор.

M. V. Malko[1], S. V. Vasilevich[2], K. V. Dobrego[3], D. V. Degterov[4], A. N. Asadchyi[5]

STUDY OF CATALYTIC ACTIVITY OF MINERAL MATERIALS IN THE PYROLYSIS RESIN DECOMPOSITION REACTION

[1]Ph. D. in Physical and Mathematical, Institute of Power Engineering of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
[2]Ph. D. in Engineering Science, Belarusian State Aviation Academy, Minsk, Republic of Belarus
[3]Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
[4,5]Institute of Power Engineering of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The paper discusses the results of an experimental study of the thermal decomposition of pyrolysis tar. The rate of the homogeneous process of thermal decomposition of the tar and the maximal degrees of decomposition were determined.

Keywords: pyrolysis tar, decomposition kinetics, activation energy, pre-exponential factor.

Введение. Исследования диверсификации энергоресурсов, в том числе за счет использования новых видов топлива и/или улучшения характеристик традиционных топлив, представляют значительный интерес для энергетики. Перспективным направлением исследований и разработок этих вопросов является развитие тепловых электростанций относительно небольшой мощности, использующих различные виды местного топлива [1, 6, 12]. Такие объекты малой энергетики, как правило, ориентируются на получение генераторного газа, а не на непосредственное сжигание топлива [1, 4, 7]. При этом их эффективность существенно ограничивается несовершенством процесса очистки от смол и охлаждения генераторного газа. По данным [1, 7] стоимость аппаратов кондиционирования генераторного газа, получаемого из местных видов топлива, составляет до 15–20 % от общей стоимости строительства ТЭС с ПГУ.

Необходимость использования систем очистки продуктов термохимической конверсии биомассы и материалов органического происхождения обусловлена образованием в таких процессах органических веществ, образующих пиролизную смолу. В состав пиролизной смолы, как известно, входят различные полициклические соединения, имеющие высокую точку росы. Они отлагаются на поверхностях с температурой ниже точки росы [4]. Следствием этого является забивка фильтров и арматуры на линии перекачки смеси, образовавшейся в процессе термохимической конверсии вещества, что может привести к остановке всего рабочего процесса. Известно, что применение катализаторов позволяет обеспечивать ускоренный процесс разложения пиролизных смол при температуре порядка 700–800 °С. Применение каталитического метода очистки продуктов термохимической конверсии биомассы и отходов биологического происхождения не требует дополнительного подогрева для разложения нежелательных продуктов конверсии путем организации их разложения в гомогенных процессах. Из этого следует, что каталитическое разложение смолы имеет преимущество по сравнению с чисто гомогенным процессом [11]. Ре-

зультаты исследований, посвященных применению катализаторов в специфических термохимических процессах, таких как термическое разложение смол, образующихся в процессе пиролиза биомассы, обсуждается в работах [3, 5].

К настоящему времени выполнено большое количество работ по катализу в нефтехимии, окислительному катализу. Установлены достаточно четкие представления о механизмах катализа, структуре и составу оптимальных катализаторов (например, работы института Борескова СО РАН). Рынки соответствующих катализаторов оцениваются в миллиарды долларов. При этом технологии, лежащие в стороне от главных рыночных трендов, не получили должного внимания. Следует также отметить, что для малых энергетических технологий, для местной промышленности Беларуси (а именно они находятся в фокусе настоящего исследования) важным фактором является дешевизна и доступность каталитических материалов. И здесь открывается широкое поле для поиска и исследования доступных минеральных материалов. Безусловно, первая стадия исследований должна включать экспериментальные тестирования разнообразных минеральных материалов с целью выявление их каталитических свойств. В последующем могут быть построены физико-химические модели катализа и оптимизированы технологии.

В работах [2, 5, 8, 9] исследованы каталитические свойства доломита. Анализ данных [2, 5, 8, 9] показал, что, хотя доломит по своим каталитическим свойствам не уступает таким катализаторам разложения углеводородов как Ni, Ru, Rh, Pt, однако он имеет существенный недостаток – понижение механических свойств при нагреве, что приводит к сильной эрозии и снижению каталитической активности.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования некоторых минеральных материалов, доступность которых обусловлена их применением в крупнотоннажном производстве для сельскохозяйственных целей. Это соли, входящие в состав минеральных удобрений: сульфат калия, сульфат магния, монокалия фосфат, а также минеральные остатки производства калийных солей (МОКС).

Цель исследования – определение каталитической активности солей, входящих в состав минеральных удобрений: сульфат калия, сульфат магния, монокалия фосфат, а также МОКС по отношению к процессу термического разложения пиролизной смолы, образующейся при термохимической конверсии древесной биомассы.

Материалы и методы исследования. Исследование термохимических, в том числе каталитических, процессов может быть проведено как в изотермических, так и в неизотермических условиях. В настоящей работе приведены результаты экспериментов, выполненных в изотермических условиях. Такой выбор условий обусловлен тем, что изотермические условия позволяют сократить число параметров, подлежащих определению. Это упрощает анализ получаемых экспериментальных данных, что в итоге приводит к более точному установлению кинетических параметров термохимического процесса.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Образцы материалов: *а* – сульфат калия; *б* – сульфат магния; *в* – монокалия фосфат; *г* – МОКС

На рис. 1 представлены фотографии образцов сульфата калия, сульфата магния, монокалия фосфата, а также МОКС, исследованных в настоящей работе. МОКС представляет собой дисперсный материал с размером фракций 1–3 мм.

В табл. 1 приведен элементный состав МОКС, установленный с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LMH.

Таблица 1. **Элементный состав МОКС**

Статистика	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Br
Макс, %	15,08	5,94	34,41	0,78	0,62	2,54	0,29	56,94	44,61	4,74	2,60	0,42
Мин, %	3,72	2,12	3,80	0,58	0,09	0,27	0,29	43,42	0,47	0,93	2,60	0,42
Средний, %	–	4,18	19,78	–	–	–	–	52,78	13,67	–	–	–
Стандартное отклонение, %	–	1,60	13,32	–	–	–	–	6,33	20,84	–	–	–

Каталитические свойства указанных минеральных веществ были изучены в процессе разложения пиролизной смолы (рис. 2), образовавшейся в процессе термохимической конверсии березовой щепы, осуществленном при температуре 600 °С и последующего быстрого охлаждения до 200 °С.

Плотность смолы равна 0,9 г/см^3, вязкость – 395 ± 4 сСт. Вязкость определялась на ротационном вискозиметре Brookfield DV2T (США) при температуре 17,1 °С. Температура вспышки измерялась с помощью автоматического аппарата ТВЗ-ЛАБ-11 (Российская Федерация) и составила 190 °С. Теплотворная способность смолы определялась на калориметре В-08МА«К» и равнялась 28766,78 кДж/кг (6870,83 кКал/кг).



Рис. 2. Лабораторная емкость с образцом пиролизной смолы

Скорость термического гомогенного разложения пиролизной смолы измерялась следующим образом. Образец смолы массой около 2 г наливался в лабораторную керамическую

емкость (кювету) (рис. 2) и помещался в печь SNOL7,2/1300, позволяющую поддерживать постоянную температуру среды в интервале температур 500–1300 °С с точностью ±2 °С, и выдерживался при заданной постоянной температуре. После выдержки в течение установленного периода времени кювета извлекалась из печи и взвешивалась на электронных весах Pioneer PA214C 210/0.1mg с дискретностью 0,1 мг.

Опыты по термокаталитическому разложению пиролизной смолы выполнялись аналогичным образом. В лабораторную емкость, содержащую пиролизную смолу, насыпался каталитический материал в виде порошка в массовом соотношении смола/катализатор равном 2.

Опыты выполнялись в изотермических условиях при температурах 300, 350 и 400 °С. При более высоких температурах эксперименты не проводились, так как наблюдалось горение образца.

Результаты исследования и их обсуждение. Значения степеней разложения смолы (табл. 2–5), установленные в опытах, которые проводились при различных температурах и условиях, рассчитаны по формуле:

$$\alpha_t = \frac{m_0 - m_t}{m_0}, \quad (1)$$

где α_t – степень разложения смолы в момент времени t; m_0 – исходная масса смолы, г; m_t – масса смолы в граммах в момент времени t.

Исследования показали, что монокалия фосфат при температуре 300 °С быстро теряет свои механические свойства и спекается в стекловидную однородную массу, из-за чего исследования каталитических эффектов данного вещества по данной методике невозможны. Какого-либо каталитического влияния

Таблица 2. **Степени гомогенного разложения пиролизной смолы**

T, мин	*T* = 300 °С	*T* = 350 °С	*T* = 400 °С
1	0,0112	0,0072	0,0073
3	0,0729	0,0509	0,3471
5	0,2311	0,4599	0,8266
10	0,4630	0,7648	0,9083
15	0,6143	–	0,9376

Таблица 3. **Степени разложения пиролизной смолы в присутствии сульфата калия K_2SO_4 (33 %)**

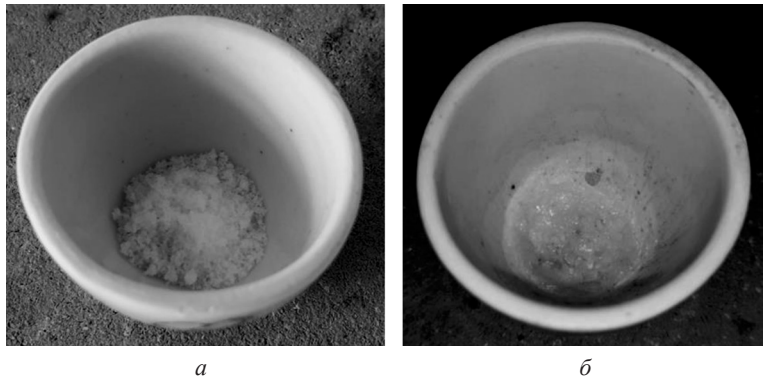
T, мин	*T* = 300 °С	*T* = 350 °С	*T* = 400 °С
1	0,0098	0,0372	0,2886
3	0,1168	0,6392	0,8599
5	0,3324	0,7558	0,9133
10	0,5334	–	0,9750
15	0,5883	–	–
20	0,5902	–	–

Таблица 4. **Степени разложения пиролизной смолы в присутствии сульфата магния MgO 16,9 %, S 13,5 % (33 %)**

T, мин	*T* = 300 °C	*T* = 350 °C	*T* = 400 °C
1	0,0128	0,0379	0,1510
3	0,0814	0,6366	0,7846
5	0,2641	0,8513	0,9274
10	0,4859	0,8565	0,9844
15	0,5875	–	0,9908
20	0,6661	–	–

Таблица 5. **Степени разложения пиролизной смолы в присутствии МОКС (33 %)**

T, мин	*T* = 300 °C	*T* = 350 °C	*T* = 400 °C
1	0,0257	0,0274	0,0343
3	0,1258	0,4836	0,8076
5	0,4353	0,9163	0,9122
10	0,7873	0,9405	0,9742
15	0,9969	0,9476	0,9985



а *б*

Рис. 3. Образцы монокалия фосфата при температуре 300 °C: *а* – образец монокалия фосфата до оплавления; *б* – образец монокалия фосфата после оплавления

на процесс разложения пиролизной смолы монокалия фосфата в таком стекловидном состоянии не было обнаружено. Общий вид образцов монокалия фосфата до и после оплавления представлен на рис. 3.

Анализ полученных в настоящей работе данных показал, что кинетика термического разложения смолы может быть описана с приемлемой точностью на основании уравнения, предложенного авторами [10] для описания кинетики реакции термического разложения доломита:

$$\alpha_n = kt, \quad (2)$$

где n – некоторый параметр; k – константа скорости; t – время выдержки.

В соответствии с выражением (2) значение константы скорости можно определить, используя формулу:

$$k = \frac{1}{t} \cdot \alpha^{n}. \quad (3)$$

Подстановка в выражение экспериментальных значений степени разложения и параметра *n* позволяет рассчитать значения константы скорости, соответствующие определенному времени разложения образца при заданной температуре.

Значение параметра *n*, согласно авторам работы [8], определяется из логарифмической зависимости степени разложения вещества и времени пребывания вещества при заданной температуре эксперимента:

$$\mathrm{Ln}(\alpha) = \frac{1}{n}\mathrm{Ln}(t) + \frac{1}{n}\mathrm{Ln}(k). \quad (4)$$

Данные, представленные на рис. 4, показывают зависимость Ln(α) от Ln(*t*), построенную на основании эмпирических значений степени разложения смолы, установленных при использовании данной методики для гомогенного процесса разложения пиролизной смолы (*а*), а также в присутствии сульфата калия (*б*), сульфата магния (*в*) и отходов производства калийных солей (*г*) при температуре 300 °С.

Использование метода наименьших квадратов дает следующие зависимости для расчета значений параметра *n* уравнения (2), определенных в настоящей

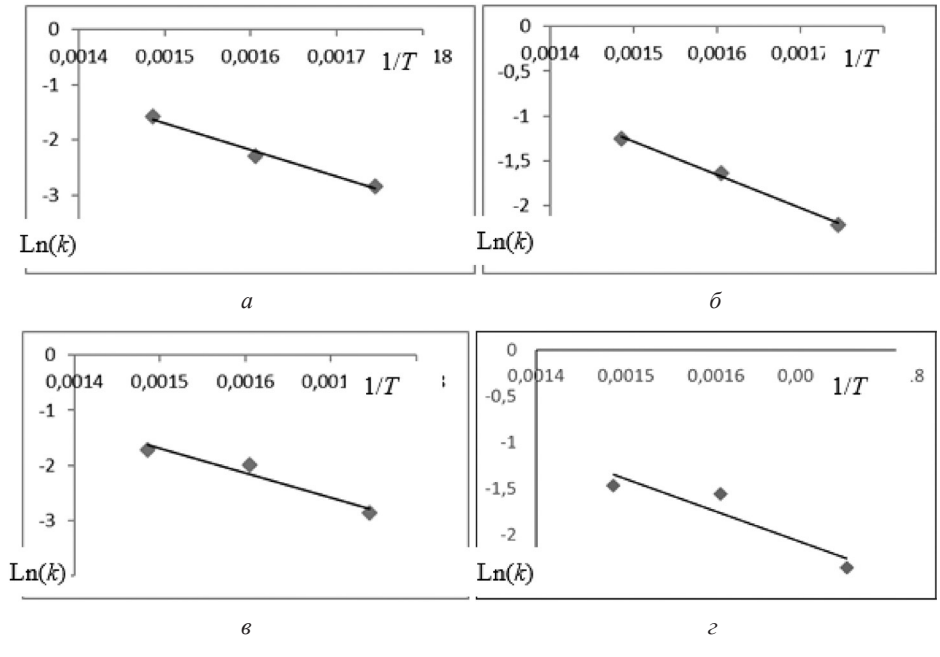


Рис. 4. Графики зависимости Ln(α) от Ln(*t*), при температуре 300 °С: *а* – для гомогенного процесса разложения; *б* – в присутствии сульфата калия; *в* – в присутствии сульфата магни; *г* – в присутствии МОКС

работе при температуре 300 °С для гомогенного процесса разложения смолы (5), а также в присутствии сульфата калия (6), сульфата магния (7) и отходов производства калийных солей (8):

$$\mathrm{Ln}(a) = 1{,}5165 \cdot \mathrm{Ln}(t) - 4{,}3073; \quad (5)$$

$$\mathrm{Ln}(a) = 1{,}7955 \cdot \mathrm{Ln}(t) - 4{,}374; \quad (6)$$

$$\mathrm{Ln}(a) = 1{,}4588 \cdot \mathrm{Ln}(t) - 4{,}1422; \quad (7)$$

$$\mathrm{Ln}(a) = 2{,}1697 \cdot \mathrm{Ln}(t) - 3{,}1836. \quad (8)$$

Числовые коэффициенты первых членов правых частей зависимостей (5)–(8) равны $\frac{1}{n}$, и это позволяет рассчитать значения параметра n, необходимые для расчета значений констант скорости по выражению (3).

Использование выражений (5)–(8) показало, что численное значения параметра n, входящего в интегральное уравнение кинетики (2), меньше 2.

Результаты, аналогичные обсуждаемым, были также определены для опытных данных, установленных при температурах 350 и 400 °С. На основании полученных данных были определены значения констант скорости гомогенного процесса разложения смол, а также разложения в присутствии сульфата калия (*б*), сульфата магния (*с*) и МОКС (*д*). Эти величины представлены в табл. 6.

Таблица 6. **Константы скорости термического разложения пиролизных смол при различных условиях**

Условие эксперимента	Константа скорости термического разложения пиролизных смол, k, мин$^{-1}$		
	T = 300 °С	T = 350 °С	T = 400 °С
Гомогенная реакция	0,0584	0,1011	0,2057
С использованием сульфата калия	0,1096	0,1942	0,2871
С использованием сульфата магния	0,0573	0,1363	0,1809
С использованием МОКС	0,0949	0,2109	0,2305

Данные табл. 6 показывают, что термическое разложение пиролизной смолы ускоряется в присутствии сульфата калия и МОКС. Это означает, что сульфат калия и МОКС проявляют каталитические свойства по отношению к процессу термического разложения пиролизной смолы. Оба эти вещества содержат калий в своем составе. Возможно, именно атомы калия являются активными центрами в каталитическом процессе разложения пиролизной смолы. Не было обнаружено каталитического эффекта в случае сульфата магния. Этот результат позволяет выдвинуть гипотезу об отсутствии каталитического влияния магния в процессе разложения пиролизной смолы.

Аррениусовские зависимости констант скорости гомогенного и каталитического разложения смолы показаны на рис. 5.

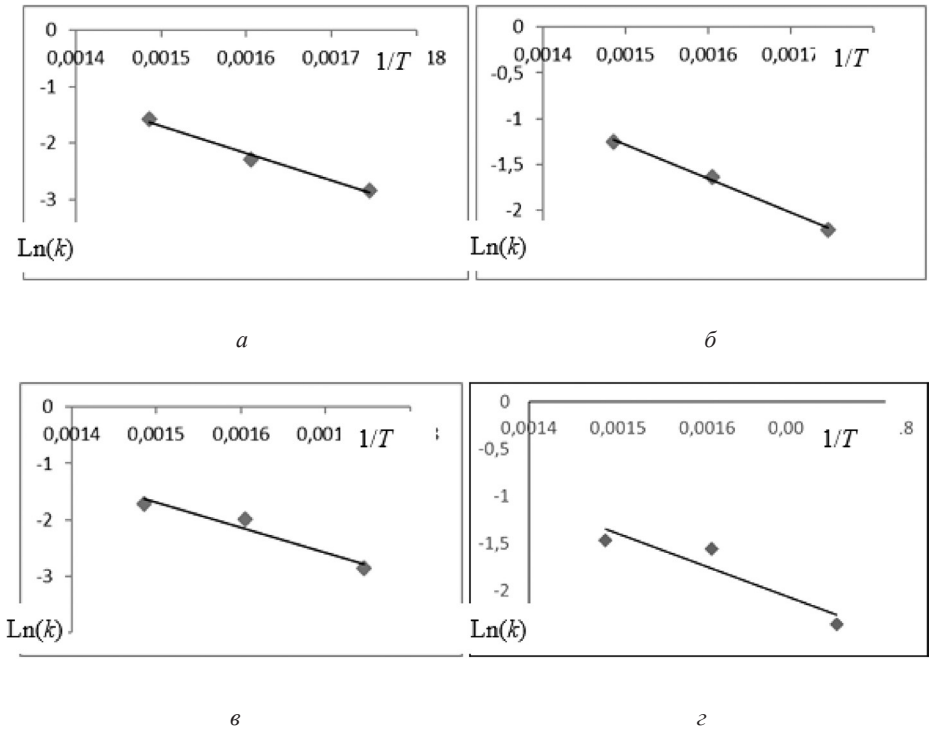


Рис. 5. Аррениусовские зависимости констант скорости гомогенного и каталитического разложения смолы от обратной величины температуры: *а* – для гомогенного процесса разложения; *б* – в присутствии сульфата калия; *в* – в присутствии сульфата магния; *г* – в присутствии МОКС

Аппроксимация методом наименьших квадратов значений константы скорости термического разложения смолы, представленных в табл. 6, дает следующие зависимости (9)–(12):

$$\mathrm{Ln}(k) = -4830{,}8 \cdot \left(\frac{1}{T}\right) + 5{,}5479,\ R_c^2 = 0{,}9712,\ p < 0{,}10, \tag{9}$$

$$\mathrm{Ln}(k) = -3726{,}1 \cdot \left(\frac{1}{T}\right) + 4{,}3060,\ R_c^2 = 0{,}9924,\ p < 0{,}05, \tag{10}$$

$$\mathrm{Ln}(k) = -4453{,}4 \cdot \left(\frac{1}{T}\right) + 4{,}9372,\ R_c^2 = 0{,}98505,\ p < 0{,}05, \tag{11}$$

$$\mathrm{Ln}(k) = -3489{,}6 \cdot \left(\frac{1}{T}\right) + 3{,}8312,\ R_c^2 = 0{,}71615,\ p < 0{,}10. \tag{12}$$

В выражениях (9)–(12) параметр R_c^2 является скорректированным параметром детерминации, показывающим соответствие исходных значений констант скорости значениям, рассчитанным с помощью этих выражений, а p характеризует степень достоверности аппроксимационных выражений.

Коэффициенты, стоящие в первых членах правых частей выражений (9)–(12), определяют углы наклона зависимости Ln(k) от 1/T. Умножение этих коэффициентов на газовую постоянную R = 8,314 Дж/(моль·К), деленную на 1000, дает значение энергии активации, выраженное в кДж/моль.

Вторые члены в правых частях зависимостей (9)–(12) являются логарифмами предэкспоненциальных факторов.

Значения энергии активации и соответствующих предэкспоненциальных факторов, рассчитанные на основании зависимостей (9)–(12), представлены в табл. 7.

Таблица 7. **Константы скорости термического разложения пиролизных смол при различных условиях**

Условие эксперимента	E, кДж/моль	A, мин$^{-1}$
Гомогенная реакция	40,2	$2{,}57 \cdot 10^2$
С использованием сульфата калия	31,0	$0{,}74 \cdot 10^2$
С использованием сульфата магния	37,0	$1{,}39 \cdot 10^2$
С использованием МОКС	29,0	$0{,}46 \cdot 10^2$

Как следует из данных этой таблицы, энергия активации разложения пиролизной смолы в присутствии сульфата калия и МОКС примерно на 10 кДж/моль меньше, чем энергия активации гомогенного процесса, что является свойством катализаторов. Внесение их в зону протекания реакции приводит к снижению кажущейся энергии активации и позволяет осуществлять процесс в области более низких температур.

Согласно данным табл. 7, энергия активации термического разложения пиролизной смолы в присутствии сульфата магния практически не отличается от энергии активации гомогенного процесса, что является дополнительным аргументов в пользу вывода о том, что соединения магния не являются катализаторами в отношении процесса термического разложения пиролизной смолы.

Как следует из данных табл. 7, параллельно со снижением энергии активации суммарного разложения пиролизной смолы в присутствии сульфата калия и МОКС происходит существенное снижение предэкспоненциального фактора. Следствием этого является то, что суммарная скорость термического разложения пиролизной смолы в присутствии сульфата калия и МОКС превышает скорость гомогенной реакции только примерно в 1,5–2 раза в области температур 300–400 °С, что, возможно, недостаточно для разработки эффективной системы очистки продуктов термохимической конверсии биомассы и веществ биологического происхождения. Это предположение особо касается проблемы подбора эффективных катализаторов для разложения пиролизной смолы, образующейся в области температур порядка 800 °С. Важность решения этой проблемы обусловлена необходимостью разработки каталитической системы очистки продуктов газификации биомассы и веществ биологического происхождения, которая, как правило, осуществляется при температуре порядка

800 °C. Это указывает на актуальность проведения экспериментальных исследований сульфата калия и МОКС и других доступных материалов в области повышенных температур.

Необходимо отметить, что экспериментальные данные, установленные в настоящей работе, не позволяют предположить наличие каталитической активности в отношении разложения пиролизной смолы при температурах порядка 800 °C. Такое предположение может быть сделано только на основании экспериментальных исследований каталитической активности сульфата калия и МОКС в области температур порядка 800 °C.

В соответствии с анализом экспериментальных данных, установленных в настоящем исследовании, кинетика термического разложения пиролизной смолы, описывается интегральным уравнением (2). Как известно [13], уравнение этого типа с показателем $n < 2$ установлено для термического разложения твердого тела в области образования зародышей. Возможность его использования при описании термического разложения пиролизной смолы, которая в условиях выполненных исследований находилась в жидком состоянии, позволяет предположить, что и другие кинетические уравнения, установленные для процессов разложения твердого тела, переносимы на процессы термического разложения вещества в жидком состоянии. Это означает, что в кинетическом отношении жидкость аналогична твердому телу.

Заключение. Результаты экспериментального исследования, выполненного в изотермических условиях при температурах 300, 350 и 400 °C, показали, что кинетику термического разложения пиролизной смолы можно описать с высокой точностью, используя интегральное кинетическое уравнение, установленное для описания кинетики термического разложения твердого тела в условиях, когда важную роль играет процесс образования зародышей.

Анализ установленных экспериментальных данных на основе этого интегрального кинетического уравнения позволил определить аррениусовские параметры термического разложения пиролизной смолы в изотермических условиях в интервале температур 300–400 °C для гомогенного разложения пиролизной смолы и разложения в присутствии сульфата калия, сульфата аммония и МОКС. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в изученном интервале температур сульфат калия и МОКС оказывают каталитическое влияние на термическое разложение пиролизной смолы в изученном интервале температур.

Список использованных источников

1. Afanaseva, O. V. Energy Efficiency of Small Coal-Fired Power Plants as a Criterion of Their Wide Applicability / O. V. Afanaseva, G. R. Mingaleeva // Solid Fuel Chemistry. – 2009. – Vol. 43, № 1. – P. 55–59.

2. Commercial steam reforming catalysts to improve biomass gasification with steam-oxygen mixtures. Catalytic tar removal / M. P. Azner [et al.] // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 1998. – Vol. 37. – P. 2668–2680.

3. Characterization and Treatment of Tars from Biomass Gasifiers / E. G. Baker [et al.]. – Denver : AIChE, 1988. – 11 p.

4. Guoging, G. Heterogenous Catalysts from Natural Sources for Tar Removal: A Mini Review / G. Guoging, H. Xiaogang, A. Abuliti // Journal of Advanced Catalysis Science and Technology. – 2014. – № 1. – P. 20–28.

5. Dayton, D. A Review of the Literature on Catalytic Biomass Tar Destruction. Milestone Completion Report / D. Dayton. – Golden, 2002. – 27 p.

6. Coal and Biomass Gasification. Recent Advances and Future Challenges / S. De [et al.]. – Singapore : Springer, 2018. – 521 p.

7. Добрего, К. В. Макрокинетические модели термического разложения доломита для расчета сорбционных систем газогенераторов / К. В. Добрего // Изв. высш. учеб. заведений и энергет. объед. СНГ. – 2015. – № 5. – С. 51–59.

8. El-Rub, Z. A. A Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification / Z. A. El-Rub, E. A. Bramer, G. Brem // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2004. – Vol. 43. – P. 6911–6919.

9. Milne, T. A. Biomass Gasifier «Tars»: Their Nature, Formation and Conversion / T. A. Milne, N. Abatzoglou, R. J. Evans. – Golden, 1998. – 121 p.

10. Исследование кинетики термического разложения белорусских доломитов / М. В. Малько [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2015. – № 1. – С. 95–101.

11. Sutton, D. Review of literature on catalysts for biomass gasification / D. Sutton, B. Kelleher, J. Ross // Fuel Processing Technology. – 2001. – Vol. 73, № 3. – P. 155–173.

12. Fortov, V. E., Popel' O. S. The Current Status of the Development of Renewable Energy Sources Worldwide and in Russia / V. E. Fortov, O. S. Popel' // Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 61, № 6. – P. 389–398.

13. Haibo Liu, Chen Tianhu, Change Donguin, Dong Chen, Hongping He, Frost Ray. Catalytic Cracking of Tars Derived from Rice Hull Gasification over Goethite and Palygorskite / L. Haibo [et al.] // Applied Clay Science. – 2012. – Vol. 70. – P. 51–57.

14. Yunging, H. Theoretical Study of Thermal Analysis Kinetics [Electronic resource] / H. Yunging. – Lexington, 2014. – 91 p.

References

1. Afanaseva, O. V. Energy Efficiency of Small Coal-Fired Power Plants as a Criterion of Their Wide Applicability / O. V. Afanaseva, G. R. Mingaleeva // Solid Fuel Chemistry. – 2009. – Vol. 43, № 1. – P. 55–59.

2. Commercial steam reforming catalysts to improve biomass gasification with steam-oxygen mixtures. Catalytic tar removal / M. P. Azner [et al.] // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 1998. – Vol. 37. – P. 2668–2680.

3. Characterization and Treatment of Tars from Biomass Gasifiers / E. G. Baker [et al.]. – Denver : AIChE, 1988. – 11 p.

4. Guoging, G. Heterogenous Catalysts from Natural Sources for Tar Removal: A Mini Review / G. Guoging, H. Xiaogang, A. Abuliti // Journal of Advanced Catalysis Science and Technology. – 2014. – № 1. – P. 20–28.

5. Dayton, D. A Review of the Literature on Catalytic Biomass Tar Destruction. Milestone Completion Report / D. Dayton. – Golden, 2002. – 27 p.

6. Coal and Biomass Gasification. Recent Advances and Future Challenges / S. De [et al.]. – Singapore : Springer, 2018. – 521 p.

7. Dobrego, K. V. Makrokineticheskie modeli termicheskogo razlozheniya dolomita dlya rascheta sorbcionnyh sistem gazogeneratorov / K. V. Dobrego // Izv. vyssh. ucheb. zavedenij i energet. ob'ed. SNG. – 2015. – № 5. – S. 51–59.

8. El-Rub, Z. A. A Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification / Z. A. El-Rub, E. A. Bramer, G. Brem // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2004. – Vol. 43. – P. 6911–6919.

9. Milne, T. A. Biomass Gasifier «Tars»: Their Nature, Formation and Conversion / T. A. Milne, N. Abatzoglou, R. J. Evans. – Golden, 1998. – 121 r.

10. Issledovanie kinetiki termicheskogo razlozheniya belorusskih dolomitov / M. V. Mal'ko [et al.] // Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk. – 2015. – № 1. – S. 95–101.

11. Sutton, D. Review of literature on catalysts for biomass gasification / D. Sutton, B. Kelleher, J. Ross // Fuel Processing Technology. – 2001. – Vol. 73, № 3. – P. 155–173.

12. Fortov, V. E., Popel' O. S. The Current Status of the Development of Renewable Energy Sources Worldwide and in Russia / V. E. Fortov, O. S. Popel' // Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 61, № 6. – P. 389–398.

13. Haibo Liu, Chen Tianhu, Change Donguin, Dong Chen, Hongping He, Frost Ray. Catalytic Cracking of Tars Derived from Rice Hull Gasification over Goethite and Palygorskite / L. Haibo [et al.] // Applied Clay Science. – 2012. – Vol. 70. – P. 51–57.

14. Yunging, H. Theoretical Study of Thermal Analysis Kinetics [Electronic resource] / H. Yunging. – Lexington, 2014. – 91 r.

УДК 536.721

В. И. Саверченко

СОКРАЩЕНИЕ ЗАТРАТ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА НА ОТОПИТЕЛЬНЫЕ НУЖДЫ

Кандидат физико-математических наук, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе представлена оценка эффективности существующих отопительных котлов с точки зрения термодинамики, а также рассмотрена возможность повышения их эффективности.

Ключевые слова: отопление, котел, термодинамика, экономия топлива, теплообмен, экология.

V. I. Saverchenko

DECREASING OF EXPENSES OF HYDROCARBON FUELS FOR HOUSEWARMING NEEDS

Ph. D. in Physical and Mathematical, A. V. Lyikov Heat and Mass Transfer Institute, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. This paper describes an evaluation of efficiency of housewarming boilers and considers a possibility of increasing housewarming boilers efficiency.

Keywords: housewarming, boiler, thermodynamics, fuel saving, heat transfer, ecology.

Введение. В настоящее время наиболее дешевым способом отопления помещений является использование газовых и твердотопливных котлов [1]. Отопительные котлы постоянно совершенствуются. Их конструкция постоянно усложняется с целью повышения эффективности [2]. Это связанно с тем, что технологии производства совершенствуются, а углеводородное топливо дорожает [3]. Современные газовые и твердотопливные котлы подключаются не только к электроэнергии для функционирования автоматики, но и к Интернету для воз-

можности дистанционного управления котлом. Возможно, вскоре котлы будут оснащены искусственным интеллектом и возможностью управления голосом. Производители котлов сегодня борются за каждый процент эффективности [4]. При всем при этом принципиальная схема современных котлов ничем не отличается от схемы средневековой печки: тепло от пламени напрямую [5] передается нагреваемому элементу (кладке, теплообменнику, резервуару с теплоносителем и т. д.). Данная тенденция является весьма непонятной. Поэтому цель настоящей работы – проанализировать возможность использования котлов принципиально новой схемы с точки зрения сокращения затрат углеводородного топлива на отопительные нужды.

Материалы и методы исследования. Прежде чем приступать к проблеме отопительных котлов рассмотрим некоторые важные аспекты термодинамики и теплообмена [6]. Для начала проанализируем процесс теплообмена между теплоносителями в коаксиальной трубе (рис. 1). В первом случае (рис. 1 сверху) теплоносители движутся через коаксиальную трубку в одном направлении, причем произведение массового расхода теплоносителя на его удельную теплоемкость у обоих теплоносителей одинаковы. Начальная температура первого теплоносителя T1, второго – T2. Если трубка достаточно длинная и тонкая, то после истечения теплоносителей через трубку их температуры будут одинаковы и равны (T1+T2)/2. В случае такого теплообмена энтропия системы возрастет, поскольку на начальном участке трубы горячий теплоноситель отдает тепло, имея большую температуру, чем холодный теплоноситель, который это тепло принимает.

Теперь рассмотрим ту же систему, только теплоносители движутся в противоположных направлениях навстречу друг другу (рис. 1 снизу). Проведя расчеты,

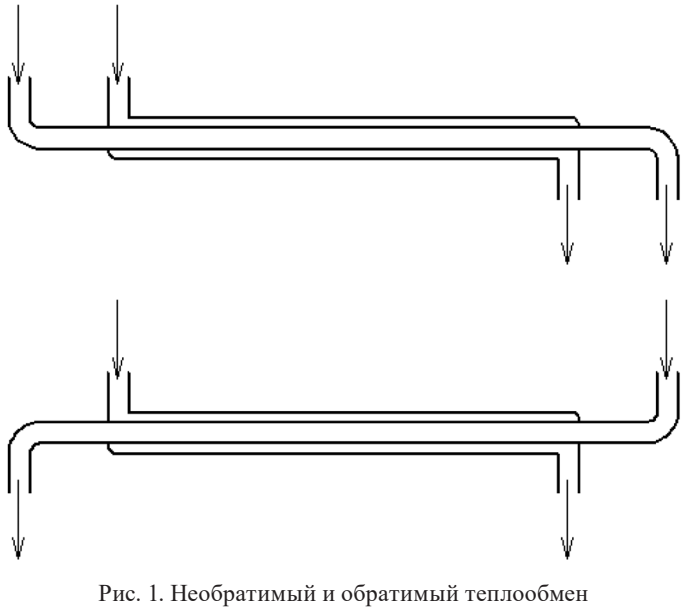


Рис. 1. Необратимый и обратимый теплообмен

нетрудно убедиться, что если трубка достаточно длинная и тонкая, то по истечении теплоносителей из трубки температуры последних поменяются местами. Температура первого теплоносителя станет T2, а второго – T1. Энтропия данной системы остается практически неизменной в ходе процесса теплообмена, поскольку на каждом участке трубки температуры теплоносителей почти равны. Такой теплообмен является обратимым, и, повторив процесс теплообмена еще раз, мы можем вернуть температуры теплоносителей почти к исходным значениям.

Сверхадиабатическое горение. Мы привыкли, что у каждого химического топлива есть своя характерная температура горения в воздухе [7]. Как правило, под такой температурой подразумевается адиабатическая температура горения. Адиабатическая температура горения топлива в воздухе – это такая температура продуктов сгорания, при которой вся химическая энергия исходных реагентов преобразуется в тепловую энергию получившихся продуктов сгорания. Совершенно понятно, что такая температура аддитивно зависит от исходной температуры реагентов.

Поэтому кроме адиабатического горения несложно реализовать сверхадиабатическое горение, при котором химическая энергия исходных реагентов передается не всем продуктам сгорания, а только их части. На рис. 2, *а* изображена обычная адиабатическая горелка.

Топливо и окислитель подаются в трубки, которые ведут в смеситель. В смесителе топливо смешивается с окислителем и горит. На рис 2, *б* топливо и окислитель делятся на два одинаковых потока. Один поток попадает в один смеситель, а второй – в другой. Пламя от первого смесителя полностью отдает свое тепло реагентам, которые движутся во второй смеситель, по схеме обратимого теплообмена, о котором шла речь выше. Теперь реагенты, движущиеся во второй смеситель, имеют адиабатическую температуру горения реагентов, которые сгорели в первом смесителе. Продукты сгорания первого смесителя имеют исходную температуру реагентов до деления потока. Если последнюю температуру принять за нулевую, то температура пламени во втором смесителе горелки на рис. 2, *б* в два раза выше температуры пламени в смесителе на рис. 2, *а*. Аналогично на рис. 2, *в* данная температура будет выше уже в 3 раза. Поятно, что, наращивая число каскадов горелки, можно получить сколь угодно высокую температуру. Лишь технические ограничения,

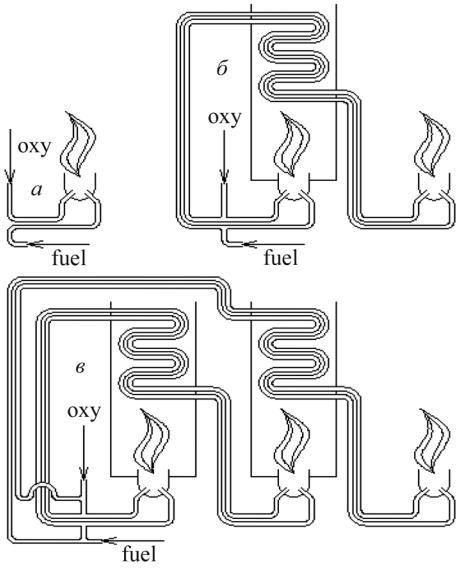


Рис. 2. Адиабатическое и сверхадиабатическое горение

такие как плавление деталей горелки и смещение равновесия химической реакции в сторону диссоциированных атомов, являются препятствием для получения бесконечной температуры горения.

Термодинамические циклы и тепловые машины. Термодинамические процессы [6] могут быть обратимыми и необратимыми. Обратимыми являются процессы, которые происходят равновесно и в которых контактная передача тепла от источника к приемнику происходит при одинаковой температуре источника и приемника. В реальности невозможно достичь абсолютно обратимого процесса, поскольку для осуществления контактной теплопередачи нужен хоть какой-нибудь минимальный перепад температур. Это связано с тем, что при тепловом контакте тепло передается только от более горячего тела к менее горячему. Однако если в термодинамическом процессе можно устремить разность температур источника и приемника тепла к нулю за счет технических ухищрений, то такой процесс называется обратимым. Например, в обратимом теплообменнике на рис. 1 снизу этого можно достичь, удлиняя коаксиальную трубку. На рис. 1 сверху этого достичь нельзя, поэтому такой теплообмен является необратимым.

Устройства, в которых осуществляются термодинамические процессы, называются тепловыми машинами. Тепловые машины могут передавать тепло от нагревателя к холодильнику, превращая часть этого тепла в работу. Машины, специально изготовленные для этого, называются тепловыми двигателями, а цикл, по которому они работают, называется прямым. Тепловые машины также могут передавать тепло от холодильника к нагревателю, получая работу извне. Машины, предназначенные для такой задачи, называются тепловыми насосами. Цикл, по которому работают тепловые насосы, называется обратным. Тепловая машина, которая превращает тепловую энергию в механическую, называется тепловым двигателем второго рода. Согласно второму закону термодинамики, такой двигатель невозможен. Несмотря на то, что второй закон термодинамики в общем случае никем не доказан, в настоящей работе мы будем считать его абсолютно справедливым.

Максимальный КПД всегда у тепловой машины, работающей по обратимому циклу. Это связано с тем, что работы, производимой обратимой тепловой машиной, функционирующей по прямому циклу, ровно хватает на то, чтобы крутить такую же тепловую машину, работающую по обратному циклу. При этом создаваемой второй машиной разности температур хватит ровно на то, чтобы первая машина могла работать и крутить вторую. Если же какой-либо процесс будет иметь хоть немного больший КПД, чем обратимый, то, соединив такую тепловую машину с обратимой, работающей в противоположном направлении, мы получим тепловой двигатель второго рода, что невозможно. Обратимыми являются, например, тепловая машина Карно (рис. 3 слева) и тепловая машина с истощаемым нагревателем (рис. 3 справа).

Тепловая машина Карно состоит из четырех рабочих колес и двух насосов. На рис. 3 схематически изображены пластинчатые рабочие колеса и шестеренные насосы. Пластинчатое рабочее колесо может быть как компрессором, так и де-

компрессором, которые работают плавно и почти непрерывно. В зависимости от геометрии и положения входных и выходных щелей пластинчатое колесо может обеспечить любую степень сжатия и, следовательно, избежать скачков давления при открытии входного или выходного отверстия. Поэтому именно этот тип рабочего колеса был выбран для условного обозначения. Адиабатические компрессор и декомпрессор схематически изображены в виде открытых пластинчатых колес. Изотермические компрессор и декомпрессор схематически изображены в виде пластинчатых колес, заключенных в резервуар, через который шестеренный насос прокачивает жидкий теплоноситель. Нагреватель и холодильник тепловой машины Карно изображены в виде резервуаров, внутри которых расположены теплообменники в форме змеевиков. Сверху схематически изображен торчащий вал, который совершает работу. Машина Карно работает от неисчерпаемых нагревателя и холодильника, например, ядерного реактора и градирни. КПД тепловой машины Карно равен $\eta = (T_н – T_х)/T_н$. При температуре холодильника 0 °С для $T_н = 80$ °С $\eta = 23$ %, для $T_н = 300$ °С $\eta = 52$ %. Для теплового насоса, работающего по обратному циклу Карно, отношение теплоты, переданной нагревателю, к работе, затраченной на вращение насоса, называется коэффициентом K трансформации теплового насоса Карно. Для $T_н = 80$ °С и $T_х = 0$ °С он равен $K = 1/\eta = 440$ %.

В большинстве случаев в качестве нагревателя тепловых машин используются горячие продукты сгорания углеводородного топлива. Данный нагреватель является истощаемым, поскольку для того, чтобы забрать у продуктов сгорания все тепло, необходимо охладить их до температуры окружающей среды. Очевидно, что для такого нагревателя цикл Карно неприменим, поскольку у цикла Карно температура нагревателя должна быть постоянна. Для такого нагревателя наиболее эффективной (обратимой) является тепловая машина с истощаемым нагревателем (рис. 3 справа). Истощаемый нагреватель схематически изображен в виде топки с дымоходом, внутри которого реализован обратимый теплообмен посредством змеевика. Рабочий цикл такой тепловой машины состоит из изотермы, изобары и адиабаты. Важно, что декомпрессор в данной машине один, и он является адиабатическим. Детали такого декомпрессора не обязаны иметь температуру рабочего тела. Это значит, что технически несложно реализовать такую тепловую машину для начальной температуры нагревателя $T_н > 2000$ °С. В машине Карно даже для $T_н = 400$ °С техническая реализация является очень

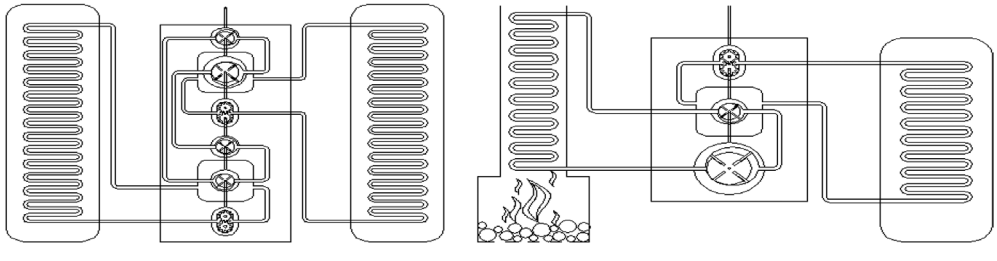


Рис. 3. Обратимые тепловые машины

большой проблемой, поскольку не существует материалов, которые могут долго тереться друг о друга при столь высоких температурах. КПД тепловой машины с истощаемым нагревателем равно $\eta = (T_н - T_x - T_x \ln(T_н / T_x))/(T_н - T_x)$. При температуре холодильника 0 °C для $T_н = 800$ °C $\eta = 53$ %, для $T_н = 1600$ °C $\eta = 67$ %, для $T_н = \infty$ $\eta = 100$ %.

Отопительные котлы. Отопительным котлом [1] называется устройство, предназначенное для нагрева теплоносителя. Наиболее распространенными и экономически выгодными являются котлы на природном газе или твердом топливе. Среди них наиболее удобными и безопасными являются котлы с закрытой камерой сгорания. Такие котлы соединены с окружающей средой (атмосферой), теплоносителем и подачей топлива, как правило, природного газа. Одной из задач данной работы является определение КПД существующих котлов. Но для того, чтобы определить КПД существующих котлов, нужно определить теплоотдачу, которая является теоретически максимально возможной, и принять для нее КПД, равное $\eta = 100$ %. Как следует из всего сказанного ранее, теоретически максимально возможный КПД будет достигнут, если все процессы в котле будут обратимыми.

Однако в традиционных газовых котлах обратимость не может быть достигнута в принципе. В них теплота от пламени с температурой ~800 °C напрямую передается теплоносителю с температурой ~80 °C. Это значит, что воздух с окружающий среды нагревается от 0 °C до 800 °C за счет горения, а потом охлаждается в лучшем случае до температуры теплоносителя 80 °C. Из этого следует, что отношение теплоты, переданной теплоносителю, к энергии, выделившейся при сгорании топлива, составляет максимум ~90 %. Конечно, использование длинного коаксиального дымохода может повысить эту цифру теоретически до 100 %, однако в существующих котлах коаксиальные дымоходы короткие и капли дождя шипят, попадая на внутренний патрубок. Это значит, что даже 90 % от тепла, выделившегося при сгорании топлива, не передается теплоносителю.

Обратимым отопительным котлом можно назвать котел, упомянутый в [8]. Его схема представлена на рис. 4.

Котел работает следующим образом. Теплота от продуктов сгорания топлива передается резервуару с теплоносителем не напрямую, а через тепловую машину, работающую, например, по прямому циклу с истощаемым нагревателем. В этом случае в топке реализован обратимый теплообмен продуктов сгорания и рабочего тела тепловой машины. Тепловая машина преобразует часть передаваемого через нее тепла в механическую энергию, которая используется для вращения теплового насоса, работающего, например, по обратному циклу Карно. Тепловой насос откачивает тепло от окружающей среды и отдает его резервуару с теплоносителем.

Если предположить, что котел оснащен достаточно длинным коаксиальным дымоходом для реализации обратимого теплообмена в нем, то теплота, переданная теплоносителю через тепловую машину, составляет $1–\eta_{тм}$ от энергии, выделившейся при сгорании топлива. Здесь $\eta_{тм}$ – КПД тепловой машины.

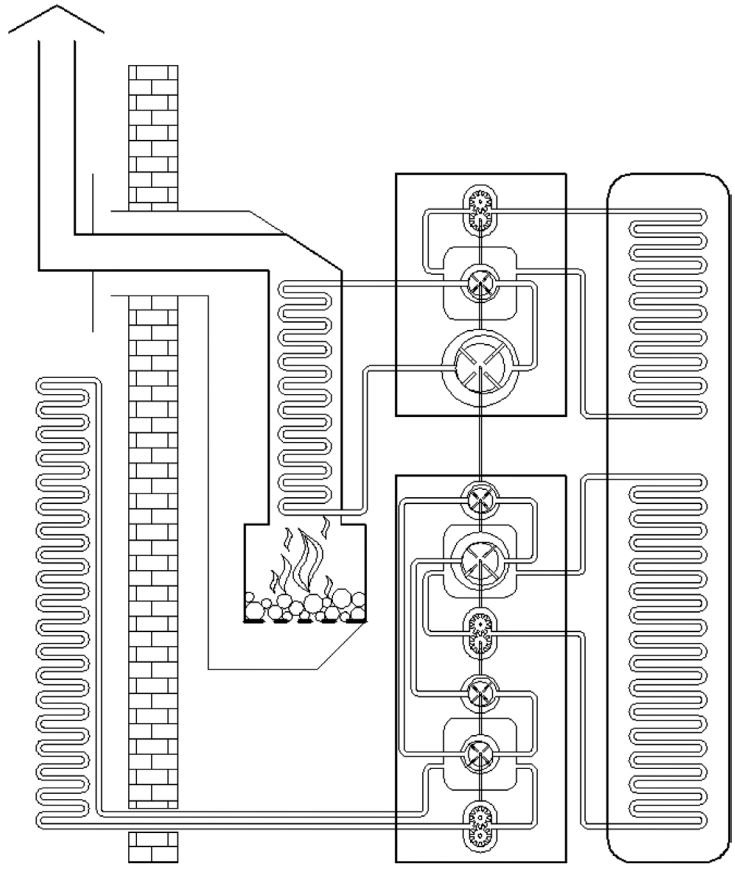


Рис. 4. Котел из [8]

Работа, совершенная тепловой машиной над тепловым насосом, составляет $\eta_{тм}$ от энергии, выделившейся при сгорании топлива. Теплота, переданная резервуару с теплоносителем от теплового насоса равна работе, совершенной тепловой машиной, умноженной на коэффициент трансформации теплового насоса $K_{тн}$. Получается, что отношение теплоты, переданной теплоносителю, к теплоте, выделившейся при сгорании топлива, равно $\eta_{тм} \cdot K_{тн} + 1 – \eta_{тм}$. Подставив числа, получим, что для температуры пламени 800 °С данное отношение равно 255 %, при температуре пламени 1600 °С – 310 %. При бесконечно высокой температуре оно равно 440 %, это и есть теоретически максимально возможное отношение теплоты, передаваемой теплоносителю, к теплоте, выделившейся при сгорании топлива. Следовательно, котел, который, сжигая 1 квт·ч газа, отдает теплоносителю 4,4 квт·ч тепла имеет КПД, равное 100 %. Поскольку традиционные котлы отдают теплоносителю не более 90 % от теплоты, выделившейся при сгорании топлива, их КПД не превышает 20 %.

В реальности котел, упомянутый в [8], не может отдавать теплоносителю в 4,4 раза больше тепла, чем выделяется при горении топлива. Для расчета КПД

котла из [8] были приняты во внимание технические характеристики существующих топок и горелок, тепловых машин, тепловых насосов, тепловые потери, трение, пульсации температур окружающей среды и теплоносителя. Было установлено, что при нынешнем уровне технологий можно создать котел по схеме [8], уверенно дающий кпд 40 %, что вдвое превышает показатели лучших современных котлов. При этом использование двухфазного рабочего вещества позволит использовать намного более простой тепловой насос, нежели обратную машину Карно. Данный КПД соответствует отношению энергии, передаваемой теплоносителю к энергии, выделяемой при сгорании топлива, равному 180 %.

Заключение. Эффективность обратимых термодинамических процессов всегда выше эффективности аналогичных необратимых процессов. Чем тепловые процессы в каком-либо устройстве ближе к обратимым, тем выше КПД такого теплового устройства. Процессы теплопередачи в современных отопительных котлах очень далеки от обратимых. КПД лучших современных котлов не превышает 20 %. Использование котла, упомянутого в [8], позволит повысить данный КПД в 2 раза.

Список использованных источников

1. Рыженко, В. И. Отопительные системы современных загородных домов / В. И. Рыженко. – М. : Оникс, 2007. – 336 с.
2. Крупнов, Б. А. Отопительные приборы, производимые в России и ближнем зарубежье / Б. А. Крупнов, Д. Б. Крупнов. – М. : Изд-во ассоциации строительных вузов, 2010. – 153 с.
3. Turanjanin, V. M. Different heating systems for single family house: energy and economic analysis / V. M. Turanjanin, B. S. Vučićević, M. P. Jovanović // Thermal sciense. – 2015.– Vol. 20, № 1. – P. 309–320.
4. Minea, A. A. Advances in Industrial Heat Transfer / A. A. Minea. – Florida : CRC Press, 2013. – 421 p.
5. Назарова, В. И. Современные системы отопления / В. И. Назарова. – М. : Риполл-классик, 2012. – 320 с.
6. Беккер, Р. Теория теплоты / Р. Беккер. – М. : Энергия, 1974. – 499 с.
7. Зельдович, Я. Б. Теория горения и детонации / Я. Б. Зельдович. – М. : АН СССР, 1944. – 71 с.
8. Отопительный котел : пат. BY 12808 / В. И. Саверченко. – Опубл. 2022.

References

1. Ryzhenko, V. I. Otopitel’nye sistemy sovremennyh zagorodnyh domov / V. I. Ryzhenko. – M. : Oniks, 2007. – 336 s.
2. Krupnov, B. A. Otopitel’nye pribory, proizvodimye v Rossii i blizhnem zarubezh’e / B. A. Krupnov, D. B. Krupnov. – M. : Izd-vo associacii stroitel’nyh vuzov, 2010. – 153 s.
3. Turanjanin, V. M. Different heating systems for single family house: energy and economic analysis / V. M. Turanjanin, B. S. Vučićević, M. P. Jovanović // Thermal sciense. – 2015.– Vol. 20, № 1. – P. 309–320.
4. Minea, A. A. Advances in Industrial Heat Transfer / A. A. Minea. – Florida : CRC Press, 2013. – 421 p.
5. Nazarova, V. I. Sovremennye sistemy otopleniya / V. I. Nazarova. – M. : Ripoll-klassik, 2012. – 320 s.
6. Bekker, R. Teoriya teploty / R. Bekker. – M. : Energiya, 1974. – 499 s.
7. Zel’dovich, Ya. B. Teoriya goreniya i detonacii / Ya. B. Zel’dovich. – M. : AN SSSR, 1944. – 71 s.
8. Otopitel’nyj kotyol : pat. BY 12808 / V. I. Saverchenko. – Opubl. 2022.

УДК 621.316.9, 624.131.437.311

А. Н. Скрипко[1], Н. Е. Шевчик[2], С. М. Барайшук[3], В. Г. Баев[4]

ИСКУССТВЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ ГРУНТА ДЛЯ СОЗДАНИЯ И РЕМОНТА НИЗКООМНЫХ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

[1,2]Кандидат технических наук, Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
[3]Кандидат физико-математических наук, Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь
[4]Кандидат физико-математических наук, Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Приведены результаты исследований по перспективности искусственной обработки грунта электролитическими смесями для строительства и ремонта низкоомных заземляющих устройств. Выявлены рабочие параметры электролитической смеси, предназначенной для искусственной обработки грунта, определены практический и экономический эффект от ее применения, область использования.

Ключевые слова: смесь электролитическая, грунт, заземляющее устройство.

A. N. Skripko[1], N. E. Shevchik[2], S. M. Baraishuk[3], V. G. Baev[4]

ARTIFICIAL SOIL MODIFICATION FOR THE CONSTRUCTION AND REPAIR OF LOW-RESISTANCE GROUNDING DEVICES

[1,2]Ph. D. in Engineering Science, Institute of Power Engineering of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
[3]Ph.D. in Physical and Mathematical, Belarusian state agrarian technical university, Minsk, Republic of Belarus
[4]Ph.D. in Physical and Mathematical, Institute of Power Engineering of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The results of research on the prospects of artificial soil treatment with electrolytic mixtures for the construction and repair of low-resistance grounding devices are presented. The working parameters of the electrolytic mixture intended for artificial soil treatment are revealed, the practical and economic effect of its application, the scope of use are determined.

Keywords: electrolytic mixture, soil, grounding device.

Введение. Одним из проблемных вопросов в энергетике является обеспечение низкого и стабильного сопротивления заземляющего устройства в грунтах с высоким удельным сопротивлением. Сегодня в подобных грунтах для обеспечения сопротивления требованиям [1] зачастую применяют металлоемкий контур заземления, для которого требуются сотни стальных вертикальных стержней километры соединительной стальной полосы, располагаемых на большой территории, что сильно отражается на росте бюджета строительства.

Материалы и методы исследования. Для снижения сопротивления заземляющих устройств в высокоомных грунтах литературой [1] рекомендуется при-

менение глубинных заземлителей, вынос заземлителей, устройство заземлителей с большой площадью и специальная обработка грунта. По мнению авторов, эффективным и экономически выгодным путем снижения сопротивления заземляющего устройства является искусственная обработка грунта. Снижение величины удельного сопротивления грунта повышает его проводимость и требуется меньше затрат и усилий на монтаж заземляющего устройства.

Из литературы [2–5] известно, что повысить электропроводимость грунта, например, возможно его трамбовкой, грунт замещением на грунт с более низким удельным сопротивлением, искусственной обработкой грунта. Трамбовка считается одним из бюджетных способов. Однако на практике эффективность такого способа составляет всего 10–20 % и, как следствие, не сильно влияет на уменьшение металлоемкости заземляющего устройства. Грунтозамещение обеспечивает снижение сопротивления заземляющего устройства в среднем в 2,5 раза. Как оказалось, такой способ оказался экономически не выгодным из-за логистических расходов по доставке больших объемов грунтов с более низким удельным сопротивлением, применения большого количества специальной техники.

Широко известен способ введения в грунт раствора поваренной соли. Однако обработка солью дает краткосрочный сезонный эффект. Введение в грунт металлов в тонкоизмельченном виде в коллоидных растворах показало, что коллоиды не более устойчивы в грунте, чем соляные растворы, и постепенно вымываются из близлежащих к заземляющему устройству слоев.

В развитие способа искусственной обработки грунта на рынке существует масса примеров сухих электролитических смесей [6–7], в основе которых содержаться соль, глина, торф, бетонит, графит, шлак, зола и т. д. Однако в них не разрешен главный вопрос – обеспечение гидростабилизирующей функции, необходимой для долгосрочного поддержания высокой электропроводимости грунта, при относительно небольшой стоимости.

В республике искусственная обработка грунта получила развитие более 10 лет назад. До настоящего времени ведутся постоянные исследования, направленные на поиск оптимальных составов электролитических смесей, гарантировано обеспечивающих снижение удельного сопротивления грунта.

Так, известен опыт белорусских ученых по разработке смесей на основе гидролизованного полиакрилонитрила для уменьшения удельного электрического сопротивления грунта [3]. Авторы указанной работы провели ряд натурных экспериментов, связанных с обработкой смесью на основе гидролизованного полиакрилонитрила околоэлектродного объема заземлителя, и установили, что применение смеси позволило до трех раз уменьшить сопротивление заземляющих устройств в сравнении с контрольными, сгладить сезонные колебания сопротивления заземляющего устройства и капитальные затраты на его монтаж. Разработанный продукт (смесь) не нашел промышленного внедрения, а натурные эксперименты проводились только в вертикальных стержневых заземлителях.

В развитие результатов работы [3] известен первый белорусский опыт внедрения смеси для нормализации сопротивления заземления [8], который произошел в 2018 году. Ее применение позволило при строительстве заземляющего устройства по проекту заземления «ВЛ – 110 КВ Ивацевичи – 220 – Остров опора № 153» обеспечить сопротивление 1,3 Ома при сокращении количества материалов, а также земляных работ до 25 %. Достигнутые положительные результаты по опытной эксплуатации, приведенные в работе [7], не были подтверждены последующими электрофизическим измерениями.

В 2021 году в республике произошел новый виток исследований в данном направлении. Целью исследований послужила необходимость разработки национального аналога электролитического заземления, для которого требовалась разработка новых видов электролитических смесей. Авторами работы [8] рассмотрен вариант организации заземляющего устройства при помощи разработанного электролитического заземлителя [9]. Обоснована возможность использования электролитического заземлителя в высокоомных, в ограниченных условиях строительства заземляющего устройства. Было установлено, что применение электролитического заземлителя позволяет обеспечить снижение сопротивления растеканию тока контура заземления до 10–15 раз в сравнении с контрольным контуром.

Результаты исследования и их обсуждение. В рамках исследований [8] был разработан отличный от аналогов [3, 6, 7] состав электролитической смеси [10] на основе электролита, глинистого компонента и минеральных веществ с низким удельным сопротивлением. На смесь были получены необходимые гигиенические заключения. Натурные и лабораторные исследования смеси показали, что ее рабочее состояние – вязкая субстанция (12–25 % влажности в массовом соотношении), при котором смесь имеет удельное сопротивление 0,26 Ом·м, долгое время не вымывается и не теряет в объеме. Введение в около электродное пространство заземляющего устройства смеси [10] способно уменьшить удельное сопротивление грунта от 25 до 75,5 %, в зависимости от объема смеси и свойств грунта. Смесь [10] не имеет сильной зависимости от воздействия низких температур, что актуально для ее применения на небольшой глубине либо для вечномерзлых грунтов, обладает высокой влагоудерживающей способностью.

Применение смеси нашло двойное использование с вертикальным стержневым заземлителем. В ходе экспериментов было установлено, что ее применение сразу после монтажа позволяет до 1,7 снижать сопротивление заземляющего устройства по отношению к контрольному контуру. Через 30 дней после монтажа падение величины сопротивления заземлявшего устройства составило 2,1 раза, а через 115 дней – 2,9 раза. Таким образом, была доказана заявленная в технических условиях [10] эффективность применения смеси, а также установлена ее практическая значимость: продукт позволяет снизить капитальные затраты на строительство заземляющего устройства, обеспечивать ремонт заземляющих устройств, введенных в эксплуатацию ранее минималь-

ными усилиями. Данное обстоятельство позволяет декларировать ресурсосберегающее значение смеси [10].

Смесь [10] совместно с электролитическим заземлителем прошла опытную апробацию в условиях Республики Беларусь, Республики Армения. В результате апробации в пригороде г. Еревана в грунте с удельным электрическим сопротивлении свыше 300 Ом·м сопротивление заземляющего устройства через 60 дней показало 5,9 Ом. Экономический эффект составил 4,1 раза по отношению к модульно-стержневым вертикальным заземлителям и горизонтальной полосы. На опытной площадке в Минском районе одним электролитическим горизонтальным 3-метровым заземлителем в грунте с удельным сопротивлением свыше 400 Ом при помощи электролитического заземления была достигнута величина заземляющего устройства 9,8 Ом. Эффект был выражен в малой металлоемкости заземляющего устройства и низкой стоимости монтажа.

В настоящее время результаты применения смеси [10] прошли публичное обсуждение на международных научно-практических конференциях, площадке Международного научного семинара им. Ю. Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики». К разработке проявили интерес специалисты из научной и промышленной области деятельности.

Заключение. Исследования показали, что развитие в республике направления искусственной обработки грунта при строительстве и ремонте низкоомных заземляющих устройств имеет большую практичную значимость.

В рамках развития метода искусственной обработки грунта были созданы отечественные продукты для организации заземления, отличающиеся от аналогов лучшими эксплуатационными характеристиками, имеющие спрос за рубежом. Экспериментально была установлена возможность применения разработанной электролитической смеси с традиционными мерами заземления. Апробация показала, что замещение грунта в околоэлектродном пространстве на электролитическую смесь, имеющую низкое удельное сопротивление, дает заметный технический и экономический эффект.

Список используемых источников

1. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемосдаточных испытаний: ТКП 339-2011(02230). – Введ. 23.08.2011. – Минск : М-во энергетики Респ. Беларусь, 2011. – 593 с.

2. Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации в установках проводной связи и радиотрансляционных узлов / М-во связи СССР, Гл. упр. междунар. телефонной связи. – М. : Связь, 1971. – С. 67.

3. Драко, М. А. О разработке смеси на основе гидролизованного полиакрилонитрила для уменьшения удельного электрического сопротивления грунта / М. А. Драко, С. М. Барайшук, И. А. Павлович // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики – 2021. – № 23 (1). – С. 80–92.

4. Коструба, С. И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств / С. И. Коструба. – 2-е изд. (перераб. и доп.). – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 166 с.

5. Бургсдорф, В. В. Заземляющие устройства электроустановок / В. В. Бургсдорф, А. И. Якобе. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.

6. Грибанов, А. Н. Бипрон – заземление электроустановок / А. Н. Грибанов // Экспозиция Нефть Газ. – 2016. – № 4. – С. 72–75.

7. Смесь для нормализации заземления «Поспех» [Электронный ресурс] // Интербелтрейд. – Режим доступа : http://www.zazemlenie.by/zazemlenie/smes-pospekh. – Дата доступа : 22.07.2022.

8. Снижение сопротивления заземляющих устройств применением обработки грунта неагрессивными к материалу заземлителя стабилизирующими влажность добавками / С. М. Барайшук [и др.] // Агропанорама. – 2021. – № 5 (147). – С. 28–33.

9. Заземлитель электролитический «TERRAZN» : ТУ BY 691788197.005-2021: введ. 18.05.2021 / ТерраЦинк. – 2021. – 9 с.

10. Смесь для нормализации заземления «TERRAZN»: околоэлектродная : ТУ BY 691788197.004-2021 : введ. 18.05.2021 / ТерраЦинк. – 2021. – 9 с.

References

1. Elektroustanovki na napryazhenie do 750 kV. Linii elektroperedachi vozdushnye i tokoprovody, ustrojstva raspredelitel'nye i transformatornye podstancii, ustanovki elektrosilovye i akkumulyatornye, elektroustanovki zhilyh i obshchestvennyh zdanij. Pravila i zashchitnye mery elektrobezopasno sti. Uchet elektroenergii. Normy priemosdatochnyh ispytanij: TKP 339-2011(02230). – Vved. 23.08.2011. – Minsk : M-vo energetiki Resp. Belarus', 2011. – 593 s.

2. Rukovodstvo po proektirovaniyu, stroitel'stvu i ekspluatacii v ustanovkah provodnoj svyazi i radiotranslyacionnyh uzlov / M-vo svyazi SSSR, Gl. upr. mezhdunar. telefonnoj svyazi. – M. : Svyaz', 1971. – S. 67.

3. Drako, M. A. O razrabotke smesi na osnove gidrolizovannogo poliakrilonitrila dlya umen'sheniya udel'nogo elektricheskogo soprotivleniya grunta / M. A. Drako, S. M. Barajshuk, I. A. Pavlovich // Izv. vyssh. Ucheb. zavedenij. Problemy energetiki. – 2021. – № 23 (1). – S. 80–92.

4. Kostruba, S. I. Izmerenie elektricheskih parametrov zemli i zazemlyayushchih ustrojstv / S. I. Kostruba. – 2-e izd. (pererab. i dop.). – M. : Energoatomizdat, 1983. – 166 s.

5. Burrsdorf, V. V. Zazemlyayushchie ustrojstva elektroustanovok / V. V. Burrsdorf, A. I. Yakobe. – M. : Enerroatomizdat, 1987. – 400 s.

6. Gribanov, A. N. Bipron – zazemlenie elektroustanovok / A. N. Gribanov // Ekspoziciya Neft' Gaz. – 2016. – № 4. – S. 72–75.

7. Smes' dlya normalizacii zazemleniya «Pospekh» [Electronic resource] // Interbeltrejd. – Mode of access : http://www.zazemlenie.by/zazemlenie/smes-pospekh. – Date of access : 22.07.2022.

8. Snizhenie soprotivleniya zazemlyayushchih ustrojstv primeneniem obrabotki grunta neagressivnymi k materialu zazemlitelya stabiliziruyushchimi vlazhnost' dobavkami / S. M. Barajshuk [et al.] // Agropanorama. – 2021. – № 5 (147). – S. 28–33.

9. Zazemlitel' elektroliticheskij «TERRAZN» : TU BY 691788197.005-2021: vved. 18.05.2021 / TerraCink. – 2021. – 9 s.

10. Smes' dlya normalizacii zazemleniya «TERRAZN»: okoloelektrodnaya : TU BY 691788197.004-2021 : vved. 18.05.2021 / TerraCink. – 2021. – 9 s.

УДК 621.31

Л. А. Хафизов[1], Л. И. Камалиева[2], О. Е. Куракина[3]

ТЕПЛОВИЗИОННОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ СВЯЗИ

[1,2]Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация
[3]Кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный энергетический университет Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрена общая конструкция, стойкость к воздействиям и важность конденсаторов связи, а также представлена тепловизионная диагностика этого оборудования. Проведен расчет электрической емкости и тангенса угла диэлектрических потерь tgδ, результаты сведены в таблицу.

Ключевые слова: тепловизионная диагностика, конденсатор связи, дефекты, воздействие, термограмма.

L. A. Khafizov[1], L. I. Kamalieva[2], O. E. Kurakina[3]

THERMAL IMAGE DIAGNOSIS COMMUNICATION CAPACITORS

[1,2]Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation
[3]Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Annotation. The general design, resistance to impacts and the importance of coupling capacitors are considered, as well as thermal imaging diagnostics of this equipment is presented. The electrical capacitance and dielectric loss tangent tgδ were calculated, the results are summarized in the table.

Keywords: thermal imaging diagnostics, coupling capacitor, defects, impact, thermogram.

Введение. От исправности элементов оборудования зависит надежность высокочастотного тракта. Одним из ведущих ролей занимают конденсаторы связи, которые отделяют аппаратуру связи от высокого напряжения частоты 50 Гц, пропуская сигналы высокой частоты по каналам связи [1].

Конденсаторы связи безопасного исполнения (рис. 1) состоят из фарфорового корпуса, внутри которого находятся параллельно соединенные пакеты из последовательно соединенных конденсаторных секций рулонного типа. Тепловое расширение масла скомпенсировано в нижней части фарфоровой покрышки. За счет использования новых прогрессивных материалов и экологически безопасной жидкости данные конденсаторы имеют высокую стойкость к воздействиям энергий внутреннего короткого замыкания и взрывам, что обеспечивает безопасность для других оборудований [2].

Среди дефектов конденсаторов связи, которые можно выявить с помощью тепловизионного оборудования, относят:

обрыв между пакетами внутри конденсатора;

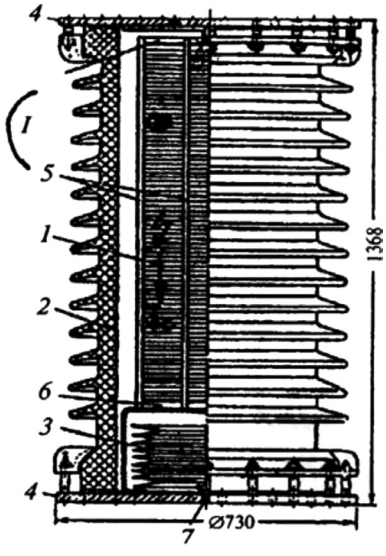


Рис. 1. Устройство конденсатора связи с номинальным напряжением $110\sqrt{3}$: *1* – пакет из секций бумажных конденсаторов; *2* – фарфоровая покрышка; *3* – сильфон; *4* – фланец; *5* – изоляционные планки; *6* – металлическая плита; *7* – выходное отверстие сильфона

пробой отдельных секций;

повреждения открытых контактов.

Результаты исследования и их обсуждение. При тепловизионной диагностике открытых контактных соединений следует выполнять нормативные указания.

Предельные значения температуры нагрева контактных соединений силовых конденсаторов, отдельно стоящих или соединенных в батарею, не должны превышать нормативных значений.

Неисправности, связанные с нарушением внутренних элементов конденсатора, могут сопровождаться появлением на поверхности фарфоровой покрышки температурных аномалий, так как у деформированного конденсатора номинальное рабочее напряжение может уменьшиться.

На рис. 2 можно рассмотреть термограмму одной из фаз конденсатора, которая состоит из двух элементов. Если провести оценку нижнего и верхнего элемента, можно разглядеть изменение температуры на поверхности крышки (огибающая термопрофилограммы расположена выше, чем у верхнего элемента, и резко поднимается в верхней части элемента) [3].

Из таблицы видно, что у нижнего элемента тангенс угла диэлектрических потерь, который характеризует активные потери энергии в конденсаторе,

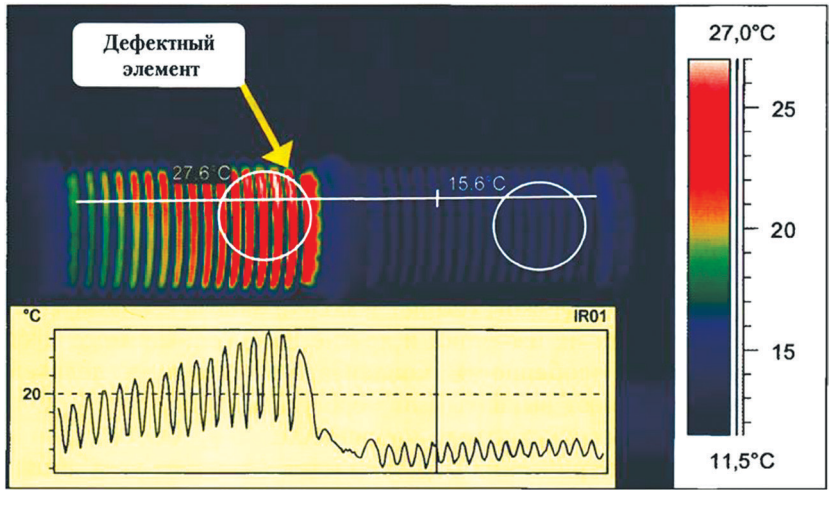


Рис. 2. Термограмма одной из фазы конденсатора связи 330 кВ

Результаты измерений диэлектрических характеристик конденсатора до и после возникновения дефекта

Нижний элемент				Верхний элемент			
Данные при $T = 23°$		Данные при $T = 21°$		Данные при $T = 23°$		Данные при $T = 21°$	
tgδ,%	C, пф	tgδ,%	C, пф	tgδ,%	C, пф	tgδ,%	C, пф
0,33	34987	0,18	14300	0,48	16578	0,15	14000

увеличился. Следовательно, это выявляет частичный пробой последовательно соединенных секций конденсаторов, расположенных внутри нижнего элемента, и старение изолятора [3].

Ниже на рис. 3 приведен пример проведения тепловизионного контроля конденсатора связи 110 кВ [5].

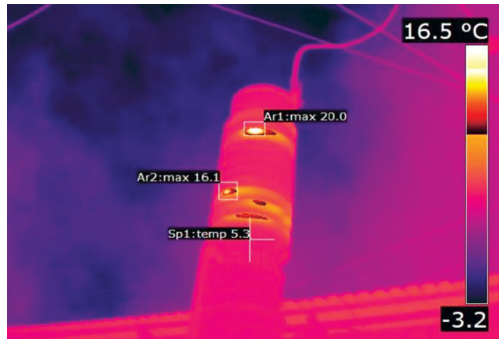


Рис. 3. Термограмма конденсатора связи воздушной линии электропередачи напряжением 110 кВ

Восстановление конденсаторов с внешними дефектами не представляет трудностей, но при выявлении на поверхности покрышки разности температурных значений у других элементов того же присоединения на 3 °С и более, нужно убедиться, не является ли данный фактор подтверждающим неисправность [6].

При обнаружении внутренних дефектов проводят дополнительные высоковольтные испытания и измерения, чтобы решить, возможна ли эксплуатация оборудования.

Выявлено, что в конденсаторах связи может возникнуть внутренний дефект, если температура фарфоровой покрышки приблизительно близка к температуре окружающего воздуха. Температурные дефекты делительных конденсаторов воздушных высоковольтных выключателей следует выявить только при отключенном положении выключателя.

Заключение. Тепловизионный контроль конденсаторов связи необходим для надежного и бесперебойного обеспечения питания электрической энергией. При возникновении дефектов у конденсаторов в системе электроснабжения в электрической сети могут возникнуть пульсации высших гармонических составляющих тока, что приведет к остановке питания сложного технологического процесса.

Список использованных источников

1. Проектирование ВЧ каналов по ЛЭП – конденсаторы связи [Электронный ресурс] // Электрические сети. – Режим доступа : https://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/proektirovanie-vch-kanalov-po-lep/Page-6.html. – Дата доступа : 06.04.2022.

2. Принцип работы и назначение ВЧ-каналов связи высоковольтных линий электропередач [Электронный ресурс] // Школа для электрика. – Режим доступа : http://electricalschool.info/main/drugoe/1568-princip-raboty-i-naznachenie-vch.html. – Дата доступа : 06.04.2022.

3. Тепловизионное диагностирование высоковольтных конденсаторов [Электронный ресурс] // Электроэнергетика. – Режим доступа : https://forca.com.ua/statti/oborudovanie/teplovizionnoe-diagnostirovanie-vysokovoltnyh-kondensatorov.html. – Дата доступа : 07.04.2022.

4. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Типовые технические решения по системам ВЧ связи : СТО 56947007–33.060.40.134–2012. – Введ. 30.10.2012. – М. : ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ, 2012 г. – 63 с.

5. Шпиганович, А. Н. Тепловизионный контроль конденсаторов и высокочастотных заградителей / А. Н. Шпиганович, А. Н. Мамонтов, А. В. Бойчевский // Вестн. Тамбов. гос. техн. ун-та. – 2020. – Т. 26, № 4. – С. 555–563.

6. Оборудование высокочастотной связи [Электронный ресурс] // Росэнергосервис. – Режим доступа : http://rosenergoservis.ru/hf_1.pdf. – Дата доступа : 07.04.2022.

References

1. Proektirovanie VCH kanalov po LEP – kondensatory svyazi [Electronic resource] // Elektricheskie seti. – Mode of access : https://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/proektirovanie-vch-kanalov-po-lep/Page-6.html. – Date of access : 06.04.2022.

2. Princip raboty i naznachenie VCH-kanalov svyazi vysokovol'tnyh linij elektroperedach [Electronic resource] // Shkola dlya elektrika. – Mode of access : http://electricalschool.info/main/drugoe/1568-princip-raboty-i-naznachenie-vch.html. – Date of access : 06.04.2022.

3. Teplovizionnoe diagnostirovanie vysokovol'tnyh kondensatorov [Electronic resource] // Elektroenergetika. – Mode of access : https://forca.com.ua/statti/oborudovanie/teplovizionnoe-diagnostirovanie-vysokovoltnyh-kondensatorov.html. – Date of access : 07.04.2022.

4. Standart organizacii OAO «FSK EES». Tipovye tekhnicheskie resheniya po sistemam VCH svyazi : STO 56947007-33.060.40.134-2012. – Vved. 30.10.2012. – M. : ENERGOSET'PROEKT, 2012. – 63 s.

5. Shpiganovich, A. N. Teplovizionnyj kontrol' kondensatorov i vysokochastotnyh zagraditelej / A. N. Shpiganovich, A. N. Mamontov, A. V. Bojchevskij // Vestn. Tambov. gos. tekhn. un-ta. – 2020. – T. 26, № 4. – S. 555–563.

6. Oborudovanie vysokochastotnoj svyazi [Electronic resource] // Rosenergoservis. – Mode of access : http://rosenergoservis.ru/hf_1.pdf. – Date of access : 07.04.2022.

УДК 621.314

М. Н. Маслахова[1], Н. В. Роженцова[2]

ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ И ИХ НЕГАТИВНОЕ ВЛИЯНИЕ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

[1]Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация
[2]Кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Аннотация. Главной причиной ухудшения качества электроэнергии является использование нелинейных электроприемников, в процессе работы которых потребляется энергия основной частоты, расходуемая не только на совершение полезной работы и покрытие потерь, но и на образование высших гармоник, которые негативно воздействуют на внешнюю сеть.

Ключевые слова: высшие гармоники, нелинейная нагрузка, качество электроэнергии, фильтры, фильтрокомпенсирующее устройство.

M. N. Maslakhova[1], N. V. Rozhentsova[2]

HIGHER HARMONICS AND THEIR NEGATIVE EFFECT ON THE OPERATION OF ELECTRICAL INSTALLATIONS

[1]Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation
[2]Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Annotation. The main reason for the deterioration in the quality of consumption is the use of non-linear power receivers in the process of operation, which consume the energy consumed by the main frequencies, which are spent not only on performing useful work and covering costs, but also on the formation of higher harmonics that adversely affect needs.

Keywords: higher harmonics, non-linear load, power quality, filters, filter compensating device.

Введение. Каждый год наука становится все более продвинутой, а возможности техники стали намного обширнее, чем раньше. Однако такое стремительное развитие техники не могло не отразиться на работе систем электроснабжения. Обусловлено это новой технологией преобразования энергии. В сетях низкого напряжения практически каждый прибор, потребляющий энергию, имеет импульсный источник питания, другими словами, является нелинейной нагрузкой [1].

Ухудшение качества электроэнергии, спровоцированное ростом количества используемых нелинейных потребителей в последние годы, становится все более серьезной проблемой для распределительных сетей. Главной причиной возникновения этой проблемы является негативное воздействие высших гармоник на синусоидальность напряжения [2].

Результаты исследования и их обсуждение. Возникновение высших гармоник в сети приводят к следующим серьезным последствиям.

1. Потери в электрических машинах. Гармонические составляющие высокого порядка приводят к дополнительным потерям в обмотках статора, в цепях ротора, вызванным повышением общей температуры машины, а также к местным перегревам.

2. Потери в трансформаторах. С появлением в электрических сетях высших гармоник (ВГ) изменяются составляющие тока и напряжения, что вызывает в трансформаторах увеличение потерь на гистерезисе, а также потерь, связанных с вихревыми токами в стали, и потерь в обмотках трансформатора.

3. Потери в линиях электропередачи. ВГ в кабельных линиях воздействуют на диэлектрик. Вследствие этого увеличивается число повреждений кабельных линий, что может увеличить потери на корону.

4. Потери в компенсирующих устройствах. В случае превышения гармониками уровней, предельно допустимых для конденсаторов, установка компенсирующих устройств создает угрозу появления параллельного резонанса между индуктивностью сети и компенсирующими конденсаторами или ветвями фильтра, которые влекут за собой существенное увеличение токов через конденсаторы и последующий выход их из строя по причине нагрева, вызванного дополнительными потерями [3].

5. Потери в учете электрической энергии. Класс точности счетчиков электроэнергии, гарантируемый изготовителем, определяется при номинальных условиях: синусоидальном токе и напряжении и т. д. Но при наличии ВГ счетчики эксплуатируются не при номинальных условиях и ведется ошибочная работа устройств учета электроэнергии.

6. Помехи в устройствах релейной защиты и автоматики. Вследствие протекания несинусоидальных токов возникает дополнительный нагрев элементов защитных устройств, что приводит к ложным срабатываниям автоматических выключателей, автоматических выключателей дифференциального тока, предохранителей и различных видов реле [4].

Заключение. Проблема высших гармоник напряжений и токов в распределительных сетях электроснабжения является крайне актуальной и требует пристального внимания со стороны научно-исследовательских структур и электротехнических инженеров, занимающихся анализом и измерениями показателей качества электрической энергии.

Список использованных источников

1. Джураев, Ш. Дж. Обеспечение качества электрической энергии в энергосистемах содержащих нелинейную нагрузку / Ш. Дж. Джураев, Ш. М. Султонов // Политехн. вестн. Сер. Инженер. исслед. – 2018. – № 1/41. – С. 20–33.

2. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 32144-2013. Введ. 01.07.2014. – М. : Стандартинформ, 2014. – 15 с.

3. Сидоров, А. Е. Анализ переходного процесса в схеме замещения компенсатора реактивной мощности на основе транзисторного ключа в режиме короткого замыкания [Электронный ресурс] / А. Е. Сидоров, М. С. Литвиненко, Е. В. Трутнева // Федоровские чтения – 2018 : материалы XLVIII Междунар. научн.-практ. конф., Москва, 14–16 ноября 2018 г. / под общ. ред. Б. И. Кудрина, Ю. В. Матюниной. – М. : МЭИ. 2018. – С. 214–218.

4. Повышение качества электроэнергии за счет снижения несинусоидальности кривой напряжения / Д. С. Осипов [и др.]. − Омск, 2009. − 14 с. − Деп. в ВИНИТИ 30.09.09, № 606.

References

1. Dzhuraev, Sh. Dzh. Obespechenie kachestva elektricheskoj energii v energosistemah soderzhashchih nelinejnuyu nagruzku / Sh. Dzh. Dzhuraev, Sh. M. Sultonov // Politekhn. vestn. Ser. Inzhener. issled. – 2018. – № 1/41. – S. 20–33.

2. Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskih sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoj energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya : GOST 32144-2013. Vved. 01.07.2014. – M. : Standartinform, 2014. – 15 s.

3. Sidorov, A. E. Analiz perekhodnogo processa v skheme zameshcheniya kompensatora reaktivnoj moshchnosti na osnove tranzistornogo klyucha v rezhime korotkogo zamykaniya [Electronic resource] / A. E. Sidorov, M. S. Litvinenko, E. V. Trutneva // Fedorovskie chteniya – 2018 : materialy XLVIII Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf., Moskva, 14–16 noyabrya 2018 g. / pod obshch. red. B. I. Kudrina, Yu. V. Matyuninoj. – M. : MEI. 2018. – S. 214–218.

4. Povyshenie kachestva elektroenergii za schet snizheniya nesinusoidal'nosti krivoj napryazheniya / D. S. Osipov [et al.]. – Omsk, 2009. – 14 s. – Dep. v VINITI 30.09.09, № 606.

УДК 621.565.93/.95

Г. С. Маршалова

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В РЕЖИМАХ ВЫНУЖДЕННОЙ, СВОБОДНОЙ И СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ

Кандидат технических наук, Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье проведен анализ эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения в режимах вынужденной, свободной и смешанной конвекции, согласно которому продемонстрирована возможность снижения потребления энергии до 56,02 т у. т / аппарат.

Ключевые слова: аппарат воздушного охлаждения, вынужденная конвекция, свободная конвекция, смешанная конвекция, теплоотдача, число Нуссельта.

G. S. Marshalova

COMPARISON ANALYSIS OF THE AIR-COOLED APPARATUS OPERATION IN FORCED, FREE AND MIXED CONVECTION

Ph. D. in Engineering Science, Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. In the article have been analyzed the operation of air-cooled apparatus in the modes of forced, free and mixed convection, according to which the possibility of reducing energy consumption to 56.02 tons / year is demonstrated.

Keywords: air-cooled apparatus, forced convection, free convection, mixed convection, heat exchange, Nusselt number.

Введение. Аппарат воздушного охлаждения (АВО) – устройство, предназначенное для охлаждения и конденсации различных технологических средств, применяемых в химической, нефтехимической, газовой и пищевой промышленности [1], в тепло- и электроэнергетике [2, 3], в холодильной технике [4], в деревообрабатывающей промышленности [5], на атомных станциях [6].

Основными элементами аппаратов воздушного охлаждения являются теплообменная секции, внутри которой расположен трубный пучок; вентилятор с приводом; устройства для регулирования расхода охлаждающего воздуха; опорные и ограждающие конструкции.

Трубный пучок (рис. 1) поперечно обтекается снаружи охлаждающим воздухом и имеет прямоугольное фронтальное сечение с различной глубиной

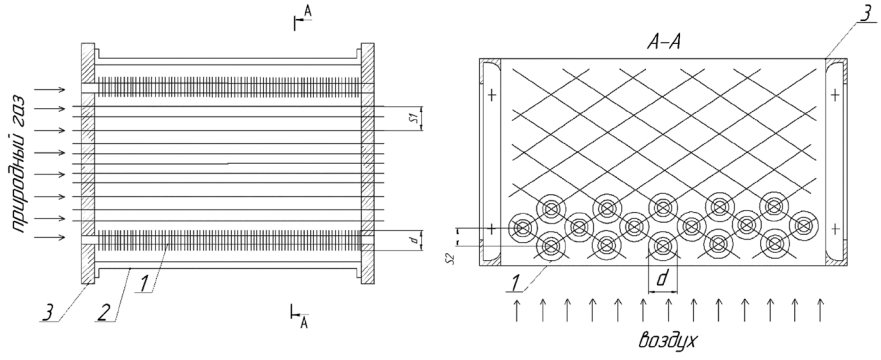


Рис. 1. Трубный пучок аппарата воздушного охлаждения: *1* – оребренная труба; *2* – кожух; *3* – трубная решетка

в зависимости от количества поперечных рядов. Наиболее распространенными является четырех-, шести- и восьмирядные компоновки. В некоторых случаях применяются аппараты малорядных компоновок при z = 1–3 [7], например, в калориферах лесосушильных камер [5], а также для отопления промышленных цехов, зданий зрелищных сооружений, промышленных цехов [8].

Трубы, как правило, размещаются в пучке шахматно, так как такое расположение обеспечивает более высокую теплоотдачу в сравнении с коридорным примерно на 25–33 % [9]. В большинстве аппаратов воздушного охлаждения с шахматным расположением используется классическая разбивка труб по равностороннему треугольнику.

Стоит отметить, что при воздушном охлаждении для теплообменных аппаратов характерно существенное различие коэффициентов теплоотдачи воздуха и охлаждаемых или конденсируемых теплоносителей. Для компенсации этого явления в секциях АВО применяются внешне оребренные трубы, у которых площадь наружной поверхности до 25 раз больше внутренней.

В настоящее время существует большое количество типов ребер для труб АВО. Однако считается, что более технологичными и практичными являются оребренные трубы, изготавливаемые из сплошной толстостенной трубы, с нарезаемыми методом поперечной накатки ребрами (труба пропускается через ряд формовочных дисков для нарезки ребер) [1]. Данный процесс оребрения имеет высокую производительность, хорошо поддается автоматизации и механизации.

Согласно государственной программе «Энергосбережение», повышение эффективности производственной сферы национальной экономики [10] при внедрении энергосберегающих мероприятий является приоритетом развития Республики Беларусь на 2021–2025 гг. Некоторые из таких мероприятий могут быть направлены на интенсификацию режимов работы аппаратов воздушного охлаждения, эффективность эксплуатации которых в основном зависит от количества потребляемой электрической энергии на привод вентиляторов. Основным режимом эксплуатации АВО является режим вынужденной конвекции [1].

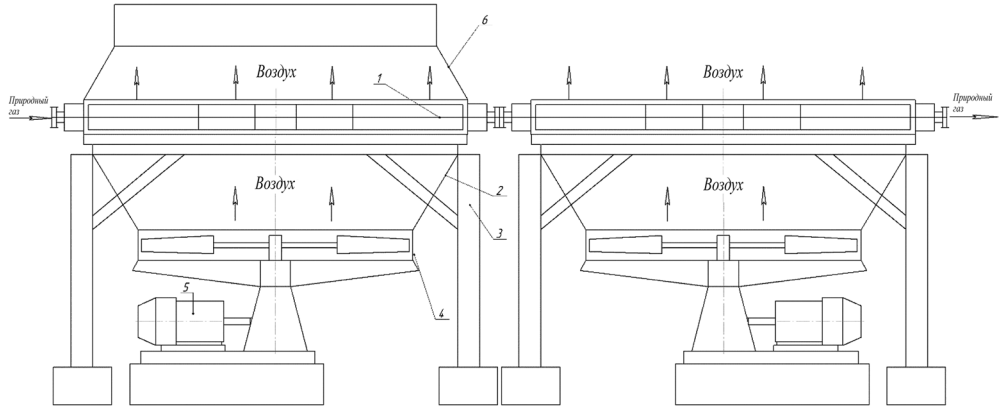


Рис. 2. Общий вид АВО с вытяжной шахтой; *1* – теплообменный пучок; *2* – вентилятор; *3* – привод вентилятора; *4* – диффузор; *5* – опоры; *6* – вытяжная шахта

Однако в [11] предлагается использование их в энергосберегающем режиме с частичным отключением вентиляторов при уменьшении температуры окружающего воздуха до определенных значений с сохранением заданного теплового режима, то есть перевод их в режим эксплуатации при свободной конвекции. Однако данный режим характеризуется сниженными коэффициентами теплоотдачи.

Достичь дополнительной экономии энергии возможно, увеличив время эксплуатации АВО с частично или полностью выключенными вентиляторами, интенсифицировав теплообмен с помощью установки вытяжной шахты над трубным пучком [9] (рис. 2). При этом АВО будет использоваться в режиме смешанной конвекции, когда вынужденный и свободный конвективный теплообмен играют равнозначную роль и никаким из этих процессов невозможно пренебречь. Также применение вытяжной шахты позволит исключить рециркуляцию воздуха в аппарате и повысить срок службы вентиляторов с приводами.

Цель работы – сравнительный анализ эффективности эксплуатации АВО в режимах вынужденной, свободной и смешанной конвекции.

Материалы и методы исследования. Исследовался четырехрядный аппарат, состоящий из двух вентиляторов и теплообменного пучка (см. рис. 1), который комплектуется из шахматно расположенных оребренных труб (поперечный шаг составляет S_1 = 58 мм, продольный – S_2 = 50,5 мм) со следующими параметрами: длина оребренных труб l = 8 м; диаметр трубы у основания оребрения d_0 = 26,4 мм; диаметр трубы на торцах оребрения d = 56,8 мм; высота ребра h = 15,2 м; шаг ребра s = 2,43 мм; коэффициент оребрения φ = 21.

Параметры вытяжной шахты приняты согласно рекомендациям [12].

Основные исходные данные для расчетов представлены в табл 1.

Расчет режима вынужденной конвекции осуществлялся по рекомендациям [13], свободной – [11], смешанной – [12].

При расчете АВО в режимах свободной и смешанной конвекции аппарат условно делится на две части: горячую (над вентилятором № 1, трубный пучок

Таблица 1. **Исходные данные к расчету АВО**

Величина, размерность	Обозначение	Значение
Расход охлаждаемого природного газа, кг/с	G_1	25
Температура природного газа на входе в аппарат, °С	t_1'	70
Температура природного газа на выходе, °С	t_1''	45
Температура охлаждающего воздуха на входе, °С	t_2'	30
Частота вращения колеса вентилятора, об/мин	ω	425
Угол установки лопастей, °С	β	20
Мощность вентилятора, кВт	N	37
Высота вытяжной шахты, м	H	5,1
Диаметр вытяжной шахты, м	$d_{отв}$	5,5
Высота конфузора, м	$h_{конф}$	0,3

над которым будет эксплуатироваться в режиме свободной / смешанной конвекции) и холодную (над вентилятором № 2, трубный пучок над которым постоянно работает в режиме вынужденной конвекции). При этом принимается, что температура теплоносителя равномерно распределена в сечении А–А (рис. 3) и потоки воздуха в различных частях АВО не перемешиваются.

Расчет холодной части аппарата, работающей при вынужденной конвекции произведен согласно методике [13]. По результатам расчета получены значения следующих величин:

коэффициент теплопередачи k = 24,73 Вт/(м^2·К);

расчетный объемный расход воздуха через один вентилятор (с учетом аэродинамического сопротивления шахты $\Delta P_ш$ = 17,5 Па [14]) V_p = 83,3 м^3/с;

теплоемкость воздуха c_2 = 1005 Дж/(кг·К);

коэффициент теплоотдачи со стороны природного газа α_1 = 1426 Вт/(м^2·К);

термическое сопротивление загрязнений со стороны природного газа R_1 = 0,00018 (м^2·К)/Вт;

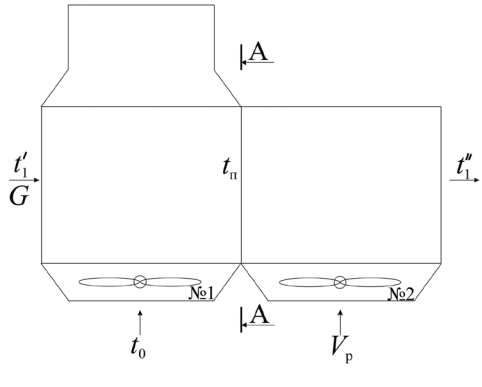


Рис. 3. Схема модели аппарата воздушного охлаждения к тепловому расчету в режиме смешанной конвекции

термическое сопротивление загрязнений со стороны охлаждающего воздуха R_2 = 0,0006 (м^2·К)/Вт;

контактное термическое сопротивление $R_к$ = 0,00016 (м^2·К)/Вт.

Расчет проведен итерационным методом, при котором перезаданием температур t_0, $t_п$ получено соответствие значений балансового и расчетного теплового потока аппарата Q = 1 680 000 Вт.

Основным отличием расчетов АВО в режимах свободной и смешанной конвекции является применяемое для них уравнение подобия. Для АВО, эксплуа-

тируемого в режиме свободной конвекции, использовалось следующее уравнение [15]:

$$\mathrm{Nu} = 1{,}81 \cdot 10^{-3} \mathrm{Gr}^{0{,}48} \left(1 - \exp(-5{,}8 \cdot 10^5 / \mathrm{Gr})\right), \quad (1)$$

где $\mathrm{Gr} = \dfrac{g\beta(t_{ст} - t_0) d_0^3}{\nu^2}$ – число Грасгофа; g – ускорение свободного падения, м/с^2; β – коэффициент объемного расширения, К$^{-1}$; $t_{ст}$ – температура стенки трубы у основания трубы, °С; t_0 – температура окружающего воздуха, °С; ν – коэффициент кинематической вязкости м^2/с.

Для АВО, работающего в режиме смешанной конвекции [12]:

$$\mathrm{Nu} = \left(0{,}00313 + 0{,}07693 \cdot 0{,}45^z\right) \cdot \left(1{,}1 - \exp(-1{,}69 \cdot z^{0{,}72} \cdot \chi_ш)\right) \times \\ \times \left(1{,}3 - \exp(-7{,}65 \cdot 10^{-4} \cdot z^{0{,}72} \cdot H / d_э)\right) \cdot \mathrm{Gr}^{0{,}48}, \quad (2)$$

где z – число поперечных рядов в пучке; $\chi_ш = f_{отв}/f_{сж}$ – коэффициент сужения площади сечения выходной шахты по отношению к сжатому сечению пучка; $f_{отв} = \pi \cdot d_{отв}^2/4$ – площадь выходного отверстия вытяжной шахты, м^2;

$f_{сж} = l \cdot n \cdot S_1 \cdot \left[1 - \left(\dfrac{1}{S_1}\right) \cdot d\right]$ – площадь сжатого сечения пучка, м^2;

n – количество труб в ряду, шт.;

H – высота вытяжной шахты, м;

$d_э = \dfrac{2s}{2h + s} S_1 \cdot \chi$ – эквивалентный диаметр сжатого поперечного сечения пучка, м;

$\chi = 1 - \dfrac{1}{S_1}\left(d_0 + 2\dfrac{h\Delta}{s}\right)$ – коэффициент загромождения оребренными трубами поперечного сечения пучка для прохода воздуха.

Окончательно принято для режима свободной конвекции – t_0 = 7,6 °С, $t_п$ = 69,12 °С; смешанной конвекции – t_0 = 12,1 °С, $t_п$ = 66,45 °С.

Результаты исследования и их обсуждение. Результатом выполненного теплового расчета (табл. 2) является снижение эксплуатационных затрат аппарата воздушного охлаждения, связанных с расходом электрической энергии на привод вентиляторов за счет увеличения температуры охлаждающего воздуха благодаря переходу в режимы свободной и смешанной конвекции.

Следует отметить, что вследствие уменьшения рабочего времени вентилятора уменьшится ремонтный цикл, следовательно, уменьшатся расходы на различные виды ремонта и обслуживания.

Экономия электроэнергии Ээ, кВт·ч, на привод вентилятора рассчитывалась по формуле:

$$Э_э = N \cdot \tau, \quad (3)$$

где N = 37 кВт – потребляемая мощность электродвигателем вентилятора, кВт; τ – предполагаемое время работы аппарата воздушного охлаждения в энерго-

Таблица 2. **Сравнительный анализ эксплуатации АВО в режимах вынужденной, свободной и смешанной конвекции**

Параметры	Режимы эксплуатации аво		
	вынужденная конвекция	свободная конвекция	смешанная конвекция
Температура перехода в энергосберегающий режим, °С	–	7,6	12,1
Количество часов работы в энергосберегающем режиме в год	0	3984	5184
Затраты на работу АВО (для двух вентиляторов), кВт·ч	648 240	500 832	456 432
Экономия энергии на привод вентилятора, кВт·ч	–	147 408	191 808
Затраты на работу АВО, т у. т.	189,35	146,29	133,32
Экономия энергии, т у. т. / аппарат	–	43,06	56,02
Денежная экономия, долл. США / аппарат	–	9042,15	11765,69

сберегающем режиме в году, ч (рассчитывалось по климатическим таблицам для г. Минска [16]).

Экономия Э, т у. т., рассчитывается согласно формуле:

$$Э_э = b_Э \cdot Э_э, \quad (4)$$

где $b_Э$ – усредненный расход топлива на отпуск электроэнергии от источников ГПО «Белэнерго», принимаемый равным $0{,}2921 \cdot 10^{-3}$ т у. т. / кВт·ч [10].

Ориентировочная стоимость 1 т у. т. на 2022 г. составляет 210 долл. США [10].

Заключение. Таким образом, при эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения в режимах свободной и смешанной конвекции расчетная экономия электрической энергии составляет 29 и 42 % соответственно по сравнению с режимом эксплуатации при вынужденной конвекции. Результаты расчета демонстрируют возможность снижения потребления энергии до 56,02 т у. т. / аппарат в год.

При этом в зависимости от климатических условий при эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения в режиме смешанной конвекции экономия электрической энергии может составить до 30–50 % по сравнению с режимом вынужденной конвекции.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проекты Т21РМ-019 и Ф21МС-011 и Российского фонда фундаментальных исследований, проект 20-58-04002.

Список использованных источников

1. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения : справ. / А. Н. Бессонный [и др.] ; под ред. А. Н. Бессонного, В. Б. Кунтыша. – СПб. : Недра, 1996. – 512 с.

2. Воздушные конденсаторы для паротурбинных установок малой и средней мощности / О. О. Мильман [и др.] // Теплоэнергетика. – 1998. – № 1. – С. 35–39.

3. О комбинированных системах охлаждения ТЭЦ / И. И. Королев [и др.] // Теплоэнергетика. – 1996. – № 11. – С. 49–55.

4. Combined air-cooled condenser layout with in line configured fiined tube bundles to improve cooling performance / Y. Q. Kong [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 154. – P. 505–518.

5. Кунтыш, В. Б. Защита водных ресурсов от теплового и химического загрязнения целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающими производствами / В. Б. Кунтыш, В. И. Мелехов // Изв. вузов. Лесн. журн. – 1989. – № 6. – С. 90–92.

6. Зорин, В. М. Атомные электростанции : учеб. пособие / В. М. Зорин. – М. : МЭИ, 2012. – 672 с.

7. Аппараты воздушного охлаждения специального назначения : каталог / Г. А. Марголин [и др.]. – М. : ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1987. – 10 с.

8. Теплотехника, отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха / В. М. Гусев [и др.]. – Л. : Стройиздат, 1981. – 343 с.

9. Исследование и сопоставление свободно-конвективной теплоотдачи шахматных и коридорных пучков из оребренных труб / А. В. Познякова [и др.] // Энергосбережение – теория и практика : сб. тр. I Всерос. шк.-семинара молодых ученых и спец. – М. : МЭИ, 2002. – С. 87–88.

10. Департамент по энергоэффективности Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://energoeffekt.gov.by. – Дата доступа : 06.05.2022.

11. Самородов, А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / А. В. Самородов. – Архангельск, 1999. – 176 л.

12. Маршалова, Г. С. Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой : дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Г. С. Маршалова. – Минск, 2019. – 153 л.

13. Примеры расчетов нестандартизованных эффективных теплообменников / В. Б. Кунтыш [и др.] ; под ред. В. Б. Кунтыша и А. Н. Бессонного. – СПб. : Недра, 2000. – 300 с.

14. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.

15. Влияние поперечного шага установки труб на теплоотдачу в режиме смешанной конвекции трубных пучков аппаратов воздушного охлаждения / Г. С. Маршалова [и др.] // Вестн. фонда фундамент. исслед. – 2020. – № 1. – С. 46–53.

16. Дневник погоды [Электронный ресурс] // Gismeteo Прогноз погоды. – Режим доступа : https://www.gismeteo.ru/diary/123101/2020. – Дата доступа : 20.05.2022.

References

1. Osnovy rascheta i proektirovaniya teploobmennikov vozdushnogo ohlazhdeniya : sprav. / A. N. Bessonnyj [et al.] ; pod red. A. N. Bessonnogo, V. B. Kuntysha. – SPb. : Nedra, 1996. – 512 s.

2. Vozdushnye kondensatory dlya paroturbinnyh ustanovok maloj i srednej moshchnosti / O. O. Mil'man [et al.] // Teploenergetika. – 1998. – № 1. – S. 35–39.

3. O kombinirovannyh sistemah ohlazhdeniya TEC / I. I. Korolev [et al.] // Teploenergetika. – 1996. – № 11. – C. 49–55.

4. Combined air-cooled condenser layout with in line configured fiined tube bundles to improve cooling performance / Y. Q. Kong [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 154. – P. 505–518.

5. Kuntysh, V. B. Zashchita vodnyh resursov ot teplovogo i himicheskogo zagryazneniya cellyulozno-bumazhnoj i derevoobrabatyvayushchimi proizvodstvami / V. B. Kuntysh, V. I. Melekhov // Izv. vuzov. Lesn. zhurn. – 1989. – № 6. – S. 90–92.

6. Zorin, V. M. Atomnye elektrostancii : ucheb. posobie / V. M. Zorin. – M. : MEI, 2012. – 672 s.

7. Apparaty vozdushnogo ohlazhdeniya special'nogo naznacheniya : katalog / G. A. Margolin [et al.]. – M. : CINTIHIMNEFTEMASH, 1987. – 10 s.

8. Teplotekhnika, otoplenie, ventilyaciya i kondicionirovanie vozduha / V. M. Gusev [et al.]. – L. : Strojizdat, 1981. – 343 s.

9. Issledovanie i sopostavlenie svobodno-konvektivnoj teplootdachi shahmatnyh i koridornyh puchkov iz orebrennyh trub / A. V. Poznyakova [et al.] // Energosberezhenie – teoriya i praktika : sb. tr. I Vseros. shk.-seminara molodyh uchen. i spec. – M. : MEI, 2002. – S. 87–88.

10. Departament po energoeffektivnosti Respubliki Belarus' [Electronic resource]. – Mode of access : http://energoeffekt.gov.by. – Date of access : 06.05.2022.

11. Samorodov, A. V. Sovershenstvovanie metodiki teplovogo rascheta i proektirovaniya apparatov vozdushnogo ohlazhdeniya s shahmatnymi orebrennymi puchkami : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.14.14 / A. V. Samorodov. – Arhangel'sk, 1999. – 176 l.

12. Marshalova, G. S. Teplovoj raschet i proektirovanie apparatov vozdushnogo ohlazhdeniya s vytyazhnoj shahtoj : dis. ... kand. tekhn. nauk: 01.04.14 / G. S. Marshalova. – Minsk, 2019. – 153 l.

13. Primery raschetov nestandartizovannyh effektivnyh teploobmennikov / V. B. Kuntysh [et al.]; pod red. V. B. Kuntysha i A. N. Bessonnogo. – SPb.: Nedra, 2000. – 300 s.

14. Idel'chik, I. E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam / I. E. Idel'chik. – M. : Mashinostroenie, 1992. – 672 s.

15. Vliyanie poperechnogo shaga ustanovki trub na teplootdachu v rezhime smeshannoj konvekcii trubnyh puchkov apparatov vozdushnogo ohlazhdeniya / G. S. Marshalova [et al.] // Vestn. fonda fundament. issled. – 2020. – № 1. – S. 46–53.

16. Dnevnik pogody [Electronic resource] // Gismeteo Prognoz pogody. – Mode of access : https://www.gismeteo.ru/diary/123101/2020. – Date of access : 20.05.2022.

УДК 66.047.31.5+663.26

V. S. Popescu[1], S. V. Vasileivich[2], M. M. Balan[3], O. L. Volconovici[4], T. V. Balan[5], I. S. Kurlov[6]

SEED DRYING INSTALLATION WITH LOW ELECTRICITY CONSUMPTION

[1]Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, State Agrarian University of Moldova, Chisinau, Republic of Moldova
[2]Ph. D. in Engineering Science, Belarusian State Aviation Academy Minsk, Republic of Belarus
[3–6]Technical University of Moldova, Chisinau, Republic of Moldova

Annotation. This paper is devoted to the efficiency of the drying process of agricultural seeds by the suspended layer treatment method. To solve this problem, a seed drying plant was developed and the research was carried out. Convection and SHF were used as suspended layer treatment sources.

Keywords: drying plant, seed treatment, suspended layer, process efficiency.

В. С. Попеску[1], С. В. Василевич[2], М. М. Балан[3], О. Л. Волконовичи[4], Т. В. Балан[5], И. С. Курлов[6]

УСТАНОВКА ДЛЯ СУШКИ СЕМЯН С НИЗКИМ ПОТРЕБЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

[1]Кандидат технических наук, доцент, Государственный аграрный университет Молдовы, Кишинев, Республика Молдова
[2]Кандидат технических наук, Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь
[3–6]Технический университет Молдовы, Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Работа посвящена изучению эффективности процесса сушки семян сельскохозяйственных культур методом обработки во взвешенном слое. Для решения этой проблемы

была разработана установка для сушки семян и проведены исследования. В качестве источников воздействия на взвешенный слой использовались конвекция и СВЧ.

Ключевые слова: сушильная установка, обработка семян, взвешенный слой, эффективность процесса.

Introduction. Currently, the rise in energy prices makes it imperative to improve the efficiency of primary agro-food processing technologies. Efficient management of the agro-industrial complex can be ensured both by upgrading existing technologies and by developing and implementing new processing methods [7, 9, 11].

Thus, the effort of researchers in the field is particularly directed towards reducing electricity consumed and processing costs, increasing machine productivity and product quality [2–5].

Currently, one of the main problems of electrical seed drying technologies is the long process time and the essential consumption of electricity [1, 3–6, 10, 12]. The given problem is exacerbated in the case of oilseed drying, which is rich in unstable vegetable fats in heat treatment processes [4–8]. Therefore, in order to identify solutions in this direction, a suspended layer seed drying plant was developed.

Research has confirmed that the application of the experimental plant, on the example of grape seeds, increases the speed of the process and reduces the duration of heat treatment, helping to ensure the quality of the seeds for subsequent use in the food industry, medicine, cosmetology, pharmaceuticals, etc. Moreover, the installation developed allows a reduction in electricity consumption and overall processing costs.

Material and method. The research was carried out on three types of oilseed: grape seed, linseed and white buckthorn seed. These types of seeds were selected for research because at present their drying is a problem and they have a valuable potential for the industry of food, medicine, cosmetology, pharmaceuticals, etc.

The experimental installation, developed for the research, on seed drying in a suspended layer is shown in Fig. 1. On the basis of this installation, the efficiency of the suspended bed drying process was estimated and the results were compared with those obtained by the classical dehydration method.

The suspended layer drying installation consists of the following components: On the casing *1* is mounted the wind tube and the control panel *3*, which operates the inverter *2* and the fan *4*; The fan draws in air at a flow rate of 430 m^3/h through filter *11* and is operated by motor *13* model C 15/2 T with a power of 0.16 kW; The microwave generator *15* with drying chamber *14* is also mounted on the housing; The fan *4* is connected with the tube 6, to which the supply bank *5* is attached; The tube *6* vertically intersects the drying chamber *14*, which is mounted on the support *8*, and is fixed by the fixing-adjusting levers *12* to the guides *7*; At the top of the tube *6* is mounted the product outlet pipe *9*, and the perforated receiver 10.

The CPS-AM50 anemometer with ±1.5 % accuracy, TESTO 400 hot wire thermometer with ±1 % accuracy was used to measure air velocity, air flow and temperature.

Results and discussions. As a result of the research on the drying process of the three types of oilseeds (grape seed, linseed and white buckthorn seed), the following

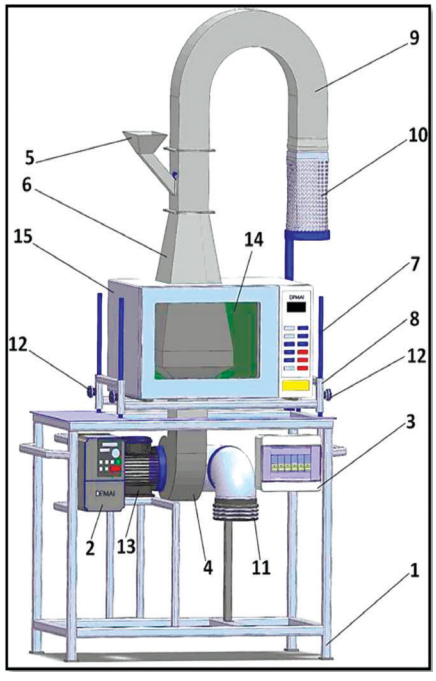


Fig. 1. Experimental plant developed for seed drying in a suspended layer

was determined for each type in particular: speed of moisture reduction in the seeds, duration of the drying process and electricity consumption.

The results obtained by the suspended layer drying method were compared with those obtained by the classical drying method.

Fig. 2 shows, as an example, the moisture reduction curves for drying grape seeds in a suspended layer with SHF application.

Using the suspended layer treatment method, the seeds were dried to the optimum moisture level of 10.3 % and as a result of examining 5 treatment regimens: 200 W, 300, 450, 600, 750 W, the duration of treatment for each regime was determined, respectively: 103 minutes, 76, 53, 43, 33 minutes.

Following the seed drying process, the kinetics of the process were determined and the results obtained from the suspended layer drying method were compared with those obtained by the classical drying method.

Table shows, as an example, the comparison of the results obtained for drying by the methods analyzed, for grape seeds, for a treatment source power of 450 W.

Analyzing the results of drying with SHF application, we observe that the drying time is 41 minutes shorter for the suspended layer than for the classical drying method.

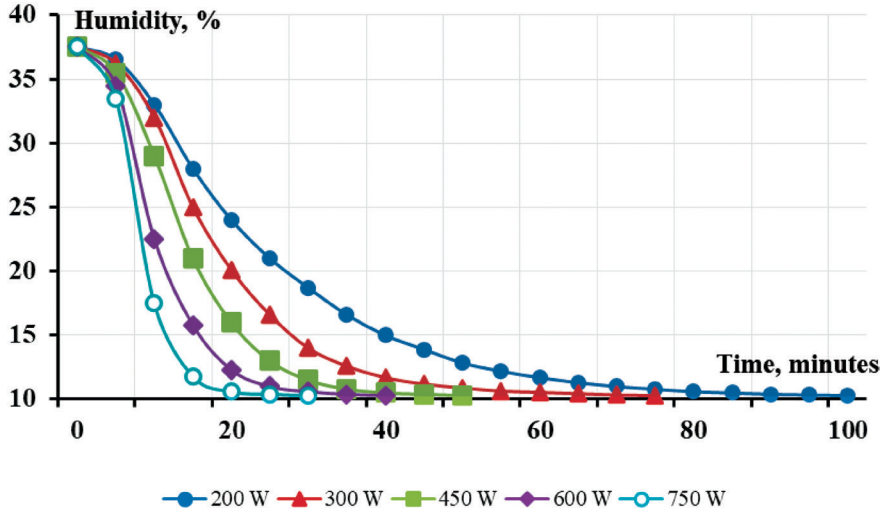


Fig. 2. Moisture reduction curves of dry seed in suspended layer with SHF application

Seed drying results by methods examined

Treatment source applied to drying	Drying process parameters	Drying method	
		Classical drying method	The suspended layer drying method
Convection	Drying speed, %/minute	0,71	0,97
	Drying time, minutes	244	183
	Electricity consumption, kWh	1,83	1,37
SHF	Drying speed, %/minute	1,41	1,76
	Drying time, minutes	94	53
	Electricity consumption, kWh	0,71	0,39

Also the drying speed, with the application of SHF in a suspended layer, is 0.35 %/minute higher than with the application of SHF by the classical method.

The results confirm that, even when drying these seeds by convection in a suspended layer, the drying time is 61 minutes shorter than when drying by convection using the classical method. The speed of convection drying in the suspended layer is also 0.26 %/minute higher than in the classical drying method.

It was found that when drying these seeds in a suspended layer with the application of SHF, electricity consumption is lower than when drying with SHF by the classical method by 0.32 kWh.

Also for convection drying in a suspended layer, the electricity consumption is lower than for convection drying by the classical method by 0.46 kWh.

Comparing both drying methods, based on the applied treatment source, it is recommended to use the suspended bed drying with SHF application. This method is characterized by increased drying speed and reduced drying time for all three types of seeds examined: grape seed, linseed and white buckthorn seed.

For quality analysis, dried seeds were analysed microscopically. Fig. 3 shows, as an example, the microscopic analysis of grape seeds, which were dried by the classical method.

From this figure it can be seen that micro cracks have formed on the surface of seeds dried by the classical method.

This is because in this method, in the drying process, the seeds are subjected to mechanical action, which causes cracks to appear on their surface. These microcracks negatively influence the stability of the seeds in the drying process and reduce quality. This is explained by the fact that the vegetable fats in the seed are more sensitive to contact with oxygen in the air. Thus, through cracks in the conventional drying process, oxidation of the fats occurs and the quality of conventionally dried seed is reduced.

Fig. 4 shows the microscopic analysis of the seeds, which were dried in a suspended layer.

It can be seen that no micro cracks have formed on the surface of the dried seed in the suspended layer. This is due to the fact that, by this method, the seeds are not subjected to negative mechanical actions, as by the classical method, and this fact prevents the appearance of cracks or other defects on their surface. The suspended

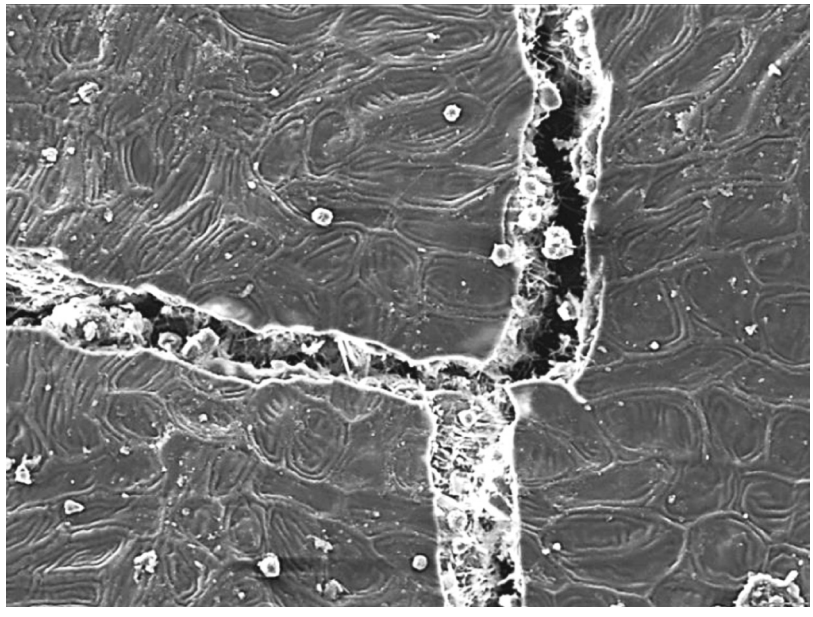


Fig. 3. Microscopic analysis of dried seeds by the classical method

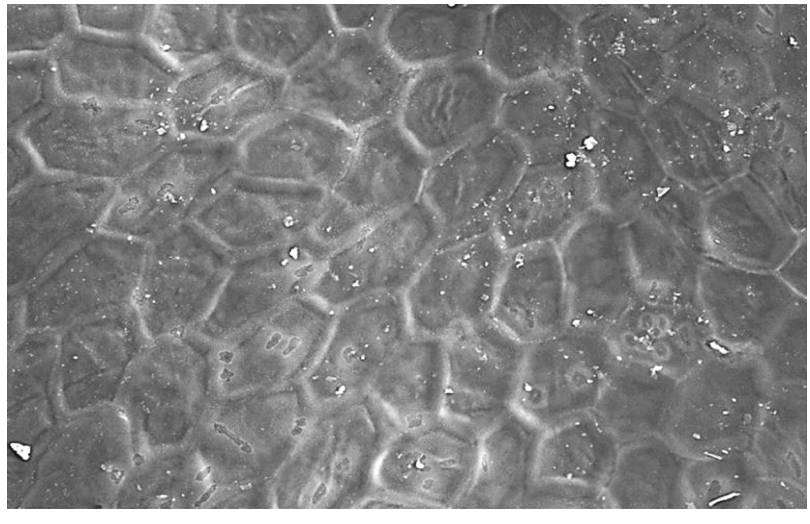


Fig. 4. Microscopic analysis of dried seeds in suspended layer

layer drying method therefore excludes the appearance of micro cracks and prevents oxidation of the vegetable oil in the seeds.

Thus, the results of the research confirmed that the application of the experimental installation significantly increases the speed of the drying process and reduces the heat treatment time, contributing to the increase of the process productivity.

Moreover, electricity consumption is significantly reduced in the application of the suspended layer drying compared to the classical method, and these are the basic

technological parameters for a drying process with low electricity costs and high productivity.

Research has shown that the seeds are not subjected to mechanical action during the drying process and the risk of cracks on the seed surface or other defects is absolutely excluded. The risk of oxidation of the vegetable fats in the oilseed content, which can occur through these cracks when in contact with oxygen, is therefore also excluded. This is quite important for the preservation of the quality of seeds rich in vegetable oils for further use in the food industry, medicine, cosmetology, pharmaceuticals, etc.

Conclusions. The installation developed for the drying of seeds in a suspended layer allows increasing the speed of the drying process, to reduce the duration of the process and the consumption of electricity for all three types of seeds examined: grape seeds, linseed and white hawthorn seeds.

The drying in suspended layer does not allow defects to appear in the drying process of the seeds and ensures the preservation of their quality for further use in the food industry, medicine, cosmetology, pharmaceuticals, etc.

References

1. Sehrawat, R. Quality evaluation and drying characteristics of mango cubes dried using low-pressure superheated steam, vacuum and hot air drying methods / R. Sehrawat, P. Nema, B. Kaur // LWT. – 2018. – Vol. 92. – P. 548–555.

2. Chou, S. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs / S. Chou, K. Chua // Trends in Food Science & Technology. – 2021. – Vol. 12. – P. 359–369.

3. Critical review of radio-frequency (RF) heating applications in food processing / A. Altemimi [et al.] // Food Quality and Safety. – 2019. – Vol. 3, № 2. – P. 81–91.

4. Chemical Composition, Antioxidant Capacity, and Sensory Quality of Dried Sour Cherry Fruits pre-Dehydrated in Fruit Concentrates / P. Nowicka [et al.] // Food and Bioprocess Technology. – 2015. – Vol. 10, № 8. – P. 2076–2095.

5. Performance analysis of heat pump and infrared–heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology / M. Aktas [et al.] // Energy Conversion and Management. – 2017. – Vol. 132. – P. 327–338.

6. Zhang, R. Novel Technique for Coating of Fine Particles Using Fluidized Bed and Aerosol Atomizer / R. Zhang, T. Hoffmann, E. Tsotsas // Processes. – 2020. – Vol. 8, № 12. – P. 1525–1543.

7. The Impact of Freeze-Drying Conditions on the Physico-Chemical Properties and Bioactive Compounds of a Freeze-Dried Orange Puree / M. Silva-Espinoza [et al.] // Foods. – 2019. – Vol. 9, № 1. – P. 32–47.

8. The Study of Antioxidant Components in Grape Seeds / L. Sochorova [et al.] // Molecules. – 2020. – Vol. 25, № 16. – P. 3736–3754.

9. Reliable system for processing agricultural products / V. Popescu [et al.] // Design, production and exploitation of agricultural machines. – 2019. – Iss. 49. – P. 200–204.

10. Researches concerning the Aerodynamic Sorting of Solid Particles According to the Surface States / V. Nedeff //Revista de Chimie. – 2018. – Vol. 59. – P. 360–365.

11. Popescu, V. Estimarea parametrilor sistemului fiabil pentru prelucrarea produselor agricole / V. Popescu, L. Malai // Ştiinţa agricolă. – 2019. – № 2. – P. 109–113.

12. Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models / A. Babu [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 90. – P. 536–556.

УДК 338.45:620.9

S. G. Prusov[1], W. Chayabutra[2]

ACTIVITIES TO ACHIEVE CARBON NEUTRALITY IN BELARUS: INTRODUCTION OF XPLATE^{TM} TECHNOLOGY, ADVANCEMENT IN DIGITALIZATION OF EMISSION AND FUEL CONSUMPTION ACCOUNTING SYSTEMS

[1]Ph. D. in Economics, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
[2]QE Energy International Co, Ltd., Bangkok, Thailand

Annotation. The article analyzes the effectiveness of the introduction of XPlate^{TM} technology in order to reduce harmful emissions into the atmospheric air, improve burning modes, increase the gross efficiency of boilers and as a consequence reduce specific fuel consumption. The problematic issues of monitoring and accounting for the reduction of harmful emissions into the atmospheric air are revealed. The expediency of the introduction of this technology, as well as automation and further digitalization of this segment of the production activity of the generating sources of SPA "Belenergo" is justified in order to be able to take into account the effects obtained, optimize the operating modes of boilers and maximize the effect of fuel economy and reducing harmful emissions from outgoing flue gases.

Keywords: economy of fuel and energy resources, XPlate^{TM} technology, digitalization, consequences of digitalization, automation system of accounting for emissions into atmospheric air, payback, carbon neutrality, chemical under burning of fuel, air clusters, Coulomb's law, Van der Waals forces, dipoles, nitrogen oxides, carbon oxides.

С. Г. Прусов[1], В. Чаябутра[2]

МЕРОПРИЯТИЯ ПО ДОСТИЖЕНИЮ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ В БЕЛАРУСИ: ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ XPLATE^{TM}, ЦИФРОВИЗАЦИЯ СИСТЕМ УЧЕТА ВЫБРОСОВ И РАСХОДА ТОПЛИВА

[1]Кандидат экономических наук, РУП «Витебскэнерго», Витебск, Институт энергетики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
[2]QE Energy International Co, Ltd., Бангкок, Таиланд

Аннотация. В статье анализируется эффективность внедрения технологии XPlate^{TM} с целью снижения вредных выбросов в атмосферный воздух, улучшения режимов горения, повышения валового КПД котлов и, как следствие, снижения удельного расхода топлива. Выявлены проблемные вопросы контроля и учета снижения вредных выбросов в атмосферный воздух. Обоснована целесообразность внедрения данной технологии, а также автоматизации и дальнейшей цифровизации данного сегмента производственной деятельности генерирующих источников ГП «Белэнерго» для того, чтобы иметь возможность учитывать получаемые эффекты, оптимизировать операционную режимов работы котлов и максимизировать эффект экономии топлива и снижения вредных выбросов от уходящих дымовых газов.

Ключевые слова: экономия топливно-энергетических ресурсов, технология XPlate^{TM}, цифровизация, последствия цифровизации, автоматизированная система учета выбросов в атмосферный воздух, окупаемость, углеродная нейтральность, химический недожог топлива, воздушные кластеры, закон Кулона, силы Ван-дер-Ваальса, диполи, оксиды азота, оксиды углерода.

Introduction. Since June 2018 the Council of Heads of State to the of Commonwealth of Independent States has adopted the Concept of the Commonwealth of the CIS member states in the area of innovative development of power engineering and development of advanced power engineering technologies and the Plan of priority activities on implementation thereof (hereinafter – "the Plan") in Dushanbe. Clause 2.2. of the Plan stipulates activities on Development of proposals for reduction of negative anthropogenic impact on the environment and the climate in the chain of production and consumption of energy of the power engineering (green development) with the fulfilment term in 2021–2023.

Within the given range of issues, in 2021–2022 the sector of Energy Economics of the State Enterprise "Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus" carried out a set of studies on use of innovative material of XPlate^{TM} brand developed by Dr. Wudh Chayabutra (Thailand).

2 boiler units DKVR-2,5/13 St. № 3 и № 4 of RAPT mini combined heat and power unit of Vitebsk municipal production unitary enterprise of boiler houses and heating networks "VPKiTS" (water-heating) [1] and boiler unit DKVR –10/13 St. № 3 of Vostochnaja mini combined heat and power unit of RUE "Vitebskenergo" (steam) [2]. Requestor of the studies was Russian Limited liability company "Quantum-Energy", official distributor of QE Energy International Co, Ltd., Bangkok.

Leading researcher of the institution, deputy head of the directorate – head of Business Planning Department of Economic Planning Administration of the Republican Unitary Enterprise "Vitebskenergo", Ph. D. in Economics, Mr. Prusov Stanislav Gennadievich, was the chief supervisor of the studies and the assigned person on behalf of the Institute.

Within the studies the technology operating principle was tested, according to which upon the placement of the plates on the outside of the draft fan case the following occurs: single molecules of oxygen and nitrogen present in the atmospheric air that should be fed (pumped) into the boiler furnace by forced-draft fans, have dipolar moments, specifically:

Coulomb's law, according to which the force of electrostatic attraction or repulsion between two point charges is directly proportional to the product of the charges and inversely to the square of the distance between them, – Van der Waals' forces – forces of interaction between molecules (and atoms) with the energy of 10–20 kJ/mol resulting from polarizations of molecules and formations of dipoles, but due to chaotic heat motion their interaction is weak.

At forced air movement on the walls of forced draft fans and air supply pipelines electrostatic charges ("+", "–") are generated, and their field arranges atmospheric air molecules (nitrogen + oxygen) in an orderly manner so that due to dipole interaction these molecules form molecular air clusters. XPlate^{TM} balances this effect by its own "natural" charge in such a way that, after passing places (sections) with XPlate^{TM} plates installed, most of the clusters of atmospheric air supplied into the boiler furnace for combustion are broken up into individual single oxygen and nitrogen molecules.

Further behaviour of fuel (fuel oil, natural gas and coal) oxidation chemical reaction with single oxygen (O_2) molecules, compared with their presence in the molecular cluster of atmospheric air, is more intense, both due to the speed and completeness of this chemical reaction, and due to greater opportunities of collision of single oxygen molecules with the surface of the fuel particle of carbon of the fuel.

Material and method. Based on the results of the work it was necessary to record decrease in the level of nitrogen oxides (NO_x) in the exhaust flue gases by approximately 20 %, and gain in oxygen O_2 amount as the main effect of the operation of the studied technology. That allows decreasing air feeding to the boiler and, correspondingly, decreasing the volume of uselessly heated nitrogen N_2 fed into the boiler furnace with air, considering that it takes 78.084 volume % and 75.5 mass % of the air. As a result, boiler steam generating capacity increases at the same natural gas consumption, or the amount of fuel burnt decreases at the same boiler steam generating capacity.

Boiler units under study were brought to various modes of steam generating capacity: required technical minimum, 65, 80, 90 % of nominal load, to nominal load, maximum gross efficiency factor; modes with chemical incomplete burning of the fuel were established in order to record decrease in CO level due to fuel burnout at increased feed of the oxygen as a result of the operations of the XPlate^{TM} plates [3, 4].

Calculations were made upon direct readings of the meters with simultaneous photo recording of all the readings of the measuring tools at the same time by representatives of the Requestor of the studies, representatives of the Institute of Power Engineering and the specialists of Municipal Production Unitary Enterprise "VPKiTS" and Republican Unitary Enterprise "Vitebskenergo" depending on the boiler studied in order to avoid potential errors with recording of all measured data into the study protocols. All the measuring tools were calibrated, calibration time as of the time of the studies was not expired.

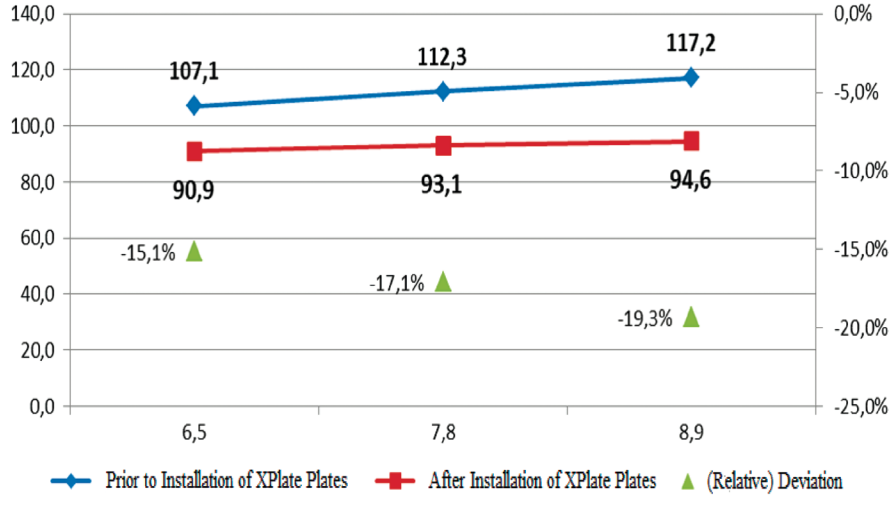


Fig. 1. Emissions of Nitrogen Oxides (NO_x) prior to and after installation of XPlate^{TM} plates, boiler unit DKVR – 10/13, ppm [2]

As a result of the studies all the effects claimed for were confirmed, specifically:

1) Decrease in nitrogen oxides level in exhaust flue gases (Fig. 1).

2) Decrease in the amount of chemical incomplete combustion of the fuel as a result of operations of XPlate^{TM} plates was more than 33 % (Fig. 2). This confirms the increase in oxygen level (O_2) in exhaust flue gases.

3) Decrease in specific consumption of the reference fuel calculated upon direct readings of the meters (direct balance) was up to 4 % (Fig. 3).

4) Decrease in emissions of carbon dioxides (CO_2).

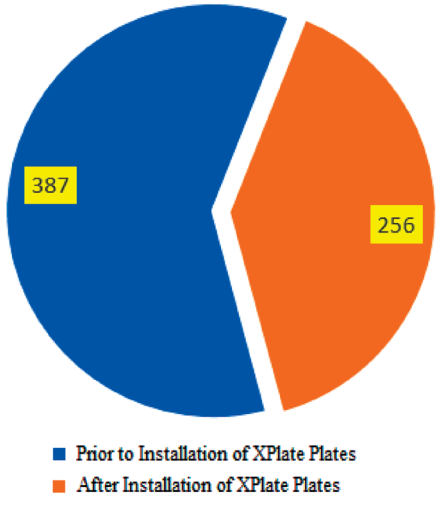


Fig. 2. CO level at the event of chemical incomplete fuel combustion in the DKVR-10/13 boiler at a load of 6.2 t/h, ppm [2]

It should be noted that pay-back of the activities for its implementation for the Republic of Belarus (dynamic period) is 2–4 years (Fig. 5), and it, in fact, depends on the mode of boiler unit operation (average load and number of operation work), area of case of the forced-draft fans, length of air-gas channels and the range of other factors.

Another effect of the XPlate^{TM} technology, as it was already mentioned, is the reduction of CO_2 emissions, which are associated with reduction of the volume of fossil fuels combusted for thermal energy generation. In Belarus, there is no environmental tax in effect for these emissions, but for many countries, including the Republic of Belarus and the Russian Federation, the task of reducing the "carbon footprint" is relevant. For example, in the Russian Federation the Federal Law

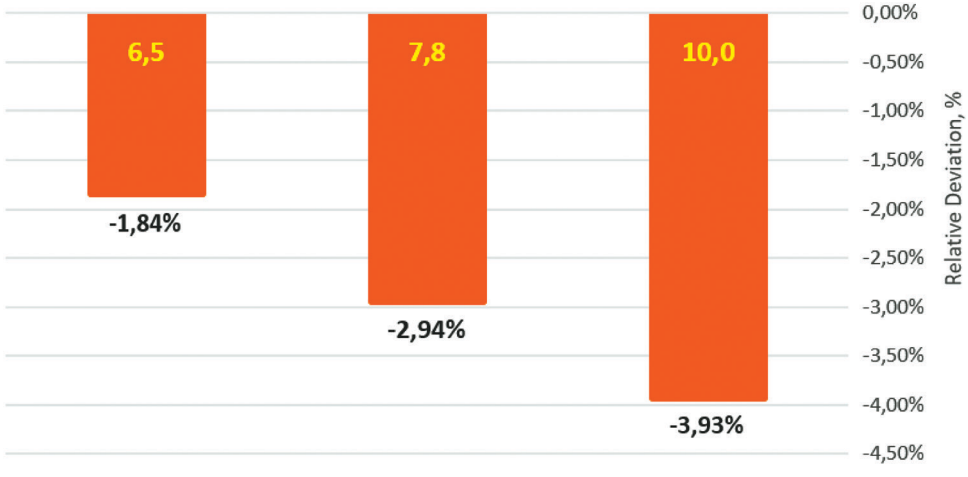


Fig. 3. Relative deviation of the specific fuel consumption calculated upon direct readings, % [2]

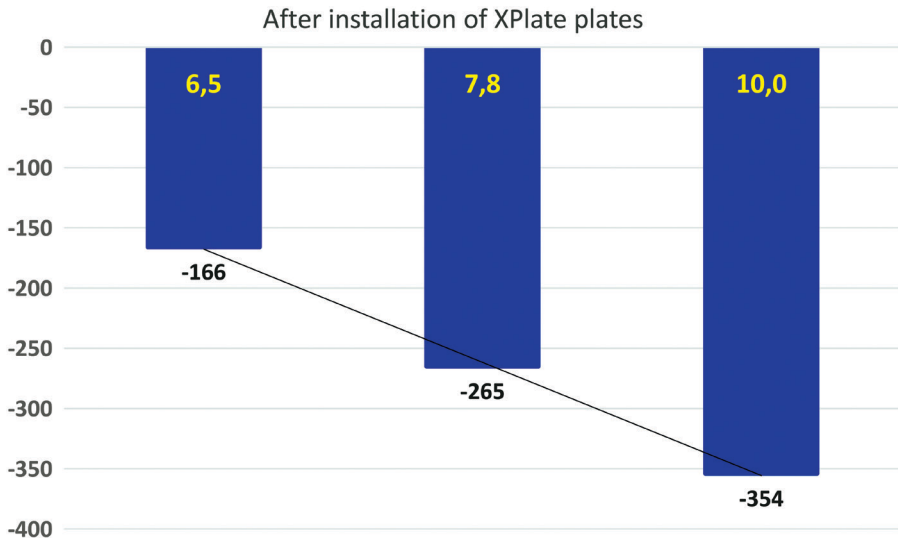


Fig. 4. Absolute decreased in CO_2 emissions in the 2021 conditions for the boiler DKVR-10/13 St. № 3 [2]

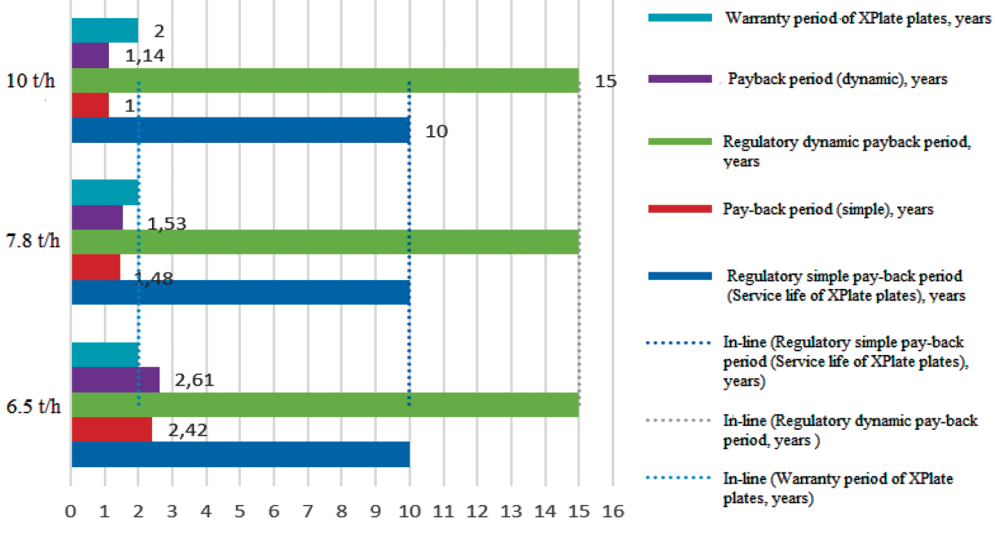


Fig. 5. Comparative analysis of pay-back periods and flow balances at different loads of the boiler DKVR–10/13 [2]

of the Russian Federation dd. 02.07.2021 № 296-FZ On limiting greenhouse gas emissions was adopted in 2021 [5]. According to the law, the largest enterprises in Russia emitting over 150 thousand tons of carbon dioxide equivalent per year, starting from 2022, will be required to provide carbon reporting, the first results of which will appear in 2023. Its main goal is to limit greenhouse gas emissions by 2030 [6]. In the states where the relevant taxes are in effect (EU countries, China and a number of others), the XPlate^{TM} technology can have a comparable payback period only due to the reduction of CO_2 without taking into account all other effects.

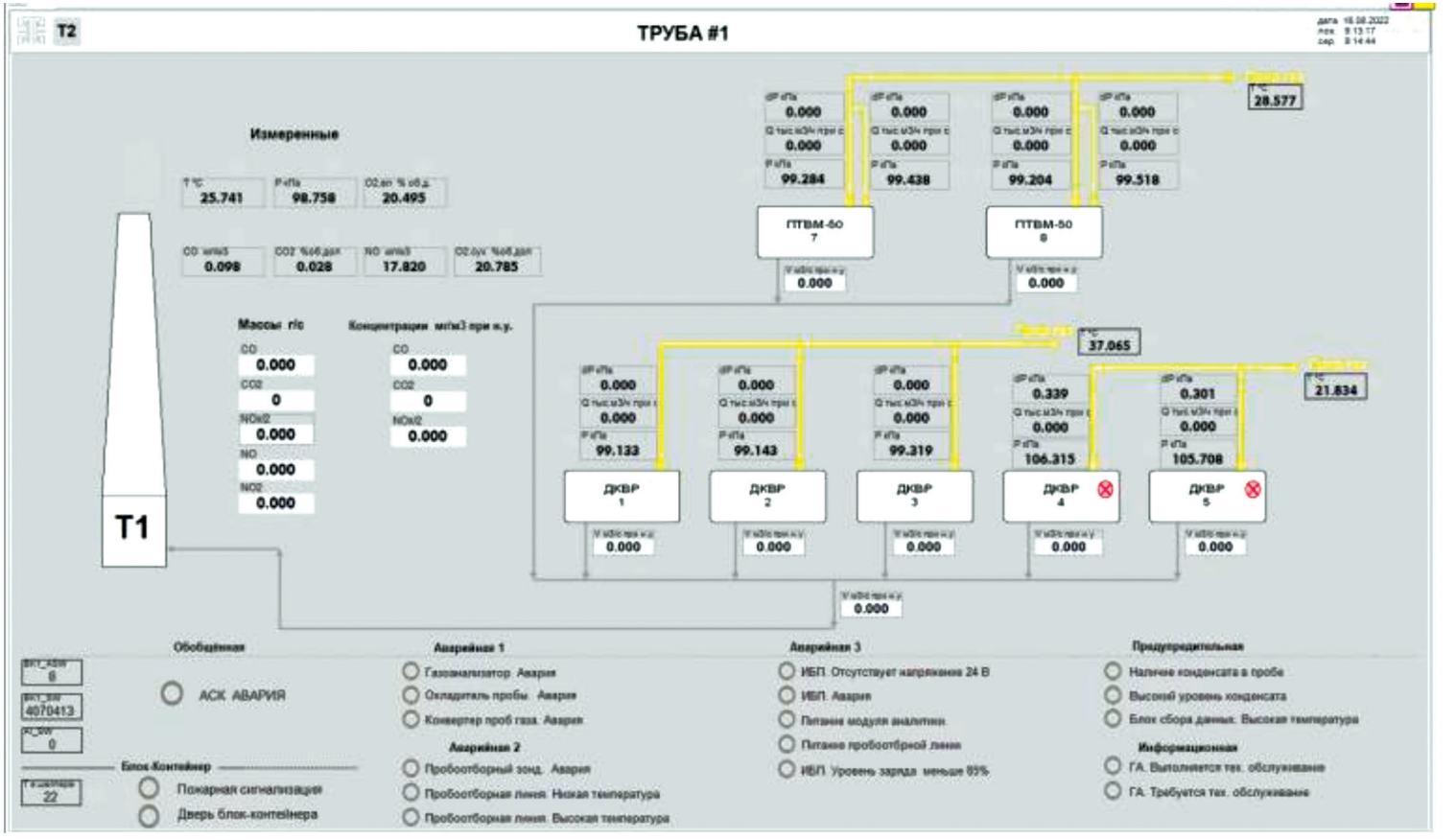


Fig. 6. Appearance of control panels of the system ACS-Emissions using the example of Vostochnaja mini combined heat and power unit [2]

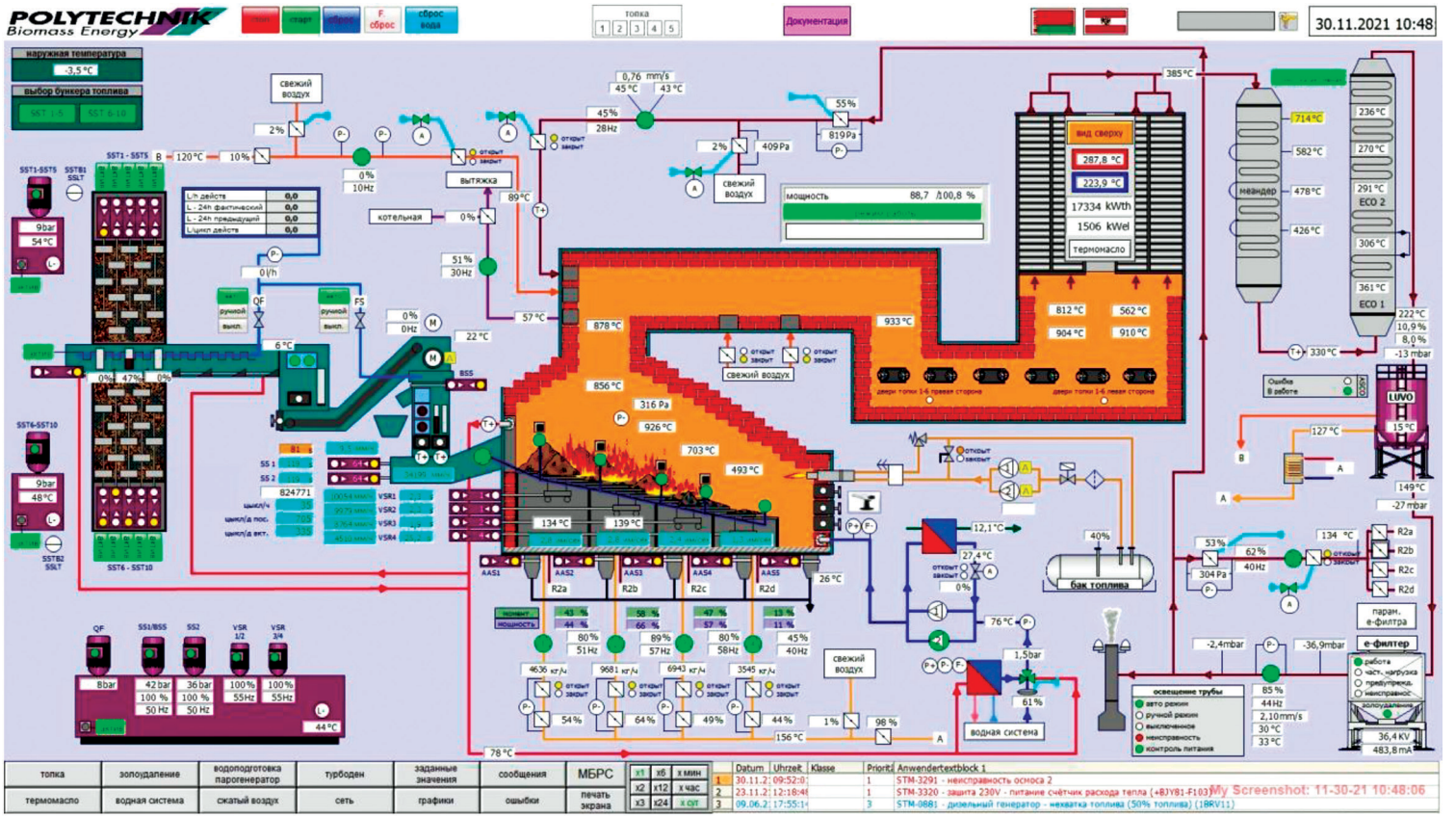


Fig. 7. Appearance of control panels of the system ACS-Emissions using the example of Baran mini combined heat and power unit

The most important parameters: changes in emissions, fuel combustion volumes, natural gas temperature and combustion air supply during the tests, in particular at the Vostochnaja mini combined heat and power unit, were made using digital systems: Atmospheric Air Pollutant Emissions Control System at Emission Source № 1 (hereinafter referred to as ACS Emissions) (Fig. 6) and Region by EvroPribor®. And the appearance of these systems and accounting of boiler units' operation modes differ completely. For example, for Baran mini combined heat and power unit it looks absolutely different (Fig. 7), as well as the volume of parameters measured by sensors. At the same time at the RAPT mini combined heat and power unit such digital systems haven't been installed. This led to reduced accuracy of measurements in terms of natural gas consumption at this energy source.

Results and discussions. The result of the studies carried out was not only 100 % confirmation of the efficiency of the material with the XPlate™ trademark, but also the detection of another problem associated with the possibility for optimizing the opeation modes of the boiler blocks for the most effective use of the technology studied.

The core of the problem is as follows. In order to optimize costs for digitalization and the possibility of 100 % solution of problems on accounting of fuel and energy resources consumption and emissions of pollutants into the atmospheric air, generation sources are usually equipped with one electronic commercial fuel consumption meter, and accounting for each boiler is performed with outdated meters with a high (up to 10 %) error extent. For example, at the boilers studied it was KSD2-054 for DKVR-10/13 St. № 3 of Vostochnaja mini combined heat and power unit, and SG-16M-200 for boiler units DKVR-2,5/13 St. № 3 and № 4 of RAPT mini combined heat and power unit. At the same time this problem at Vostochnaja mini combined heat and power unit, in order to carry out instrumental measurement, was solved by using ACS-emission with due certification and the possibility of accounting the momentary fuel consumption with an accuracy of up to 3 decimal places, cu.m. n.c./s.

Emissions into the atmospheric air are mainly accounted in whole at the source of emissions (chimney), to which, for example, like in Fig. 5, 7 boilers may be connected. This does not allow accumulation of data in the context of each boiler unit. Instrumental measurements of emissions are carried out with portable gas analyzers. In this case, in the event of installation of XPlate™ plates onto forced-draft fans not on all boilers, the task of reliable accounting of the share of influence of technology, combustion modes, load on individual boilers, etc. on the final saving of fuel and energy resources and emissions reduction can be carried out only by calculation based on data of instrumental measurements, rather than on the basis of interval readings of meters.

In this case, the problem can only be solved by covering 100 % of all boiler units at the source with XPlate™ plates to ensure an opportunity to take the readings at plant commercial metering devices, or by implementation of additional projects on digitalization (introduction of generic system for accounting of all technical and economic parameters of each boiler unit). In this case, taking into account actual heat generation, equipping some boiler unit may not be economically feasible due to low load. Or, as a possible option, it will be necessary to stop part of the boiler units for the period of the study.

With regard to the energy source under the study (Vostochnaja mini combined heat and power unit), the cost of the project implementation (in-depth digitalization) is more than 4 million rubles in 2017 prices.

Naturally, plain implementation of this project will only lead to increase in the cost of energy generated and, accordingly, additional load on tariffs, which cannot be justified in terms of economic feasibility since the main objective, which is accurate accounting of fuel consumption and emissions of pollutants into the atmospheric air, is fulfilled with existing technical solutions

In this case payback for such (in-depth digitalization) projects just within the operating life can be possible due to the use of innovative material XPlate^{TM}, which can accumulate source for the implementation of such projects for account of saving fuel and energy resources. The effect that can be obtained after the reinvestment stage should be aimed for reducing the cost of energy generation and, accordingly, resolution of the issue of achieving carbon neutrality. And in this case, the implemented system of in-depth digitalization will allow the most effective optimization of operation modes of energy source in order to maximize the implementation of energy-efficient measures, such as implementation of materials with the XPlate^{TM} trademark, and address an issue of prioritization of equipping this or that boiler units with this technology.

Conclusions. Justified above feasibility of introducing innovative material with the XPlate^{TM} trademark together with in-depth digitalization will make it possible to achieve the results set forth in:

clause 2.2 of the Plan of priority activities on implementation of the Concept of the Commonwealth of the CIS member states in the area of innovative development of power engineering and development of advanced power engineering technologies [7];

clause 10.1.3 of the Decree of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus № 5-T On Approval of Ecological Norms and Standards, according to which the concentration of pollutants in mg/m^3 in dry flue gases, reduced to normal conditions and excess air ratio of 1.4 (oxygen content in flue gases 6 %) during combustion of gaseous, liquid, solid fuels in boilers with rated capacity over 0.1 MW shall not exceed the emission standards defined in Tables E.2-E.13 (Annex E) of the abovementioned Decree [8].

That is, to solve issues of,

Firstly, reducing harmful emissions into the environment by reducing the specific fuel consumption for energy generation,

Secondly, extension of service life of boiler units prescribed for dismantling or modernization due to exceeding the normative emissions of nitrogen oxides (NOx),

Thirdly, achieving “carbon neutrality” level,

Fourthly, formation of a source of funds for in-depth digitalization without increasing the “cost” load on tariffs,

Fifthly, in-depth digitalization of metering systems contributing to the most optimal load on energy equipment in order to save fuel and energy resources and reduce emissions of harmful substances into the atmospheric air, and, subsequently, to lead to reduction in the prime cost of energy generated.

References

1. Pilot testing of fuel-saving technology XPlate^{TM} in order to define its effect on saving of fuel and energy resources (natural gas), and solutions to the problematic issues of decreasing the emissions of harmful substances into the atmosphere : report on the research / In-te of Power Engineering ; dir. T. G. Zorina ; perf. S. G. Prusov [et al.]. – Minsk, 2022. – 70 c.

2. Studies on effect of fuel-saving technology XPlate^{TM} on efficiency of boiler unit operations : report on the research / In-te of Power Engineering ; dir. T. G. Zorina ; perf. S. G. Prusov [et al.]. – Minsk, 2022. – 101 c.

3. Study on efficiency of XPlate^{TM} technology (Thailand) as an innovation aimed at decreasing emissions of harmful substances into the atmospheric air and saving fuel and energy resources of Fuel and Energy Sector of Belarus [Electronic resource] // In-t of Power Engineering NAS of Belarus. – Mode of access : http://www.ipe.by/novosti/issledovanie-effektivnosti-tehnologii-xplate-malayziya-kak-innovacii-napravlennoy-na-snizhenie-vybrosov-vrednyh-veschestv-v-atmosfernyy-vozduh-i-ekonomiyu-toplivnoenergeticheskih-resursov-tek-belarusi.html. – Date of access : 10.04.2022.

4. Testing of XPlate^{TM} technology (Thailand) [Electronic resource] // In-t of Power Engineering NAS of Belarus. – Mode of access : http://www.ipe.by/novosti/ispytaniya-tehnologiixplatetm-tailand.html. – Date of access : 01.07.2022.

5. On limiting greenhouse gas emissions [Electronic resource] : Federal Law of the Russian Federation, 02.07.2021 № 296-ФЗ // Consultant Plus. – Mode of access : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_388992/ ?ysclid = l7qjiiktou269696879. – Date of access : 01.07.2022.

6. Limitation of Emissions of Greenhouse Gases: how it will affect enterprises' activities? [Electronic resource] // Ecologist's Handbook. – Mode of access : https://www.profiz.ru/eco/8_2021/296-fz/?ysclid=l7qn2f31cf164955910. – Date of access : 01.07.2022.

7. Concept of the Commonwealth of the CIS member states in the area of innovative development of power engineering and development of advanced power engineering technologies / Council of Heads of State to the of Commonwealth of Independent States. – Dushanbe, 2018. – 4 p.

8. On Approval of Ecological Norms and Standards [Electronic resource] : the Decree of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 18 iyul. 2017, № 5-T // National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus. – Mode of access : https://pravo.by/upload/docs/op/W21732307p_1505163600.pdf. – Date of access : 01.07.2022.

УДК 620.92

А. В. Федюхин

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЗДУХО-АККУМУЛИРУЮЩИХ СТАНЦИЙ В КАЧЕСТВЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Кандидат технических наук, доцент,
Институт энергоэффективности и водородных технологий НИУ МЭИ,
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассмотрены перспективы применения воздухо-аккумулирующих станций в качестве накопителей электрической энергии для балансирования режимов энергосистемы, активно внедряющей ветровые и солнечные электростанции.

Ключевые слова: воздухо-аккумулирующая станция, аккумулирование энергии, воздушная турбина, энергосбережение, когенерация.

A. V. Fedyukhin

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC BASIS FOR THE APPLICATION OF COMPRESSED AIR-STORAGE SYSTEMS AS ELECTRIC ENERGY STORAGE DEVICES

Ph. D. in Engineering Science, Associate Professor, Institute of Energy Efficiency and Hydrogen Technologies of NRU MPEI, Moscow, Russian Federation

Annotation. The article discusses the prospects for the application of compressed air-storage stations as electric energy storage devices for balancing the modes of the power system, actively introducing wind and solar power plants.

Keywords: compressed air storage station, energy storage, air turbine, energy saving, cogeneration.

Введение. Актуальной задачей является разработка национальной политики по снижению выбросов парниковых газов при обеспечении устойчивого экономического развития страны. Дальнейшее проектирование развития электроэнергетической и теплоэнергетической систем Российской Федерации должно проходить с учетом технических, технологических, социально-экономических, экологических факторов [1]. В Российской Федерации действует программа поддержки внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ) за счет специальных платежей на оптовом рынке электрической энергии и мощности. Схема и программа развития Единой энергетической системы России на 2019–2025 гг. предусматривает рост установленной мощности к 2025 г. ветровыми (ВЭС) на 3154,4 МВт и солнечными электростанциями (СЭС) на 1248,5 МВт.

Производство электроэнергии ВЭС и СЭС электростанциями характеризуется значительной суточной и сезонной неравномерностью. Развитие ВЭС и СЭС оказывает влияние на режимы загрузки генерирующего оборудования электростанций и перетоки электроэнергии в Единой энергетической системе Российской Федерации. В рамках процедуры выбора состава включенного генерирующего оборудования требуется резервирование 100 % мощности ВЭС. Рост установленной мощности СЭС в энергосистеме приводит к росту требуемого регулировочного диапазона, размещенного на включенном генерирующем оборудовании. В частности, для обеспечения баланса производства и потребления в ОЭС Юга с учетом реализации программы развития ВИЭ потребуются ежедневные пуски/остановы части генерирующего оборудования электростанций и/или рост объемов экспорта (импорта) электроэнергии в соседние энергосистемы. Возможность ОЭС Юга использовать свободный регулировочный диапазон Урала и Сибири ограничена [2]. Улучшение электрических режимов в ОЭС Юга возможно в случае реализации программ строительства энергоэффективной пиковой генерации или аккумулирования электрической энергии (например, на базе ВАЭС).

К плюсам применения ВАЭС в качестве способа аккумулирования электрической энергии можно отнести высокую маневренность и работу в широких диапазонах температуры и давления, что делает такие электростанции

более дешевыми и долговечными [3]. ВАЭС аккумулирует энергию в форме сжатого воздуха, который в дальнейшем идет на выработку электроэнергии во время пиков нагрузки [4–6]. Цикл ВАЭС похож на цикл выработки энергии газотурбинной установки (ГТУ). Однако в цикле ГТУ турбина физически соединена с компрессором, а при использовании ВАЭС цикл сжатия воздуха протекает отдельно от циклов выработки электроэнергии. Не менее актуальным вопросом для Российской Федерации является возможность когенерации на базе ВАЭС, в частности, с выработкой дополнительной энергии на нужды теплофикации или холодоснабжения (в зависимости от особенностей региона и отдельно взятых потребителей) [7].

Опыт применения ВАЭС в мире. В настоящее время в мире введены в эксплуатацию и эффективно используются несколько ВАЭС. В частности, ВАЭС в Хунторфе (Германия), построенная в 1978 году, представляла собой первую и самую простую тепловую схему с минимальным набором энергетического оборудования, включая воздушный компрессор и газовую турбину [8]. Коэффициент возврата электроэнергии для этой схемы – 40–42 %. ВАЭС Макинтош в США, введенная в промышленную эксплуатацию в 1991 году, включала в себя рекуператор для утилизации тепла уходящих газов [9]. Благодаря этому коэффициент возврата электроэнергии увеличился примерно на 10–13 % до значений 50–55 %. Как можно заметить, данные ВАЭС используют в своих схемах сжигание газа. Это может быть оправданным при низкой стоимости природных ресурсов. В остальных случаях целесообразны бестопливные схемы ВАЭС.

Материалы и методы исследования. Ключевым параметром, который определяет выбор основного оборудования ВАЭС, является давление, при котором хранится сжатый воздух в подземной емкости. По различным данным эта величина может изменяться от 5 до 17 МПа. Чем больше это давление, тем выше температура воздуха за компрессором при его адиабатическом сжатии. Это может позволить нагреть сжатый воздух перед турбиной до более высокой температуры при использовании новой тепловой схемы ВАЭС с тепловыми аккумуляторами. Увеличение выработки электроэнергии в этом случае происходит не за счет сжигания природного газа в камере сгорания газовой турбины, а за счет нагретого воздуха от теплового аккумулятора.

Однако чем выше давление в воздушном аккумуляторе, тем более серьезные требования предъявляются к воздушному компрессору для его надежной работы в течение длительного периода эксплуатации. Специалистами НИУ МЭИ были проведены предварительные расчеты трех тепловых схем ВАЭС на основе аналогов ВАЭС в Хунторфе (Германия), ВАЭС Макинтош с рекуперацией тепла дымовых газов (США) и адиабатической ВАЭС с тепловыми аккумуляторами и хранилищами сжатого воздуха при постоянном давлении 10 МПа. Для каждой из представленных схем были проведены расчеты для варианта мощности газовой турбины при разрядке – 100 МВт. Обращает на себя внимание тот факт, что коэффициент возврата энергии для тепловой схемы ВАЭС

с тепловыми аккумуляторами составляет более 60 %. Это существенно больше, чем для тепловых схем ВАЭС со сжиганием природного газа. Например, для тепловых схем ВАЭС с рекуперацией тепла дымовых газов коэффициент возврата энергии равен 50 %; для тепловых схем ВАЭС без рекуперации тепла дымовых газов – 45 %.

Примерно такое же распределение этих вариантов по эксергетической эффективности. Как показывают предварительные расчеты, с точки зрения энергетической и эксергетической эффективности при равных мощностях компрессоров выгоднее использовать адиабатическую схему с тепловыми аккумуляторами, т. к. коэффициент возврата электроэнергии для нее существенно выше, чем для схем с сжиганием газа. Однако в тепловых схемах ВАЭС со сжиганием природного газа мощность компрессора примерно в 2 раза меньше, чем в тепловых схемах ВАЭС с тепловыми аккумуляторами. Соответственно, при одинаковых режимных характеристиках емкость воздушного аккумулятора может быть также примерно в 2 раза меньше в схеме со сжиганием природного газа по сравнению со схемой с тепловыми аккумуляторами.

Как правило, тепловые схемы ВАЭС со сжиганием природного газа примерно вдвое эффективнее по экономическим показателям, чем тепловые схемы ВАЭС с тепловыми аккумуляторами. В связи с особенностями отдельных энергосистем Российской Федерации является целесообразной разработка различных (адаптированных к конкретному региону и потребителей) вариантов схем ВАЭС: со сжиганием природного газа, с тепловым аккумулятором и пр.). Для оценки возможности реализации ВАЭС в условиях энергетического рынка Российской Федерации представляется актуальным математическое моделирование различных схемных решений с разработкой возможных путей их оптимизации и повышения энергетической эффективности.

В настоящее время разработкой различных тепловых схем топливных и бестопливных ВАЭС занимаются ряд научных коллективов США, Германии и Китая. Мировой опыт эксплуатации ВАЭС вкупе с заметной тенденцией к развитию данной отрасли (проект United Technologies, ВАГТЭ Матагорда, Нортон и пр.) показывает большую заинтересованность в использовании подобных пиковых или околопиковых установок.

Методология выбора компоновочных решений ВАЭС. Задача выбора оборудования для строительства воздушно-аккумулирующей электростанции (ВАЭС) на территории Российской Федерации по своей сути является оптимизационной. В качестве критерия оптимизации может быть выбран минимум суммарных затрат, включающих капитальные и эксплуатационные затраты, стоимость топлива и ущерб от воздействия вредных выбросов на окружающую среду. Другим критерием оптимизации параметров ВАЭС может служить прибыль от реализации электроэнергии турбиной в часы пик за вычетом расходов электроэнергии на сжатие воздуха компрессором в ночные часы и выходные дни, а также за вычетом расходов на природный газ при его сжигании в камерах сгорания перед газовой турбиной.

В качестве оптимизируемых параметров могут выступать структурные и технические характеристики оборудования ВАЭС.

К структурным характеристикам могут относиться наличие или отсутствие в тепловой схеме ВАЭС:

количество секций компрессора сжатия и подачи воздуха в аккумулятор;

количество промежуточных и концевого охладителей воздуха за секциями компрессоров;

тепловой аккумулятор использования теплоты сжатия воздуха компрессором в период зарядки аккумулятора на нагрев воздуха перед турбиной в период его разрядки;

камеры сгорания перед турбинами высокого и низкого давления;

рекуператора нагрева воздуха из аккумулятора за счет использования теплоты уходящих газов за турбиной;

использование теплоты уходящих газов за турбиной на выработку пара в котле-утилизаторе и подачи пара в паротурбинную установку с увеличением вырабатываемой электроэнергии за счет парогазовой установки (ПГУ) в период разрядки аккумулятора;

другие схемные решения: выбор типа компрессоров низкого, среднего и высокого давления (осевые, центробежные, поршневые, винтовые); выбор типа тепловых аккумуляторов (регенеративные, рекуперативные, с теплоносителем, изменяющим свое агрегатно состояние); выбор типа аккумулятора (с постоянным объемом, с постоянным давлением).

К техническим характеристикам тепловой схемы ВАЭС могут быть отнесены следующие параметры:

максимальное давление хранения воздуха в аккумуляторе;

степень повышения давления в каждой секции компрессора;

температура теплоносителя в тепловом аккумуляторе;

температура нагрева воздуха перед турбиной теплоносителем из теплового аккумулятора;

температура нагрева воздуха перед турбиной в рекуператоре при использовании тепла уходящих газов;

расход природного газа в камерах сгорания перед турбинами высокого и низкого давления (в случае топливной тепловой схемы).

Результаты исследования и их обсуждение. Современный подход к интегрированию систем аккумулирования энергии на сжатом воздухе можно представить в виде иерархической структуры:

глобальный подход – создание единой системы аккумулирования энергии всей равнинной части Российской Федерации. Географический критерий обусловлен нерациональностью использования для местности, на которой отсутствуют большие перепады высот, гидроаккумулирующих электростанций;

региональный подход – внедрение ВАЭС высокой мощности для аккумулирования энергии крупных источников со слабыми возможностями регулирования отпускаемой в сеть электроэнергии (например, АЭС), замена крупных

пиковых энергоустановок, использование комбинированных схем работы воздушных аккумуляторов с действующими крупными ТЭЦ и региональными ГРЭС, а также совместная работа с установками возобновляемой энергетики (ветроэнергетическими установками и солнечными батареями);

локальный подход – сочетание ВАЭС с иными современными энергоэффективными системами в рамках общей энергосистемы локального потребителя, оперативно реагирующего на изменение тарифов (т. н. активный пользователь). Проработка подобного подхода вкупе с развитием новых схемных решений ВАЭС с учетом российских реалий представляется одним из эффективных этапов по повышению энергетической эффективности и безопасности всей энергосистемы страны в целом.

Заключение. Важной задачей является выравнивание графика суммарной нагрузки потребителей. Для решения этой задачи вводится дифференцированная стоимость электроэнергии в зависимости от времени, в котором происходит пик нагрузок. Таким образом, при потреблении в часы пиковых нагрузок стоимость устанавливается выше. В связи с этим потребители пытаются подстраиваться и снижать потребление электроэнергии в пиковый период. Периодический запуск и остановка ТЭС не позволяют решить проблему регулирования мощности из-за больших временных затрат на данные мероприятия. На включение тепловой станции потребуется не один час. Кроме того, частое включение и выключение блоков крупных ТЭС приводят к увеличенному износу оборудования, увеличению расхода топлива – все это сказывается на надежности станции. Поэтому в настоящее время и в ближайшем будущем использование аккумулирующих станций для покрытия дефицита мощности в пиковые часы является перспективным направлением, так как на их полный запуск требуется несколько минут. Одной из таких электростанций является ВАЭС, которая располагает запасом сжатого воздуха. Энергия сжатого воздуха затрачивается для приведения в действие турбин, вращающих генераторы, которые будут отдавать свою энергию в сеть во время пиковых нагрузок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00700; https://rscf.ru/project/22-29-00700.

Список использованных источников

1. Белобородов, С. С. Оценки «углеродоемкости» и углеродной «нейтральности» экономики ЕС и РФ / С. С. Белобородов, Е. Г. Гашо, А. В. Ненашев // Промышленная энергетика. – 2021. – № 11. – С. 38–47.

2. Белобородов, С. С. Влияние развития ВИЭ на сбалансированность производства и потребления электроэнергии в ЕЭС России / С. С. Белобородов, А. А. Дудолин // НРЭ. – 2020. – № 5. – С. 6–17.

3. Ольховский, Г. Г. Воздушно-аккумулирующие газотурбинные электростанции (ВАГТЭ) / Г. Г. Ольховский, В. А. Казарян, А. Я. Столяревский. – Ижевск : Ин-т компьютер. исслед., 2011. – 358 с.

4. Ubertini, S. Hybrid Hydrogen and Mechanical Distributed Energy Storage / S. Ubertini, A. L. Facci, L. Andreassi // Energies. – 2017. – Vol. 10. – P. 2035–2051.

5. Han, Z. Investigation of operation strategy of combined cooling, heating and power (CCHP) system based on advanced adiabatic compressed air energy storage / Z. Han, S. Guo // Energy. – 2018. – Vol. 160. – P. 290–308.

6. Briola, S. Energy and economic performance assessment of the novel integration of an advanced configuration of liquid air energy storage plant with an existing large-scale natural gas combined cycle / S. Briola, R. Gabbrielli, A. Delgado // Energy Conversion and Management. – 2020. – Vol. 205. – P. 112434.

7. Implementation of compressed air energy storages (CAES) for increasing efficiency of natural gas usage for power generation / I. A. Sultanguzin [et al.] // Internat. Gas Research Conf. Proceedings. – 2017. – P. 1193–1198.

8. Crotogino, F. Huntorf CAES: More than 20 years of successful operation / F. Crotogino, K.-U. Mohmeyer, R. Scharf. – Orlando : Spring, 2001. – 6 p.

9. Alabama Electric Cooperative Compressed Air Energy Storage (CAES) Plant Improvements / P. Holden [et al.] // ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air : conf. Proceedings, Munich, 8–11 may 2000 / International Gas Turbine Institute. – Munich, 2000. – Vol. 3. – 12 p.

References

1. Beloborodov, S. S. Ocenki «uglerodoyomkosti» i uglerodnoj «nejtral'nosti» ekonomiki ES i RF / S. S. Beloborodov, E. G. Gasho, A. V. Nenashev // Promyshlennaya energetika. – 2021. – № 11. – S. 38–47.

2. Beloborodov, S. S. Vliyanie razvitiya VIE na sbalansirovannost' proizvodstva i potrebleniya elektroenergii v EES Rossii / S. S. Beloborodov, A. A. Dudolin // NRE. – 2020. – № 5. – S. 6–17.

3. Ol'hovskij, G. G. Vozdushno-akkumuliruyushchie gazoturbinnye elektrostancii (VAGTE) / G. G. Ol'hovskij, V. A. Kazaryan, A. Ya. Stolyarevskij. – Izhevsk : In-t komp'yuter. issled, 2011. – 358 s.

4. Ubertini, S. Hybrid Hydrogen and Mechanical Distributed Energy Storage / S. Ubertini, A. L. Facci, L. Andreassi // Energies. – 2017. – Vol. 10. – P. 2035–2051.

5. Han, Z. Investigation of operation strategy of combined cooling, heating and power (CCHP) system based on advanced adiabatic compressed air energy storage / Z. Han, S. Guo // Energy. – 2018. – Vol. 160. – P. 290–308.

6. Briola, S. Energy and economic performance assessment of the novel integration of an advanced configuration of liquid air energy storage plant with an existing large-scale natural gas combined cycle / S. Briola, R. Gabbrielli, A. Delgado // Energy Conversion and Management. – 2020. – Vol. 205. – P. 112434.

7. Implementation of compressed air energy storages (CAES) for increasing efficiency of natural gas usage for power generation / I. A. Sultanguzin [et al.] // Internat. Gas Research Conf. Proceedings. – 2017. – P. 1193–1198.

8. Crotogino, F. Huntorf CAES: More than 20 years of successful operation / F. Crotogino, K.-U. Mohmeyer, R. Scharf. – Orlando: Spring, 2001. – 6 p.

9. Alabama Electric Cooperative Compressed Air Energy Storage (CAES) Plant Improvements / P. Holden [et al.] // ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air : conf. Rroceedings, Munich, 8–11 may 2000 / International Gas Turbine Institute. – Munich, 2000. – Vol. 3. – 12 p.

УДК 621.3.011+621.38(075)

С. Х. Хакимов

КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО ЗАТРАЧЕННОЙ ЭНЕРГИИ НА СОВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ

Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация. В статье рассмотрен выбор обобщенного критерия эффективности электропривода по затраченной энергии железнодорожного подвижного состава.

Ключевые слова: энергосбережение, тяговый электропривод, асинхронный тяговый двигатель, энергоэффективность, оптимизация, автоматизированный электропривод, критерий эффективности, показатель качества.

S. H. Khakimov

CRITERIA FOR THE EFFICIENCY OF THE ELECTRIC DRIVE ACCORDING TO THE ENERGY EXPENDED TO PERFORM THE WORK

Tashkent State Transport University, Tashkent, Uzbekistan

Annotation. The article considers the choice of a generalized criterion for the efficiency of an electric drive based on the spent energy of a railway rolling stock.

Keywords: energy saving, traction electric drive, asynchronous traction motor, energy efficiency, optimization, automated electric drive, efficiency criterion, quality indicator.

Введение. Тяговый электропривод в современном электроподвижном составе (ЭПС) представляет собой сложную систему, которая очень тщательно анализируется и состоит из подобранных компонентов, которые взаимодействуют с энергетическими показателями. Для достижения оптимальной производительности привода важно сделать конструкцию основных компонентов привода (электродвигателя, силового преобразователя, тягового трансформатора и системы управления приводом) не отделимой от конструкции всей системы привода. При таком подходе на стадии проектирования требуется достаточно подробно смоделировать требуемые циклы движения транспортного средства, а также систему электропривода и ее компоненты, чтобы найти решение, которое обеспечит требуемую производительность. Параметры и характеристики компонентов электропривода, определенные таким образом, могут быть использованы в качестве ограничений для проектирования компонентов.

Это интерактивный процесс, который может иметь конкретные цели оптимизации характеристик транспортного средства с точки зрения первоначальной стоимости оборудования, потребления энергии во время эксплуатации или стоимости жизненного цикла (LCC) транспортного средства. LCC очень часто является выбранным методом для определения экономических преимуществ транспортного средства, поскольку оно включает его первоначальную

стоимость, потребление энергии в период эксплуатации и затраты на техническое обслуживание.

Основные показатели качества можно разделить на: материально-структурные, функциональные, потенциальные, системные. Первый показатель определяет внутреннее строение системы электропривода, второй показатель показывает элементы системы, состоящие из асинхронного двигателя и системы управления; третий определяет потенциальные возможности системы. Кроме этого, функциональные показатели асинхронного электропривода можно разделить на технические и экономические показатели – надежность, экономичность, а также на – эстетические и экологические показатели безопасности [1].

Обобщенный критерий эффективности тягового электропривода, должен обеспечивать все показатели качества. Так как экстремальные значения показателей не реализуются одновременно, то должно быть найдено такое решение, которое бы удовлетворяло средним значениям критерия эффективности. Это условие можно реализовать применением не только электропривода, но и системы управления с векторной оптимизацией. В настоящее время подробный анализ показателей качества автоматизированного электропривода отсутствует, также нет методики выбора критерия оптимальности [2].

Наиболее важны возможности повышения энергоэффективности электроподвижного состава, касающиеся экономии энергии, и увеличения диапазона рабочих характеристик локомотива при заданных начальных ресурсах. Некоторые из возможностей, которые должны обеспечить такой прогресс в настоящее время, заключаются в следующем:

использование энергии при торможении;

применение отработанной тепловой энергии;

дополнительное питание от солнечных батарей;

усовершенствованная система механической передачи энергии;

улучшенная конструкция корпуса электровоза;

повышение эффективности силовых преобразователей;

специальная конструкция электрических двигателей;

использование конденсаторов нового поколения, топливных элементов и батарей нового поколения;

выбор маршрута по критерию минимального потребления в режиме реального времени;

мониторинг параметров внутри и снаружи ЭПС и компьютеризированное управление системой с оптимизацией энергопотребления [3].

Сегодня проблема энергетики становится настолько важной, что целая отрасль обращается к чистой, возобновляемой энергии (солнечная энергия, энергия ветра и т. д.). Прототипы гибридных транспортных средств с объявлением о массовом производстве, запланированном на ближайшее будущее, стали повседневными происшествиями. Кроме того, многие электровозы спроектированы так, чтобы использовать только электричество в качестве движущей силы, что сводит выбросы к нулю.

Материалы и методы исследования. Выбор методов и средств повышения энергоэффективности машин и технологий с асинхронным электроприводом является актуальнейшей задачей, и ему посвящено множество публикаций в учебной и научно-технической литературе. Перечислим и рассмотрим более подробно основные принципы экономии энергии в электроприводе средствами электропривода [4, 5].

Разделим возможные ситуации на две большие группы:

регулирование скорости не используется;

нерегулируемый электропривод заменяется регулируемым.

В первой группе основная возможность влиять на энергетические процессы – правильный выбор основного оборудования, в первую очередь электродвигателя и редуктора, если последний используется, а также применение некоторых мероприятий, снижающих потери.

Важным резервом энергосбережения служит правильный выбор основного электрооборудования в простейшем самом массовом и энергоемком нерегулируемом электроприводе.

Европейские эксперты считают, что средний коэффициент использования двигателей (отношение средней мощности за цикл к номинальной) составляет 0,6.

Создан пакет программ для массового электропривода переменного тока, позволяющих решать задачи выбора и проверки асинхронных двигателей, оценивать их характеристики при отклонении напряжения от нормы, определять срок службы в различных условиях их работы и т. д.

Уменьшение потерь в питающих сетях – это проблема потерь мощности возникает за счет низкого, особенно при малых нагрузках, коэффициента мощности, в силу чего ток, протекающий в питающих линиях, трансформаторах, выше тока, связанного с активной мощностью, следовательно, выше и потери в линиях. Проблема компенсации реактивной мощности традиционно пользуется большим вниманием в отечественной практике. Найдены и применяются различные технические решения (переключаемые конденсаторные батареи, синхронные компенсаторы, фильтр-компенсирующие устройства и т. д.). Однако большинство этих приемов ориентированы на нерегулируемый, а иногда и сильно недогруженный электропривод с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. Достигаемый эффект может оказаться несопоставимо меньше убытков от использования нерегулируемого электропривода. К другим способам энергосбережения в нерегулируемом электроприводе можно отнести: снижение времени холостого хода; переключение обмоток по схемам Δ–Y на время холостого хода или малых нагрузок; изменение типа торможения в электроприводах с частыми пусками и торможениями [6].

Результаты исследования и их обсуждение. Переход от нерегулируемого электропривода к регулируемому является генеральным направлением энергосбережения, принятым во всем мире и дающим наибольший эффект как в части экономии электроэнергии, так и в других показателях технологического процесса.

Для этого в силовой канал включается дополнительный элемент − преобразователь электрической энергии, подающий к асинхронному двигателю напряжение с регулируемыми амплитудой и частотой. В результате обеспечивается подача конечному потребителю необходимой мощности $P_{вых}$ и исключаются большие потери в задвижке [7].

Следует подчеркнуть, что в рассматриваемом случае наряду с главным эффектом – существенным снижением потерь в технологической машине, обслуживаемой электроприводом, и в других элементах силового канала достигается ряд дополнительных, часто не менее важных эффектов: рационализируется весь технологический процесс, экономятся другие ресурсы, увеличивается срок службы основного оборудования, снижается шум и т. д.

Здесь особенно существенен выбор рационального с технической и экономической точек зрения способа управления величиной (величинами), образующей мощность, потребляемую технологической машиной.

Сейчас ситуация радикально изменилась: на рынке появились совершенные и доступные электронные преобразователи частоты. Они выпускаются десятками зарубежных и отечественных фирм, имеют практически одинаковую структуру (выпрямитель – фильтр – автономный широтно-импульсный инвертор (ШИМ – инвертор)) и развитую систему микропроцессорного управления, обеспечивающую широкие функциональные возможности, надежную защиту привода и другие пользовательские функции. Именно эти устройства произвели переворот в современном электроприводе и стали основными (и пока практически единственным) средствами реализации высококачественного регулируемого асинхронного электропривода в массовом применении.

Становятся малоэффективными и многоскоростные асинхронные двигатели. Они тяжелы, дороги, требуют много переключающей аппаратуры, стоимость привода соизмерима со скоростью системы «преобразователь частоты – серийный двигатель».

Итак, система «электронный преобразователь частоты – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором» становится главным на ближайшие годы техническим решением массового регулируемого электропривода. Она особенно привлекательна на стадии модернизации, так как сохраняется все существующее оборудование, но между сетью и двигателем включается новый элемент – преобразователь частоты, радикально меняющий весь технический и экономический облик системы [8].

Заключение. Эффективность электропривода по затраченной энергии на совершение работы зависит от следующих требований.

1. Надежность должна обеспечиваться не менее 15 тыс. ч безотказной работы.

2. Требуемая по техзаданию точность поддержания стабильности регулируемых величин – электромагнитного момента, скорости, перемещения. Наибольшая точность (прецизионная) – 0,01 %.

3. Повысить энергетическую эффективность – расход энергии на получение технологического продукта при заданном качестве. Например, киловатт-часов на одну тонну продукции. Показатель задается ЭП в зависимости от назначения привода.

4. Увеличить ресурсоемкость. Чем выше качество показателя, тем больше затраты. Например, точно и медленно – наименьшая ресурсоемкость, точно и быстро – средняя, точно, быстро и надежно – наибольшая.

Оптимизация тягового привода по своей природе представляет собой смешанное целое число нелинейного программного типа многообъектной задачи проектирования. Основными конкурирующими целями являются размер (и, следовательно, стоимость) компонентов привода (двигателя и инвертора) и общее потребление энергии в заданном цикле движения [9].

Список использованных источников

1. Stević, Z. Supercapacitors as a Power Source in Electrical Vehicles [Electronic resource] / Z. Stević, M. Rajčić-Vujasinović // CDN. – Mode of access : https://cdn.intechopen.com/pdfs/18667/InTech-Chapter_download.pdf. – Date of access : 23.03.2022.

2. Мачулин, П. С. Современные проблемы разработки электропривода / П. С. Мачулин // Молодой ученый. – 2016. – № 10 (114). – С. 273–275.

3. Нос, О. В. Оптимальное векторное управление асинхронным двигателем по критерию минимума токов статора / О. В. Нос // Электротехника, электромеханика и электротехнология ЭЭЭ – 2007 : материалы III науч.-техн. конф. с междунар. участием / Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2007. – С. 79 – 85.

4. The influence of production conditions on the electrophysical parameters of piezoceramics for different applications / A. Akhmedov [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 264 (04020). – 11 p.

5. Хакимов, С. Х. Энергосберегающие технологии контактов электрических аппаратов в энергетическом строительстве / С. Х. Хакимов, С. Н. Каюмов // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы II Респ. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 апр. 2022 г. / редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 289–294.

6. Akhmedov, A. P. Innovative public transport stop with autonomous power supply / A. P. Akhmedov, S. B. Khudoyberganov, N. P. Yurkevich // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте : материалы II Респ. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 апр. 2022 г. редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 181–184.

7. Investigation of factors influencing the operational characteristics of traction transformers / D. T. Yusupov [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 264 (13007). – 6 p .

8. Козярук, А. Е. Методы и средства повышения энерго эффективности машин и технологий с асинхронными электроприводами / А. Е. Козярук, Б. Ю. Васильев // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 47–53.

9. Investigation of winding faults of traction transformers / D. T. Yusupov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 868 (012026). – 6 p.

References

1. Stević, Z. Supercapacitors as a Power Source in Electrical Vehicles [Electronic resource] / Z. Stević, M. Rajčić-Vujasinović // CDN. – Mode of access : https://cdn.intechopen.com/pdfs/18667/InTech-Chapter_download.pdf. – Date of access : 23.03.22.

2. Machulin, P. S. Sovremennye problemy razrabotki elektroprivoda / P. S. Machulin // Molodoj uchenyj. – 2016. – № 10 (114). – S. 273–275.

3. Nos, O. V. Optimal'noe vektornoe upravlenie asinhronnym dvigatelem po kriteriyu minimuma tokov statora / O. V. Nos // Elektrotekhnika, elektromekhanika i elektrotekhnologiya EEE – 2007 : materialy III nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem / Novosib. gos. tekhn. un-t. – Novosibirsk, 2007. – S. 79 – 85.

4. The influence of production conditions on the electrophysical parameters of piezoceramics for different applications / A. Akhmedov [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 264 (04020). – 11 r.

5. Hakimov, S. H. Energosberegayushchie tekhnologii kontaktov elektricheskih apparatov v energeticheskom stroitel'stve / S. H. Hakimov, S. N. Kayumov // Innovacionnye tekhnologii v vodnom, kommunal'nom hozyajstve i vodnom transporte : materialy II Resp. nauch.-tekhn. konf., Minsk, 28–29 apr. 2022 g. / redkol.: S. V. Haritonchik [et al.]. – Minsk : BNTU, 2022. – S. 289–294.

6. Akhmedov, A. P. Innovative public transport stop with autonomous power supply / A. P. Akhmedov, S. B. Khudoyberganov, N. P. Yurkevich // Innovacionnye tekhnologii v vodnom, kommunal'nom hozyajstve i vodnom transporte : materialy II Resp. nauch.-tekhn. konf., Minsk, 28–29 apr. 2022 g. redkol.: S. V. Haritonchik [et al.]. – Minsk : BNTU, 2022. – S. 181–184.

7. Investigation of factors influencing the operational characteristics of traction transformers / D. T. Yusupov [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 264 (13007). – 6 r .

8. Kozyaruk, A. E. Metody i sredstva povysheniya energo effektivnosti mashin i tekhnologij s asinhronnymi elektroprivodami / A. E. Kozyaruk, B. Yu. Vasil'ev // Vestn. YUUrGU. Ser. Energetika. – 2015. – T. 15, № 1. – S. 47–53.

9. Investigation of winding faults of traction transformers / D. T. Yusupov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 868 (012026). – 6 p.

УДК 621.31

Л. Л. Хусаинова, А. Ф. Хусаинова, О. В. Воркунов

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Казанский государственный энергетический университет,
Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

Аннотация. Метод электромагнитного контроля играет важную роль в обеспечении надежной и безаварийной работы высоковольтного электротехнического оборудования. В данной статье исследуется электромагнитный контроль как один из методов оценки состояния высоковольтного оборудования под рабочим напряжением, рассматриваются вопросы углубления возможностей метода электромагнитного контроля с помощью создания новых способов, учитывающих спектральные составляющие низкочастотного диапазона.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, контроль состояния, высоковольтное оборудование, трансформаторы, паспортизация.

L. L. Khusainova, A. F. Khusainova, O. V. Vorkunov

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF ELECTROMAGNETIC CONTROL OF HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

Annotation. The method of electromagnetic control plays an important role in ensuring reliable and trouble-free operation of high-voltage electrical equipment. This paper examines electromagnetic

control as one of the methods for assessing the state of high-voltage equipment under operating voltage, discusses the issues of deepening the possibilities of the electromagnetic control method by creating new methods that take into account the spectral components of the low-frequency range.
Keywords: electromagnetic radiation, condition monitoring, high-voltage equipment, transformers, certification.

Введение. Способ электромагнитного контроля основан на анализе спектров собственного электромагнитного излучения (ЭМИ) высоковольтного электроэнергетического оборудования (ВВЭО). По результатам анализа спектров ЭМИ, которые проводятся в информационных полосах, выявляются степени дефектности оборудования.

Накопление экспериментального материала постепенно расширяет возможности электромагнитного контроля, которые связаны с разработкой новой методики, учитывающей информацию о внешних и внутренних конструктивных элементах контролируемого оборудования [1].

С помощью резонансных свойств конструктивных элементов оборудования можно определить количество и ширину информационных полос, которые находятся в области высоких и сверхвысоких частот (от 3 до 3000 МГц). При диагностике по составляющим первой гармоники спектра собственного ЭМИ информационные частотные полосы занимают диапазон от 15 до 190 МГц, что соответствует диапазону резонансных частот вводов силовых автотрансформаторов 500 кВ. Информационные полосы располагаются в диапазоне до нескольких гигагерц в том случае, когда в процессе диагностирования учитываются составляющие высших гармоник.

Электромагнитную обстановку, ассоциирующуюся с информационными частотными полосами, можно назвать «диагностической». В данное понятие входят результаты оценки особенностей распределения электромагнитного поля вблизи оборудования, а также вопросы отражения и выявления направленных свойств излучателей. При учете диагностической ЭМО можно получать информацию о состоянии ВВЭО, которая обладает детерминированной ценностью (минимизируется или исключается влияние случайных факторов).

Материалы и методы исследования. Процесс получения и оценки диагностической ЭМО, заключающейся в определении наиболее существенных особенностей распределения электромагнитного поля в информационных частотных полосах, состоит из следующих основных этапов.

1. Составление излучающих моделей для обследуемого оборудования.

2. Определение информационных частотных полос, которые описывают техническое состояние основных конструктивных элементов оборудования.

3. Рассчет диаграммы направленности.

4. Определение места расположения измерительных комплексов, необходимых для регистрации спектров ЭМИ [7].

На рис. 1 изображены диаграммы направленности для четырех информационных частот автотрансформатора 500 кВ – 17,6, 27, 125, 167 МГц, рассчитанные с помощью программы MMANA-GAL и соответствующие резонансным

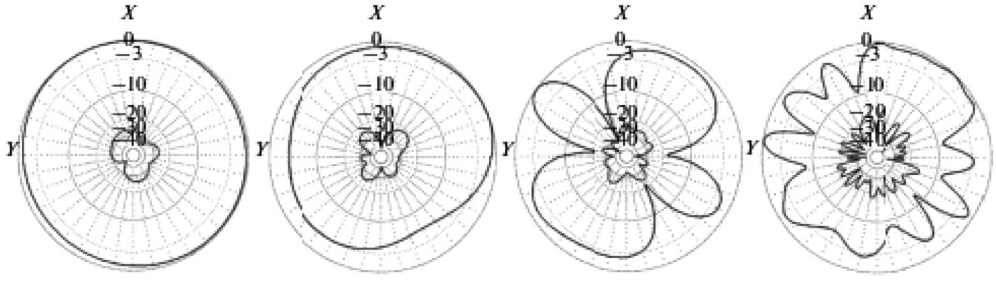


Рис. 1. Диаграммы направленности автотрансформатора 500 кВ для частот:
а – 17,6 МГц; *б* – 27 МГц; в – 125 МГц; *г* – 167 МГц

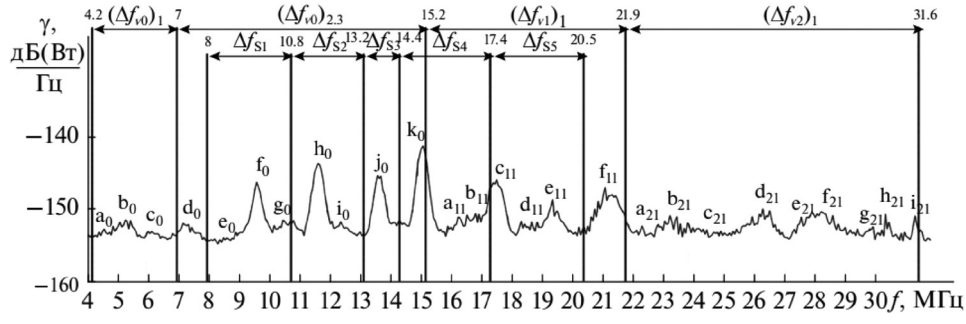


Рис. 2. Спектр электромагнитного излучения автотрансформатора 500 кВ

частотам вводов 500, 220, 11 кВ и ввода нейтрали. Особенностью диагностической ЭМО является то, что на частотах до 30 МГц диаграммы направленности имеют относительно сглаженный вид, а при более высоких частотах – сильную изрезанность. Это необходимо учесть при выборе места расположения измерительной аппаратуры при проведении обследований.

Анализ спектров предусматривает оценку мощности излучения в пределах узкополосных участков, соответствующих резонансным частотам внутренних конструктивных элементов. Такой подход требует более тщательной регистрации спектров ЭМИ, выделения дополнительных информационных частотных полос Δfi, занесения их в базу данных и использования для оценки технического состояния оборудования [6].

На рис. 2 изображен спектр собственного ЭМИ однофазного автотрансформатора 500 кВ с выделенными полосами, которые соответствуют обмоткам высокого (Δf_{S1} и Δf_{S2}), низкого (Δf_{S4} и Δf_{S5}) напряжения и регулировочной обмотке (Δf_{S3}). Излучение от этих обмоток регистрируется в пределах полосы пропускания излучателей, в роли которых выступают высоковольтные вводы автотрансформатора и спуски к ним (полосы $(\Delta f_{v1})_1$ и $(\Delta f_{v0})_{2.3}$).

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты электромагнитного контроля, полученные на основании анализа спектров собственного электромагнитного излучения, представляются в электромагнитном паспорте, в котором указываются значения электромагнитных характеристик оборудования [5].

При составлении электромагнитных паспортов на всех этапах эксплуатации оборудования можно расширить эффективность диагностики [4].

Электромагнитный контроль в комплексной системе диагностики позволяет получать информацию о появлении локальных дефектов в электромагнитном поле, проводить обследование дистанционно, организовать мониторинг состояния оборудования в реальном времени.

Обеспечение надежности функционирования энергетических объектов основано на индивидуальном наблюдении за реальными изменениями технического состояния оборудования в процессе эксплуатации. Совершенствование системы технической эксплуатации включает оптимальную организацию диагностики и контроля технического состояния, а также оценку эксплуатационной надежности [2]. Основной задачей является получение данных о текущем состоянии электротехнического оборудования и возможности отслеживать его изменения, а также планирование режимов его работы [3]. Персонал отделов диагностики часто сталкиваются с необходимостью выбора систем мониторинга, которые обеспечивают надежность и своевременность отслеживания изменений в техническом состоянии оборудования.

При переходе к системе технического обслуживания и ремонта по текущему состоянию предусматривается создание оптимального варианта комплексной диагностики под рабочим напряжением без вывода оборудования из работы, состоящий из нескольких этапов, которые включают функциональную и техническую диагностику и ранжирование оборудования. Для того, чтобы получить информацию о техническом состоянии ВВЭО, достаточно использовать электромагнитный контроль на любом из вышеперечисленных этапов. Техническое состояние ВВЭО характеризуется такими показателями, как нормальное, ухудшенное, предаварийное или аварийное, которые представляют первостепенный интерес для обслуживающего персонала. Проведение очередных обследований предоставляет возможным отслеживание факта появления дефекта и определение скорости его развития, сопоставление результатов электромагнитного контроля с другими испытаниями, которые включены в перечень комплексной диагностики, а также прогнозирование изменения технического состояния контролируемого оборудования.

В метод комплексной диагностики включено составление диагностических карт, которые отражают состояние оборудования, учитывая данные регламентных и диагностических испытаний. Целью заполнения диагностических карт является вывод степени дефектности, рекомендация по оптимизации сроков и объемов проведения технического обслуживания и ремонта, необходимость проведения испытаний другими методами диагностики, благодаря чему достигается индивидуализация проведения мероприятий по диагностике и оценка технического состояния. Мероприятия с использованием электромагнитного контроля помогают в повышении надежности эксплуатации оборудования и оптимизации финансовых затрат на диагностические работы.

Заключение. Таким образом, работы по исследованию характеристик всех составляющих спектров собственного ЭМИ ВВЭО, в том числе низкочастотного диапазона, помогают в расширении и углублении возможностей метода электромагнитного контроля.

Список использованных источников

1. Силин, Н. В. Электромагнитный контроль электроэнергетического оборудования / Н. В. Силин, Н. В. Коровкин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2008. – № 63. – С. 186–192.

2. Таджибаев, А. И. Основные принципы управления техническим состоянием оборудования / А. И. Таджибаев, А. Н. Назарычев // Изв. Академии электротехн. наук РФ. – 2009. – № 2. – С. 27–31.

3. Чернецов, В. А. Анализ выбора и опыт применения систем мониторинга силовых трансформаторов ПАО «Ленэнерго» / В. А. Чернецов, К. В. Мягких // Электроэнергия. – 2016. – № 1. – С. 42–48.

4. Результаты длительной периодической диагностики силовых трансформаторов / Ю. П. Аксенов [и др.] // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2006. – № 1. – С. 28–35.

5. Силин, Н. В. Электромагнитная паспортизация высоковольтного электроэнергетического оборудования / Н. В. Силин, Н. В. Коровкин, И. С. Шамкин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2010. – № 95. – С. 120–125.

6. Измерительно-диагностический комплекс для контроля технического состояния электротехнического оборудования / М. Ф. Низамиев [и др.] // Электрика. – 2015. – № 6. – С. 18–25.

7. Актуальные подходы к организации образовательного процесса для подготовки специалистов энергетических систем и комплексов / Р. Р. Хуснутдинов [и др.] // Вестн. Казан. гос. энергет. ун-та. – 2017. – № 3 (35). – С. 153–160.

References

1. Silin, N. V. Elektromagnitnyj kontrol' elektroenergeticheskogo oborudovaniya / N. V. Silin, N. V. Korovkin // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki. – 2008. – № 63. – S. 186–192.

2. Tadzhibaev, A. I. Osnovnye principy upravleniya tekhnicheskim sostoyaniem oborudovaniya / A. I. Tadzhibaev, A. N. Nazarychev // Izv. Akademii elektrotekhnicheskih nauk RF. – 2009. – № 2. – S. 27–31.

3. Chernecov, V. A. Analiz vybora i opyt primeneniya sistem monitoringa silovyh transformatorov PAO «Lenenergo» / V. A. Chernecov, K. V. Myagkih // Elektroenergiya. – 2016. – № 1. – S. 42–48.

4. Rezul'taty dlitel'noj periodicheskoj diagnostiki silovyh transformatorov / Yu. P. Aksenov [et al.] // Elektro. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. – 2006. – № 1. – S. 28–35.

5. Silin, N. V. Elektromagnitnaya pasportizaciya vysokovol'tnogo elektroenergeticheskogo oborudovaniya / N. V. Silin, N. V. Korovkin, I. S. Shamkin // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki. – 2010. – № 95. – S. 120–125.

6. Izmeritel'no-diagnosticheskij kompleks dlya kontrolya tekhnicheskogo sostoyaniya elektrotekhnicheskogo oborudovaniya / M. F. Nizamiev [et al.] // Elektrika. – 2015. – № 6. – S. 18–25.

7. Aktual'nye podhody k organizacii obrazovatel'nogo processa dlya podgotovki specialistov energeticheskih sistem i kompleksov / R. R. Husnutdinov [et al.] // Vestn. Kazan. gos. energet. un-ta. – 2017. – № 3 (35). – S. 153–160.

УДК 621.1

В. Г. Баштовой, А. Г. Рекс, А. А. Загадская

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МАГНИТОУПРАВЛЯЕМОГО ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМАХ С МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА СРЕД

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе приводятся исследования возможностей использования магнитных жидкостей для повышения эффективности передачи тепла. Представлен механизм магнитного воздействия на теплоперенос в магниточувствительных системах с межфазной границей раздела сред. Изучены различные типы магниточувствительных систем с точки зрения их воздействия на теплоперенос.

Ключевые слова: магнитножидкостные системы, теплоперенос, термоагнитный механизм.

V. G. Bashtovoj, A. G. Reks, A. A. Zagadskaya

HYDRODYNAMIC ASPECTS OF MAGNETO-CONTROLLED HEAT TRANSFER IN FLUID SYSTEMS WITH INTERFACE

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The paper presents research on the possibilities of using magnetic fluids to improve the efficiency of heat transfer. The mechanism of magnetic influence on heat transfer in magnetically sensitive systems with an interfacial interface between media is presented. Various types of magnetically sensitive systems have been studied from the point of view of their effect on heat transfer.

Keywords: magnetic fluid systems, heat transfer, thermomagnetic mechanism.

Введение. В настоящее время существует насущная потребность рационального использования энергии из-за ограниченности энергетических ресурсов в Республике Беларусь. В связи с этим актуальной задачей является разработка эффективных методов передачи тепла в системах обеспечения тепловых режимов современных образцов промышленного оборудования. Одним из путей решения данной задачи может быть создание и использование новых материалов со специальными свойствами.

Перспективным направлением повышения эффективности передачи тепла является использование нового наноматериала – магнитных жидкостей, уникальность которых состоит в сочетании текучести и высокой чувствительности к воздействию внешних магнитных полей [1–3]. Магнитные жидкости являются коллоидным раствором высокодисперсных магнитных наночастиц в жидкости-носителе.

Результаты исследования и их обсуждение. Для разработки магнитоуправляемых методов передачи тепла эффективно могут быть использованы магнитожидкостные системы с межфазной границей раздела сред.

Особенностью таких магнитожидкостных систем является наличие границы раздела магнитной жидкости с другой немагнитной газообразной либо

жидкой средой. Контактирующие среды должны различаться теплофизическими свойствами (теплопроводностью, теплоемкостью и вязкостью).

Управление процессами переноса тепла в таких системах с помощью магнитных полей основано на воздействии полей на происходящие гидродинамические процессы в них.

Возможные способы реализации принципов магнитного воздействия на теплоперенос в магнитожидкостных системах с межфазной границей раздела сред (пленочных, капельных и пузырьковых системах) представлены в таблице.

К механизму магнитного воздействия на теплоперенос в магниточувствительных системах с межфазной границей раздела сред

Вид магнитожидкостной системы	
Локальное покрытие (пленочное)	Капельное (микрокапельное) и барботажное течение
1. Управление формой и площадью поверхности теплоотдачи	
Формирование поверхности покрытия	Формирование поверхности магнитожидкостных капель и пузырей в магнитной жидкости за счет их вытягивания вдоль направления поля
2. Управление устойчивостью покрытия и движением капель (пузырей)	
Стабилизация поверхности неоднородным полем при внешнем обтекании	Управление скоростью движения капель и пузырей и их гидродинамическим сопротивлением. Формирование заданной траектории движения
3. Генерация конвективного переноса в объеме жидкости	
Генерация внутренних и внешних течений в переменном во времени магнитном поле за счет колебаний капель и пузырей	
4. Реализация термомагнитного механизма конвективного течения при нагреве в неоднородных магнитных полях	

Высокая чувствительность магнитных жидкостей к воздействию магнитных полей состоит в том, что свободная поверхность жидкостей способна значительно изменять свою форму при воздействии внешнего магнитного поля и становиться более развитой (т. е. значительно увеличивать площади поверхности). Кроме того, под действием магнитного поля контактирующие фазы могут перемещаться в пространстве друг относительно друга, а также относительно твердых поверхностей и тем самым позволяют организовать конвективное перемешивание, интенсифицирующее перенос тепла.

Типичными магниточувствительными системами с межфазной границей раздела сред являются магнитожидкостные покрытия и пленки, капельные и пузырьковые системы.

Магнитное поле способно эффективно воздействовать на форму магнитожидкостного покрытия. В зависимости от направления поля поверхность покрытия может быть гладкой либо представлять собой систему пиков на поверхности жидкости, которые значительно увеличивают площадь теплоотдачи.

Оригинальной особенностью капель магнитной жидкости является то, что в магнитном поле они вытягиваются в направлении поля и принимают эллипсоподобную форму [1]. Такая деформация капель приводит к увеличению пло-

щади теплоотдающей поверхности. В переменном магнитном поле капли совершают периодические колебания и тем самым обеспечивают эффективное перемешивание жидкости как внутри капли, так и в окружающей ее среде, что способствует интенсификации процессов переноса тепла.

Аналогичное изменение формы наблюдается и у пузырей, находящихся в магнитной жидкости. Они также вытягиваются в направлении магнитного поля и способны совершать колебательные движения.

Если капля магнитной жидкости либо пузырь находятся на твердой поверхности, то в зависимости от ориентации магнитного поля по отношению к поверхности они также деформируются в направлении поля. Такая деформация пузыря позволяет реализовать влияние магнитного поля на условия отрыва пузыря от твердой поверхности и, соответственно, условия ее теплоотдачи.

Если поле направлено перпендикулярно твердой поверхности, то сидячий на ней пузырь вытягивается в том же направлении. Площадь контакта основания пузыря уменьшается, и это приводит к уменьшению объема отрыва с одновременным увеличением частоты отрыва. С другой стороны, в направленном вдоль твердой поверхности поле пузырь увеличивает площадь контакта с поверхностью, и объем его отрыва увеличивается.

Влияние направления магнитного поля на форму пузырей в магнитной жидкости и динамику отрыва от твердых поверхностей является физической основой магнитоуправляемого теплообмена при кипении магнитных жидкостей (рис. 1).

При поперечном направлении магнитного поля к теплоотдающей поверхности в режиме пузырькового кипения паровые пузыри увеличивают длину вдоль направления поля, т. е. перпендикулярно поверхности (рис. 1, *а*). Площадь контакта пузырей с нагретой поверхностью уменьшается, что ослабляет теплоизолирующее действие пузырей и улучшает условия контакта магнитной жидкости с отдающей тепло поверхностью. В результате теплоотдача интенсифицируется. В направленном вдоль теплоотдающей поверхности магнитном поле теплоотдача нагретой поверхности ухудшается, поскольку образующиеся и сидящие на ней паровые пузыри играют теплоизолирующую роль из-за их вытягивания вдоль теплоотдающей поверхности (рис. 1, *а*).

В случае пленочного режима кипения, когда пузырь покрывает поверхность в виде паровой пленки, в нормальном к теплоотдающей поверхности магнитном поле (рис. 1, *б*) при некоторой величине напряженности поверхность пузыря теряет устойчивость [1]. В результате паровая пленка дробится с образованием отдельных пузырей. Положительным результатом этого является интенсификация теплоотдачи. Если же поле направлено вдоль поверхности, то оно стабилизирует поверхность паровой пленки и препятствует ее разрушению. Вокруг нагретой поверхности создается теплоизолирующая паровая оболочка, препятствующая теплоотдаче.

Факт влияния магнитного поля на теплоотдачу при кипении магнитных жидкостей хорошо иллюстрируется при нестационарном охлаждении нагретого до высокой температуры стального цилиндра в магнитной жидкости.

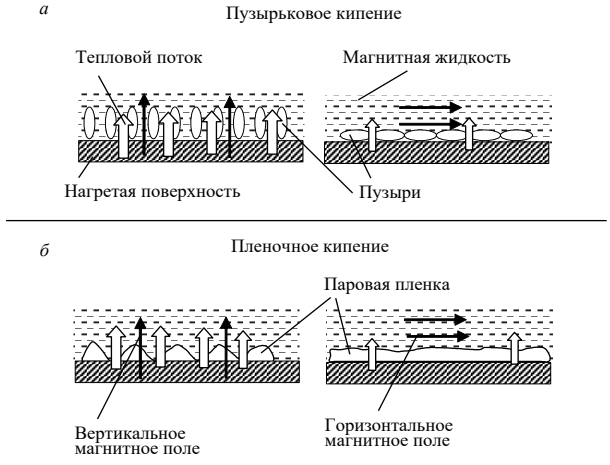


Рис. 1. Влияние направления магнитного поля на форму пузырей в магнитной жидкости и динамику отрыва от твердых поверхностей

На рис. 2 представлены кривые охлаждения центра цилиндра в магнитной жидкости при воздействии магнитных полей различной ориентации. Охлаждение производилось в магнитной жидкости на основе воды МВ-22 с намагниченностью насыщения 22,0 кА/м. Напряженность магнитного поля – 25 кА/м. Начальная температура нагретого цилиндра – 600 °С. При поперечном к оси цилиндра магнитном поле температура при охлаждении цилиндра снижается значительно быстрее, чем продольном направлении поля. Обусловлено это эффективным влиянием поля на формообразование и отрыв пузырей пара.

Интересный механизм воздействия магнитного поля на условия теплоотдачи нагретых поверхностей может быть реализован при движении потоков капель магнитной жидкости или пузырей.

Неоднородное магнитное поле позволяет сформировать заданную траекторию движения капельных и пузырьковых потоков относительно охлаждаемых поверхностей и тем самым изменять условия теплоотдачи этой поверхности. Выполненные эксперименты показали, что в магнитной жидкости средней намагниченности на основе масла достигается горизонтальное отклонение до 40 мм вертикально всплывающих газовых пузырей.

Нужно отметить, неоднородным магнитным полем можно сформировать в объеме магнитной жидкости стационарную неподвижную пузырьковую систему.

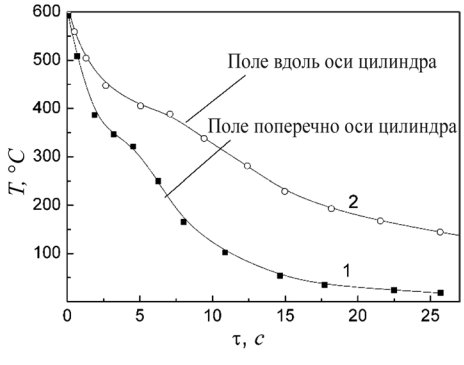


Рис. 2. Кривые охлаждения центра цилиндра в магнитной жидкости при воздействии магнитных полей различной ориентации

Дополнительным механизмом интенсификации теплообмена в магнитной жидкости является специфический для нее термомагнитный механизм конвективного движения [1, 3].

Список использованных источников

1. Баштовой, В. Г. Введение в термомеханику магнитных жидкостей / В. Г. Баштовой, Б. М. Берковский, А. Н. Вислович. – М. : ИВТАН СССР, 1985. – 188 с.

2. Magnetic fluids and Applications, Handbook / Editor-in-chief: B. Berkovski, Ed.: V. Bashtovoi. – New York : Begell House Inc. Publishers, 1996. – 851 p.

3. Берковский, Б. М. Магнитные жидкости / Б. М. Берковский, В. Ф. Медведев, М. С. Краков. – М. : Химия, 1989. – 240 с.

References

1. Bashtovoj, V. G. Vvedenie v termomekhaniku magnitnyh zhidkostej / V. G. Bashtovoj, B. M. Berkovskij, A. N. Vislovich. – M. : IVTAN SSSR, 1985. – 188 s.

2. Magnetic fluids and Applications, Handbook / Editor-in-chief: B. Berkovski, Ed.: V. Bashtovoi. – New York : Begell House Inc. Publishers, 1996. – 851 p.

3. Berkovskij, B. M. Magnitnye zhidkosti / B. M. Berkovskij, V. F. Medvedev, M. S. Krakov. – M. : Himiya, 1989. – 240 s.

УДК 681.11.031.1

К. В. Добрего

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе обосновано необходимость использования накопителей электроэнергии в энергетических системах. Изучен опыт Российской Федерации по развитию рынка систем хранения электроэнергии. Выявлены предпосылки и барьеры развития накопителей энергии в Республике Беларусь.

Ключевые слова: системы накопления энергии, накопители электроэнергии, «зеленая» энергетика.

K. V. Dobrego

PROSPECTS FOR THE USE OF ELECTRICITY STORAGE IN POWER SYSTEMS

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. The paper substantiates the need to use energy storage devices in energy systems. The experience of the Russian Federation in developing the market for electricity storage systems

is studied. The prerequisites and barriers for the development of energy storage devices in the Republic of Belarus have been identified.
Keywords: energy storage systems, energy storage devices, “green” energy.

Введение. Вопрос о применении систем накопления энергии (СНЭ) и прежде всего электроэнергии приобрел особую актуальность в последние десятилетия. Рост рынка АКБ в эти годы составлял (20–30 % в год) [1]. Основными факторами, определяющими востребованность соответствующих разработок, являются развитие электрического транспорта и повышение доли «зеленой» энергетики, требующей буферизации электроэнергии. В странах – технологических лидерах быстрыми темпами развиваются технологии аккумуляторных батарей (АКБ), строятся промышленные системы накопления энергии, наработан методический материал по использованию АКБ [2]. Россия, как технологический лидер постсоветского пространства, обратилась к этому вопросу существенно позже. В августе 2017 г. Министерство энергетики Российской федерации выпустило Концепцию развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации, в которой сформулированы цели, стратегии и мероприятия, направленные на внедрение технологий накопления электроэнергии в энергетической сфере России.

Общая картина освоения этих технологий на сегодняшний день выглядит следующим образом. США – построены и введены в эксплуатацию более 10 ГВт СНЭ (в расчет берутся накопители мощностью, превышающей 1 МВт), Китай с некоторым опозданием двигается по пути технологических лидеров – построены накопители общей мощностью несколько гигаватт. Согласно прогнозу BNEF, мощность и емкость СНЭ, не считая ГАЭС, во всем мире вырастут соответственно до 358 и 1028 ГВт·ч к концу 2030 г. Россия – выполнены десятки небольших пилотных проектов с мощностью СНЭ не превышающей мегаватт. Беларусь – пилотные проекты по использованию СНЭ в энергосистеме находятся на стадии обсуждения и обоснования. Отставание нашей страны не связано с недоступностью самих технологий или элементов СНЭ, а скорее со сложностью технико-экономического обоснования их применения и государственной монополией на энергетическую систему. При этом в России в 2017 г. Министерством энергетики выпущена Концепция развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации, четко формулирующая направления, стратегии развития сферы накопления электроэнергии.

В Беларуси также имеются условия и потребность в развитии данного направления, в том числе в связи с Указом Президента Республики Беларусь № 357 от 24.09.2019 г.; Постановлением Минэнерго от 25.02.2020 г. № 7 «О возобновляемых источниках энергии», Концепция развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года. Опыт стран – лидеров в этой сфере может стать действенным фактором быстрого и эффективного освоения технологий СНЭ в нашем государстве. Настоящий доклад ставит целью определить проблему обоснования экономической целесообразности использования СНЭ, систематизировать соответствующие подходы.

Материалы и методы исследования. Укажем ряд актуальных задач, требующих обоснования целесообразности применения систем накопления энергии (СНЭ). Первая и наиболее простая задача – использование накопительных блоков конечным потребителем электроэнергии, физическим лицом или организацией при условии доступа к сетевой электроэнергии. В этом случае целесообразность полностью определяется экономическим эффектом от буферизации электроэнергии, который, в свою очередь, связан с тарифной политикой поставщика электроэнергии, стоимостью оборудования, режимом потребления электроэнергии и другими факторами. Вторая задача – использование накопителей локальным/изолированным производителем электроэнергии для более выгодной продажи энергии или выполнения обязательств по графику поставки энергии. Третья задача – балансировка энергосистемы в связи с новыми условиями ее работы. В Беларуси это наиболее актуальная задача, связанная с пуском Белорусской АЭС. В этой ситуации должны сравниваться альтернативные варианты балансировки системы. Сравнение должно проводиться как по объему необходимых капитальных затрат (инвестиций), так и по нормированным среднегодовым затратам общим (all-round) затратам за время жизни оборудования, отнесенным к этому сроку. Поскольку энергетическая система является государственной собственностью и связана со всеми сферами жизнедеятельности общества, должны учитываться также и системные эффекты на общегосударственном уровне – экологический, социальный, влияние на развития промышленности, транспорта и т. п. Сравнение осложняется тем, что различные альтернативные варианты не эквивалентны по конечному влиянию на работу энергосистемы. Четвертая ситуация – оптимизация работы энергосистемы и обоснование использования для этой цели СНЭ. В этом случае оптимизация системы может быть связана с мероприятиями по ремонту, замене, модернизации компонентов энергосистемы. При этом сравнивается работа существующей конфигурации системы и модифицированной с использованием СНЭ. Как и в предыдущем случае, должны учитываться как капитальные затраты, так и среднегодовые затраты за жизненный цикл оборудования. Еще более важным становится учет системных эффектов. В докладе кратко рассмотрены методики оценки эффективности использования СНЭ для перечисленных задач.

Заключения. В докладе также представлены направления и некоторые результаты научно- исследовательских работ, проводимых в БНТУ в данном направлении в последние годы. В частности работы, связанные с моделированием параллельно-последовательных сборок АКБ и прогнозированию износа параметров накопителей электроэнергии.

Список использованных источников

1. Мировой рынок накопителей энергии [Электронный ресурс] // Национальная нефтегазовая сервисная ассоциация. – Режим доступа : https://nangs.org/news/renewables/eksperty-mirovoy-rynok-nakopiteley-energii-do-2030-goda-budet-rasti-na-23-v-god. – Дата доступа : 20.05.2022.

2. Energy Storage Grand Challenge Cost and Performance Assessment . Technical report [Electronic resource] // Energy Storage Grand Challenge. – Mode of access : https://www.eqmagpro.com/wp-content/uploads/2020/12/Final-ESGC-Cost-Performance-Report-12-11-20201_1_compressed.pdf. – Date of access : 20.05.2022.

References

1. Mirovoj rynok nakopitelej energii [Electronic resource] // Nacional'naya neftegazovaya servisnaya associaciya. – Mode of access : https://nangs.org/news/renewables/eksperty-mirovoy-rynok-nakopiteley-energii-do-2030-goda-budet-rasti-na-23-v-god. – Date of access : 20.05.2022.

2. Energy Storage Grand Challenge Cost and Performance Assessment. Technical report [Electronic resource] // Energy Storage Grand Challenge. – Mode of access : https://www.eqmagpro.com/wp-content/uploads/2020/12/Final-ESGC-Cost-Performance-Report-12-11-20201_1_compressed.pdf. – Date of access : 20.05.2022.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Ахметова И. Г., Валеева Ю. С. Технологизация отраслей энергетики, повышение энерго-, ресурсоэффективности и энергосбережения на примере Республики Татарстан 6
Akhmetova I. G., Valeeva Yu. S. Technologization of energy industries, increasing energy and resource efficiency and energy saving on the example of the Republic of Tatarstan 6

Зорина Т. Г. Устойчивое энергетическое развитие как основной драйвер трансформации энергетики Республики Беларусь 19
Zoryna T. G. Sustainable energy development as the main driver of power engineering transformation in the Republic of Belarus 19

Кудрявцева О. В., Яковлева Е. Ю. Низкоуглеродное развитие в непростые времена: энергетика и промышленность 36
Kudryavtseva O. V., Yakovleva E. Yu. Low-carbon development in challenging times: energy and industry 36

Массель Л. В., Массель А. Г. Методологический подход к исследованиям устойчивости энергетических систем на основе концепции ситуационного управления. 39
Massel L. V., Massel A. G. Methodological approach to research of energy systems resilience based on the concept of situational management 39

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Быкова Е. В., Кириллова Т. И. Опыт разработки шаблонов для оценки эмиссий загрязнителей по протоколу РПВЗ и представления на специализированном сайте. 58
Bicova E. V., Kirillova T. I. Experience in developing templates for assessing pollutant emissions under the PRTR protocol and presenting them on a specialized website 58

Ворожцова Т. Н. Онтологический анализ факторов влияния объектов энергетики на социо-экологическую систему 77
Vorozhtsova T. N. Ontological analysis of the factors of energy facilities influence to the socio-ecological system. 77

Гапанович Е. В., Савич-Шемет О. Г., Гавриленко И. И. Геоэкологические аспекты длительной эксплуатации силовых кабелей с бумажной маслопропитанной изоляцией (БМПИ) 84
Gapanovich E. V., Savich-Shemet O. G., Gavrilenko I. I. Geoecological aspects of long-term operation of power cables with insulating layer of oil-impregnated paper 85

Кузьмин В. Р., Массель Л. В. Оценка ущербов от загрязнения окружающей среды объектами энергетики в исследованиях устойчивости энергетических и экологических систем 92
Kuzmin V. R., Massel L. V. Damage assessment of energy objects' environmental pollution in research of resilience of energy and ecological systems 93

Любчик О. А. Сравнительная характеристика угроз и рисков энергетической безопасности в отдельных странах – экспортерах и странах – импортерах энергоресурсов 101
Liubchyk O. A. Comparative characteristics of energy security threats and risks in several energy resources exporting and importing countries 102

Minasyan S. A., Shahbazyan Kh. A. Assessment of the impact of structural changes on the country's energy security (on the example of the Republic of Armenia)..... 108
Минасян С. А., Шахбазян Х. А. Оценка влияния структурных изменений на энергетическую безопасность страны (на примере Республики Армения)..... 108

Панасюк В. В. Региональные аспекты рисков и угроз энергетической безопасности Республики Беларусь 115
Panasyuk V. V. Risk and threats to energy security of the Republic of Belarus 115

Чалбаш О. Х. Система выработки рекомендаций для безопасности энергетических объектов 127
Chalbash O. X. System for developing recommendations for the safety of energy facilities.... 128

ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРЕТИКА

Александрович С. А., Цегалко Е. В. Анализ барьеров на пути внедрения технологий низкоуглеродного теплоснабжения в жилищном секторе..... 138
Aliaksandrovich S. A., Tsegalko E. V. Analysis of barriers to implementation of low-carbon heating technologies in the residential sector..... 138

Илюшин П. В. Проблемные вопросы увеличения доли электростанций на основе возобновляемых источников энергии в структуре генерирующих мощностей и способы их решения..... 145
Ilyushin P. V. Problematic issues of increasing the share of power plants based on renewable energy sources in the structure of generating capacities and ways to solve them..... 145

Камалиева Р. Ф., Филимонова А. А. Улавливание углекислого газа при производстве водорода и работе топливного элемента 155
Kamalieva R. F., Filimonova A. A. Carbon dioxide capture during production hydrogen and fuel cell operation 155

Нефедова Л. В. Современная и перспективная роль объектов возобновляемой энергетики в энергообеспечении регионов России 165
Nefedova L. V. Current and prospective role of renewable energy in regions of Russia power supply..... 166

Чернова Н. И., Киселева С. В., Власкин М. С., Григоренко А. В., Рындин К. Г. Ресурсный потенциал производства биомассы микроводорослей для получения биотоплива и секвестирования антропогенного углерода 173
Chernova N. I., Kiseleva S. V., Vlaskin M. S., Grigorenko A. V., Ryndin K. G. Resource potential of microalgae biomass production for biofuel production and anthropogenic carbon sequestration 173

Гайнутдинова Д. Ф., Гайнутдинов Ф. Р. Водород как основа низкоуглеродной экономики 181
Gainutdinova D. F., Gainutdinov F. R. Hydrogen as the basis of a low-carbon economy 181

Каменская Е. О. Использование возобновляемых источников энергии в Республике Беларусь 183
Kamenskaya E. O. The use of renewable energy sources in the Republic of Belarus 183

Лабкович О. Н., Погирницкая С. Г. Повышение эффективности работы малой ветроустановки при малой скорости ветра..... 186
Labkovich O. N., Pogirnitskaya S. G. Improving the efficiency of a small wind turbine at low wind speeds 186

Новик А. В., Бибик А. А. Повышение уровня подготовки специалистов в рамках направления «Альтернативная энергетика» 189
Novik A. V., Bibik A. A. Increasing the level of training of specialists within the direction “Alternative energy” 190

Червинский В. Л., Дюров В. В., Э. Э. Роа. Особенности повышения энергоэффективности малых ветроэнергоустановок 193
Charvinski V. L., Dyurov V. V., H. E. Roa. Specifics of increasing the energy efficiency of small wind power plants 193

Червинский В. Л., Трацевский А. В., Трацевский Н. А. Особенности повышения энергоэффективности солнечных электрических станций 196
Charvinski V. L., Tratcevski A. V., Tratcevski N. A. Features of increasing the energy efficienty of solar power plants 196

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Беляева Г. И., Зиганшин М. Г. Численные исследования аэродинамики потоков в мультициклонах в составе комплексного воздухоочистительного устройства 199
Belyaeva G. I., Ziganshin M. G. Numerical studies of flow aerodynamics in multicyclones as part of an integrated air cleaning device 199

Будникова И. К. Моделирование и анализ надежности региональных систем электроснабжения. 204
Budnikova I. K. Modeling and analysis of reliability of regional power supply systems 204

Гимадиев Р. Ш. Моделирование деформирования провода электропередачи с учетом изгибной жесткости 209
Gimadiev R. Sh. Modeling the deformation of a power wire taking into account flexural stiffness 209

Маршалова Г. С., Лира М. С., Данильчик Е. С. Численное исследование влияния поперечного шага на теплоотдачу двухрядных трубных пучков аппаратов воздушного охлаждения в режиме свободной конвекции 215
Marshalova G. S., Lira M. S., Danil’chik E. S. Numerical simulation of the transverse tube installation steps effect on the heat transfer of air-cooled apparatuses consisting on double-row tube bundles under free convection 216

Новаш И. В., Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Румянцев Ю. В. Моделирование режимов энергосистемы в реальном времени как инструмент исследования развития энергетической системы Республики Беларусь 225
Novash I. V., Romanyuk F. A., Rumyantsev V. Yu., Rumyantsev Yu. V. Real-time simulation of power system modes as a research tool for the development of the energy system of the Republic of Belarus. 226

Прусов С. Г., Юркевич О. И. Экономические последствия цифровизации систем учета электрической энергии: экономическая эффективность, влияние на уровень тарифов на электрическую энергию 234
Prusov S. G., Yurkevich O. I. Economic consequences of digitalization of electricity metering systems: economic efficiency, impact on the level of electricity tariffs. 234

Норхожаева Н. Н., Камалов Н. К., Екубова С. Р. Математическая модель расчета переходных процессов синхронной машины двухосного возбуждения 244
Norkhozhaeva N. N., Kamalov N. K., Yokubova S. R. Mathematical model for calculation of transient processes of a synchronous machine of two-axis excitation 244

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Гальперова Е. В. Цифровизация в секторе зданий – один из путей декарбонизации энергетики 248
Galperova E. V. Digitalization in the buildings sector is a one of the ways to decarbonize the energy sector 248

Гаськова Д. А., Массель Л. В., Массель А. Г. Применение интеллектуальных технологий киберситуационной осведомленности для повышения устойчивости энергетических систем 255
Gaskova D. A., Massel L. V., Massel A. G. Application of intelligent technologies of cyber situational awareness to increase the resilience of energy systems 255

Пестерев Д. В. Интеграция онтологического и когнитивного моделирования в исследованиях устойчивости энергетических и социо-экологических систем 262
Pesterev D. V. Integration of ontological and cognitive modeling in studies of sustainability of energy and socio-ecological systems 263

Зацаринная Ю. Н., Валеева Г. Р. Технологии цифровизации в сфере энергетики. 270
Zatsarinnaya Y. N., Valeeva G. R. Digitalization technologies in the energy sector. 270

Ковалева Т. Д., Шкиренко А. А., Гецман Е. М. Использование единой информационной модели в энергетике 272
Kovaleva T. D., Shkirenka A. A., Hetsman E. M. Using common information model in the energy sector 272

Фаррахова А. М., Валиуллина Д. М. Интеллектуальный цифровой управляемый разъединитель 275
Farrakhova A. M., Valiullina D. M. Intelligent digital controlled disconnector 275

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Бошняга В. А., Суслов В. М., Стратан И. П., Добря И. В. Особенности работы кабельной распределительной сети 6–35 кВ в установившемся режиме с изолированной и компенсированной нейтралью при однофазном замыкании на землю 279
Bosneaga V. A., Suslov V. M., Stratan I. P., Dobrea I. V. Features of operation of cable distribution network 6–35 kV in steady mode with isolated and compensated neutral with single-phase earth fault 279

Будникова И. К., Заманов Р. И. Повышение надежности систем электроснабжения на объектах нефтедобывающей отрасли 293
Budnikova I. K., Zamanov R. I. Improving the reliability of power supply systems at oil production facilities 293

Bicova E. V., Kirillova T. I., Vasilieva I. V., Moraru L. P. Analysis of the quality of building short-term forecasts of energy balances 299
Быкова Е. В., Кириллова Т. И., Васильева И. В., Морару Л. П. Анализ качества построения краткосрочных прогнозов энергетических балансов. 300

Валеева Г. Р., Зацаринная Ю. Н. Организация ремонта объектов энергетики. Принципы планирования. 315
Valeeva G. R., Zatsarinnaya Y. N. Organization of repair of energy facilities. Planning principles 315

Камалов И. Р. Методы определения мест обрыва и короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи 318
Kamalov I. R. Methods for determination of open and short circuit points on overhead power lines 318

Камалов И. Р. Контрольно-измерительное оборудование – мониторинг подстанций и других энергообъектов 321
Kamalov I. R. Control and measuring equipment – monitoring of substations and other power facilities 321

Полещук Л. Л., Шевченок В. Н. «Интеллектуальная» энергоэффективность как вектор системной политики энергосбережения 323
Poleshchuk L. L., Shevchenok V. N. «Intelligent» energy efficiency as a vector of the system policy of energy saving 324

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Айвазян А. Г., Барсегян А. Р., Давтян В. С. О некоторых экологических рисках развития малой гидроэнергетики в Армении 329
Ayvazyan A. G., Barseghyan A. R., Davtyan V. S. On some environmental risks of small hydropower development in Armenia 329

Кузенкова Д. С., Бландинский В. Ю. Разработка жидкосолевой петли реактора МБИР. . . 336
Kuzenkova D. S., Blandinskiy V. Yu. Molten salt loop development of the MBIR reactor 336

Рудченко Г. А. Компаративный анализ моделей электроэнергетических рынков зарубежных стран в контексте формирования национального рынка электроэнергии Республики Беларусь. 342
Rudchenko G. A. Comparative analysis of models of electric power markets of foreign countries in the context of the formation of the national electricity market of the Republic of Belarus . . . 343

Liu Xueyao, Zhai Zhuang. The paths of sustainable energy development in regions of China . . . 351
Лю Сюэяо, Чжай Чжуан. Пути устойчивого развития энергетики в регионах Китая . . . 351

Yang Zhuxi. The sustainable development of China's energy 358
Ян Чжуси. Устойчивое развитие энергетики Китая 358

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИКИ

Вардан Г. А. Электромембранный способ получения гипохлорита натрия 364
Vardan G. A. Electromembrane method for producing sodium hypochlorite 364

Вардан Г. А., Барсегян Р. Н., Мартоян Г. А. Извлечение скандия из красного шлама 369
Vardan G. A., Barseghyan R. N., Martoyan G. A. Recovery of scandium from red mud. 369

Касимов Ф. Ш., Ниязов Ш. К. Методика обработки результатов экспериментальных исследований дневного количества накопленного в емкомприемнике полезного тепла плоских солнечных водонагревательных коллекторов 374
Kasimov F. Sh., Niyazov Sh. K. Method of processing of the experimental studies result of the day amount of useful heat accumulated in the capacitive receiver of flat-plate solar water-heating collectors 375

Малько М. В., Василевич С. В., Добрего К. В., Дегтеров Д. В., Асадчий А. Н. Исследование каталитической активности минеральных материалов в реакции разложения пиролизной смолы 378
Malko M. V., Vasilevich S. V., Dobrego K. V., Degterov D. V., Asadchyi A. N. Study of catalytic activity of mineral materials in the pyrolysis resin decomposition reaction 379

Саверченко В. И. Сокращение затрат углеводородного топлива на отопительные нужды 390
Saverchenko V. I. Decreasing of expenses of hydrocarbon fuels for housewarming needs 390

Скрипко А. Н., Шевчик Н. Е., Барайшук С. М., Баев В. Г. Искусственная модификация грунта для создания и ремонта низкоомных заземляющих устройств 398
Skripko A. N., Shevchik N. E., Baraishuk S. M., Baev V. G. Artificial soil modification for the construction and repair of low-resistance grounding devices 398

Хафизов Л. А., Камалиева Л. И., Куракина О. Е. Тепловизионное диагностирование конденсаторов связи 403
Khafizov L. A., Kamalieva L. I., Kurakina O. E. Thermal image diagnosis communication capacitors 403

Маслахова М. Н., Роженцова Н. В. Высшие гармоники и их негативное влияние на работу электроустановок 406
Maslakhova M. N., Rozhentsova N. V. Higher harmonics and their negative effect on the operation of electrical installations 407

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Маршалова Г. С. Сравнительный анализ эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения в режимах вынужденной, свободной и смешанной конвекции 409
Marshalova G. S. Comparison analysis of the air-cooled apparatus operation in forced, free and mixed convection 409

Popescu V. S., Vasileivich S. V., Balan M. M., Volconovici O. L., Balan T. V., Kurlov I. S. Seed drying installation with low electricity consumption. 416
Попеску В. С., Василевич С. В., Балан М. М., Волконовичи О. Л., Балан Т. В., Курлов И. С. Установка для сушки семян с низким потреблением электроэнергии 416

Prusov S. G., Chayabutra W. Activities to achieve carbon neutrality in Belarus: introduction of XPLATE^{TM} technology, advancement in digitalization of emission and fuel consumption accounting systems 422
Прусов С. Г., Чаябутра В. Мероприятия по достижению углеродной нейтральности в беларуси: внедрение технологии XPLATE^{TM}, цифровизация систем учета выбросов и расхода топлива 422

Федюхин А. В. Разработка научных основ для применения воздухо-аккумулирующих станций в качестве накопителей электрической энергии 431
Fedyukhin A. V. Development of scientific basis for the application of compressed air-storage systems as electric energy storage devices 432

Хакимов С. Х. Критерии эффективности электропривода по затраченной энергии на совершение работы 438
Khakimov S. H. Criteria for the efficiency of the electric drive according to the energy expended to perform the work 438

Хусаинова Л. Л., Хусаинова А. Ф., Воркунов О. В. Совершенствование метода электромагнитного контроля высоковольтного оборудования 443
Khusainova L. L., Khusainova A. F., Vorkunov O. V. Improvement of the method of electromagnetic control of high-voltage equipment 443

Баштовой В. Г., Рекс А. Г., Загадская А. А. Гидродинамические аспекты магнитоуправляемого переноса тепла в магнитожидкостных системах с межфазной границей раздела сред 448
Bashtovoj V. G., Reks A. G., Zagadskaya A. A. Hydrodynamic aspects of magneto-controlled heat transfer in fluid systems with interface 448

Добрего К. В. Перспективы использования накопителей электроэнергии в энергетических системах 452
Dobrego K. V. Prospects for the use of electricity storage in power systems 452

Научное издание

УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Сборник докладов II Международной научной конференции (3–6 октября 2022 г.)

Редактор *Т. А. Горбачевская, Е. А. Талунчик*
Художественный редактор *Д. А. Комлев*
Технический редактор *М. В. Савицкая*
Компьютерная верстка *С. Н. Костюк*

Подписано в печать 02.05.2023. Формат $70\times100^{1}/_{16}$. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 37,54. Уч.-изд. л. 30,4. Тираж 166 экз. Заказ 90.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».
Свидетельства о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013, № 2/196 от 05.04.2017.
Ул. Ф. Скорины, 40, 220084, г. Минск