

ISSN 2413 - 0133
Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

№3(23)/2021

6+

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ**

Научный журнал

№ 3 (23)



EDITORIAL BOARD

Ablameyko S.V.
 Arshinskiy L.V.
 Berestneva O.G.
 Boukhanovsky A.V.
 Bychkov I.V.
 Woern H.
 Voevodin V.V.
 Wolfengagen V.E.
 Voropai N.I.
 Gornov A.Y.
 Gribova V.V.
 Groumpos P.
 Eliseev S.V.
 Zorina T.G.
 Kazakov A.L.
 Kalimoldaev M.N.
 Karpenko A.P.
 Komendantova N.P.
 Kureichik V.V.
 Lis R.
 Massel L.V.
 Moskvichev V.V.
 Mokhor V.V.
 Ovtcharova J.
 Popov G.T.
 Sidorov D.N.
 Smirnov S.V.
 Stylios C.
 Taratukhin V.V.
 Khamisov O.V.
 Hodashinsky I.A.
 Chubarov L.B.
 Yusupova N.I.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ
 Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
 Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ
 Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО
 Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
 Вёрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
 Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ
 Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ
 Воропай Н.И., чл.-корр. РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
 Грибова В.В., д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
 Грумпос П., Греция, University of Patras
 Елисеев С.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
 Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси
 Казаков А.Л., д.ф.-м.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
 Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ
 Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана
 Комендантова Н.П., PhD, Австрия, Лаксенбург, ПАСА
 Курейчик В.В., д.т.н., профессор ЮФУ, Таганрог
 Лис Р., Польша, Wrocław University of Science and Technology
 Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, СКТБ «Наука» СО РАН
 Мохор В.В., д.т.н., Киев, ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины
 Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
 Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
 Сидоров Д.Н., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН
 Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus
 Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster
 Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР
 Чубаров Л.Б., д.т.н., Новосибирск, ИВТ СО РАН
 Юсупова Н.И., д.т.н., Уфа, УГАТУ

EXECUTIVE EDITORIAL

Chief Editor Massel L.V.
 Executive Editor
 Bakhvalova Z.A.
 Editor Kopaigorodsky A.N.
 Editor Massel A.G.
 Designer Pesterev D.V.

ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор	Массель Л.В.	д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Выпускающий редактор	Бахвалова З.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Редактор	Копайгородский А.Н.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Редактор	Массель А.Г.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Дизайнер	Пестерев Д.В.	Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Адрес учредителя, издателя и редакции

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
 Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
 Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)
 664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
 Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 441

Массель Л.В. e-mail: massel@isem.irk.ru

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 440

Бахвалова З.А. e-mail: zinand@isem.irk.ru

Сайт журнала - <https://www.imt-journal.ru>

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016. Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Регистрационный номер ПИ № ФС 77 – 73539.

Отпечатано в полиграфическом участке ИСЭМ СО РАН

СС ВУ

*Подписка на журнал доступна со второго полугодия 2021г.

Дата выхода 08.11.2021 г. Тираж 100 экз.

© Издательство ИСЭМ СО РАН
 Цена свободная. (6+)

Технологии искусственного интеллекта

- Массель Л.В., Пестерев Д.В.** Качество жизни как фактор интеграции исследований устойчивости энергетических, социо-экологических и социально-экономических систем **5**
- Ворожцова Т.Н., Иванова И.Ю., Майсюк Е.П.** Компоненты онтологического пространства знаний для оценки влияния энергетики на качество жизни населения **17**
- Колосок И.Н., Коркина Е.С.** Применение технологии граничной аналитики (Edge Analytics) при создании цифровых двойников объектов ЕЭС России **28**

Информационные системы и программные комплексы

- Расторгуев И.А., Щепетина Т.Д., Баланин А.Л.** Применение геоинформационной системы для оценки инфраструктурной доступности регионов с позиций освоения и развития **40**
- Майсюк Е.П., Иванова И.Ю., Иванов Р.А.** Информационное наполнение моделей определения экологических характеристик функционирования объектов энергетики **49**
- Массель А.Г., Мамедов Т.Г., Пяткова Н.И.** Технология вычислительного эксперимента в исследованиях работы энергетических отраслей при реализации угроз энергетической безопасности **62**

Математическое моделирование в энергетике и экономике

- Донской И.Г.** Численная оценка границ тепловой устойчивости слоевого горения биомассы в приближении локального химического равновесия **74**
- Илькевич Н.И., Дзюбина Т.В., Калинина Ж.В.** Развитие методов анализа и обеспечения надежности газораспределительных систем в задачах комплексного энергоснабжения крупных территориальных образований **89**
- Гальперова Е.В.** Метод и модели для оценки влияния развития распределенной генерации на спрос и цену электроэнергии в регионе **101**
- Мансурова Ю.Т., Туктарова П.А., Мансуров Т.В.** Оценка эффективности международной факторинговой операции для коммерческого банка **117**
- Памяти С.В. Елисеева** **129**

Artificial intelligence technologies

- Massel L.V., Pesterev D.V.** Quality of life as a factor for integration of resilience research of energy, socio-ecological and socio-economic systems **5**
- Vorozhtsova T.N., Ivanova I.Yu., Maysyuk E.P.** Components of the ontological knowledge space for assessing the impact of energy facilities on quality of life of the population **17**
- Kolosok I.N., Korkina E.S.** Application of Edge Analytics technology to develop digital twins of Russia's united electric power system facilities **28**

Information systems and software systems

- Rastorguev I.A., Shchepetina T.D., Balanin A.L.** Application of a geoinformation system for assessing the infrastructure accessibility of regions from the perspective of land use planning and development **40**
- Maysyuk E.P., Ivanova I.Yu., Ivanov R.A.** Information content of models for determining the environmental characteristics of the energy facilities functioning **49**
- Massel A.G., Mamedov T.H., Pyatkova N.I.** Computational experiment technology in research of power industries when implementing threats to energy security **62**

Mathematical modeling in energy and economics

- Donskoy I.G.** Numerical estimation of thermal stability boundaries of fixed bed biomass combustion using local chemical equilibrium approximation **74**
- Ilkevich N.I., Dzyubina T.V., Kalinina Z.V.** Development of methods for analyzing and ensuring the reliability of gas distribution systems in the tasks of integrated power supply of large territorial formations **89**
- Galperova E.V.** Method and models for estimating the influence of distributed generation development on electricity demand and price in a region **101**
- Mansurova Y.T., Tuktarova P.A., Mansurov T.V.** Efficiency evaluation of the international factoring operation for a commercial bank **117**
- In memory of S.V. Eliseev** **129**

УДК 004.8: (620.9 + 504.03)

КАЧЕСТВО ЖИЗНИ КАК ФАКТОР ИНТЕГРАЦИИ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ, СОЦИО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И СОЦИО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Массель Людмила Васильевна

д.т.н., профессор, гл. н. с.,

зав. отделом «Системы искусственного интеллекта в энергетике»,

e-mail: lvmassel@gmail.com

Пестерев Дмитрий Вячеславович

старший инженер отдела «Системы искусственного интеллекта в энергетике»,

e-mail: pesterev.dmitriy@gmail.com

Институт систем энергетики им Л.А. Мелентьева СО РАН

664033 Иркутск, Лермонтова, 130.

Аннотация. Рассматривается понятие устойчивости в смысле «Resilience» и связанные с ним понятия энергетической и экологической безопасности. Предлагается рассматривать качество жизни как фактор интеграции исследований устойчивости энергетических, социо-экологических и социо-экономических систем. Вводятся критерии устойчивости энергетических, экологических и социальных систем. Когнитивное моделирование рассматривается как один из основных инструментов исследований устойчивости. Приводятся примеры когнитивного моделирования.

Ключевые слова: устойчивость, энергетические, социо-экологические и социо-экономические системы, качество жизни, когнитивное моделирование.

Цитирование: Массель Л.В., Пестерев Д.В. Качество жизни как фактор интеграции исследований устойчивости энергетических, социо-экологических и социо-экономических систем // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. 3 (23). С. 5-16.
DOI: 10.38028/ESI.2021.23.3.001.

Введение. В последнее время за рубежом вызывает большой интерес направление, определяемое термином «Resilience», который переводится на русский язык как «устойчивость» или «упругость». В России эти исследования ведутся в основном в области технической устойчивости, в то время как в Западной Европе рассматривают это направление шире и включают в рассмотрение 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 рамках этих исследований, выполняемых в России.

Постановка задачи интеграции исследований устойчивости энергетических и социо-экологических систем была выполнена авторами совместно с коллегами из Международного института прикладного системного анализа (International Institute of Application System Analysis) - МИПСА или IIASA (Лаксенбург, Австрия) [1, 2].

Под социо-экологическими системами (в русском языке часто используется термин «социально-экологические», в английском - Socio-ecological Systems) будем понимать природные системы, весьма чувствительные к антропогенным воздействиям и социальным изменениям¹.

Социо (социально)-экономическая система определяется там же как структура социальных и экономических отношений в обществе, включающая взаимоотношение между социальными группами, право собственности, судебную систему и пр.

¹ Словарь по географии, 2015, https://geography_ru.academic.ru/

В исследованиях устойчивости предлагается использовать концепцию ситуационного управления и семантическое моделирование (в первую очередь когнитивное). В статье рассматриваются эти понятия и перспективы их применения в исследованиях устойчивости.

Определения устойчивости. Концепция устойчивости (в смысле resilience) не имеет уникального определения, из-за ее широкого использования в разных областях с различными значениями и последствиями [3-8]. Устойчивость часто определяется как способность системы возвращаться к равновесию, или, скорее, способность вернуться к равновесию и развиваться, несмотря на дальнейшие толчки и нарушения.

Одно из самых популярных определений было предложено 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» [3]. Одно из более широких определений, часто используемое в международной практике, было предложено Международной группой экспертов по изменению климата (IPCC, 2012): «Устойчивость как способность системы и ее компонентов своевременно и эффективно предвидеть, переносить, приспосабливаться и восстанавливаться от последствий потенциально опасного события». Уровень устойчивости пропорционален скорости возвращения назад (восстановления).

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 (Holling, 1996) [4]. 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.

При рассмотрении социальной устойчивости выделяют следующие факторы: моральные ценности, реалистический оптимизм, устойчивая ролевая модель, получение социальной поддержки, ментальная и эмоциональная гибкость, смысл жизни и цели, духовные практики, физическая активность, способность противостоять страхам. Уделяется большое внимание связи между снижением риска бедствий и устойчивостью.

Большое значение в исследованиях устойчивости имеют вопросы энергетической и экологической безопасности. Важным аспектом обеспечения энергетической безопасности (ЭБ) страны [9] является исследование негативного воздействия природных катаклизмов на энергетические системы с целью снижения рисков крупных системных аварий, оказывающих существенное влияние на качество жизни населения. Природные риски, такие, как землетрясения, штормы, наводнения, периоды экстремальной жары, названы в числе главных причин возникновения каскадных аварий в энергосистемах. Последние данные свидетельствуют о том, что изменение климата ведёт к росту числа экстремальных природных катаклизмов, которые могут привести к системным авариям.

Необходимость совместного рассмотрения экологических, социальных и экономических факторов подтверждается также тем, что сейчас одним из мировых принципов ответственного инвестирования является проверка компании на соответствие критериям ESG (англ. environmental – экология, social – социальное развитие, governance – корпоративное управление), т.е. ESG – это три параметра, в соответствии с которыми компании обеспечивают управление устойчивым развитием, направленным на обеспечение достойного качества жизни людей [10]. Эти параметры подробнее будут рассмотрены ниже.

Адаптация концепции ситуационного управления для исследований устойчивости. В работах коллектива, представляемого авторами, применяется концепция ситуацион-

ного управления, первоначально предложенная Д.А. Поспеловым [11]. Использовалась современная трактовка ситуационного управления [12], суть которой состоит в следующем. Полагая, что текущая ситуация C принадлежит некоторому классу Q' , а целевая (заданная) ситуация Gg – классу Q'' , ищется такое управление (вектор управляющих воздействий U), принадлежит множеству допустимых управлений Ω_u и обеспечивает требуемое преобразование одного класса ситуаций в другой:

$$C \in Q' \xrightarrow{U \in \Omega_u} G_g \in Q''$$

Для исследований устойчивости энергетических и социо-экологических систем авторами совместно с коллегами [2] выполнена адаптация концепции ситуационного управления (рис. 1), учитывающая фактор возмущений F (набор сценариев чрезвычайных ситуаций E_i). Развитием и применением этой концепции при построении интеллектуальных систем поддержки принятия решений (СППР) коллектив, представляемый авторами, занимается более 10 лет.

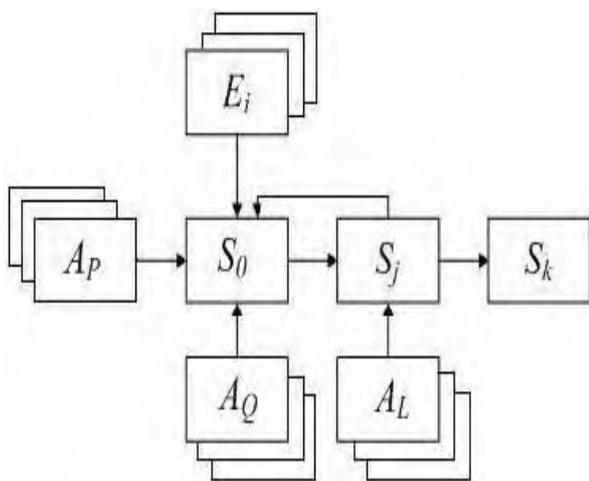


Рис.1. Адаптация концепции ситуационного управления к исследованиям устойчивости

Комментарий к рис.1. $\{S_0\}$ – начальное устойчивое состояние системы (текущая ситуация C); $\{E_i\}$ – i -й сценарий чрезвычайной ситуации (набор сценариев – вектор возмущений F); $\{A\} = \{A_p, A_q, A_l\}$ – набор превентивных, оперативных и ликвидационных мероприятий, нейтрализующих или смягчающих последствия чрезвычайной ситуации (ЧС) (вектор управляющих воздействий U); $\{S_j\}$ – состояние системы после ЧС $\{E_i\}$ с учетом реализации набора мероприятий $\{A_p\}$ и/или $\{A_q\}$ (возможно, устойчивое состояние); $\{S_k\}$ – состояние системы после проведения ликвидационных мер (устойчивое состояние); S_j и S_k могут рассматриваться как аналоги соответствующих целевых ситуаций Gg .

Это позволяет применить в исследованиях устойчивости весь арсенал инструментальных средств семантического моделирования, разработанных ранее для исследования проблем энергетической и экологической безопасности и интегрированных в рамках интеллектуальной ИТ-среды [13].

Качество жизни. Качество жизни мировое научное сообщество понимает, как совокупность объективных и субъективных параметров, характеризующих максимальное количество сторон жизни человека, его положение в обществе и удовлетворенность им. Интегральный показатель качества жизни обобщает показатели здоровья, социального самочувствия, субъективного социального благополучия и благосостояния [14].

Качество жизни дифференцируют от широко используемого понятия «уровень жизни», под которым подразумевается исключительно материальная составляющая. Дж. Форрестер высказывал предположение о том, что уровень и качество жизни находятся в обратной зависимости по отношению один к другому: чем выше уровень жизни, связанный с темпами роста промышленного производства, тем быстрее истощаются минеральные ресурсы, быстрее загрязняется природная среда, выше скученность населения, хуже состояние здоровья людей, больше стрессовых ситуаций, то есть ухудшается качество жизни.

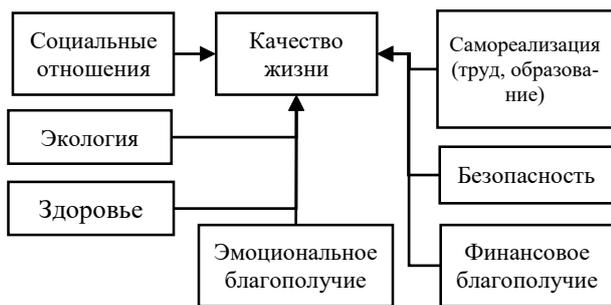


Рис. 2. Составляющие качества жизни согласно определению ВОЗ (Всемирной организации здравоохранения)

Качество жизни определяется не только финансовым благополучием, но еще учитывает состояние защищенности, здоровье, положение человека в обществе и, главное, его собственную оценку всех этих факторов (рис. 2-3). Интегральный показатель качества жизни обобщает показатели здоровья, социального самочувствия, субъективного социального благополучия и благосостояния [14].

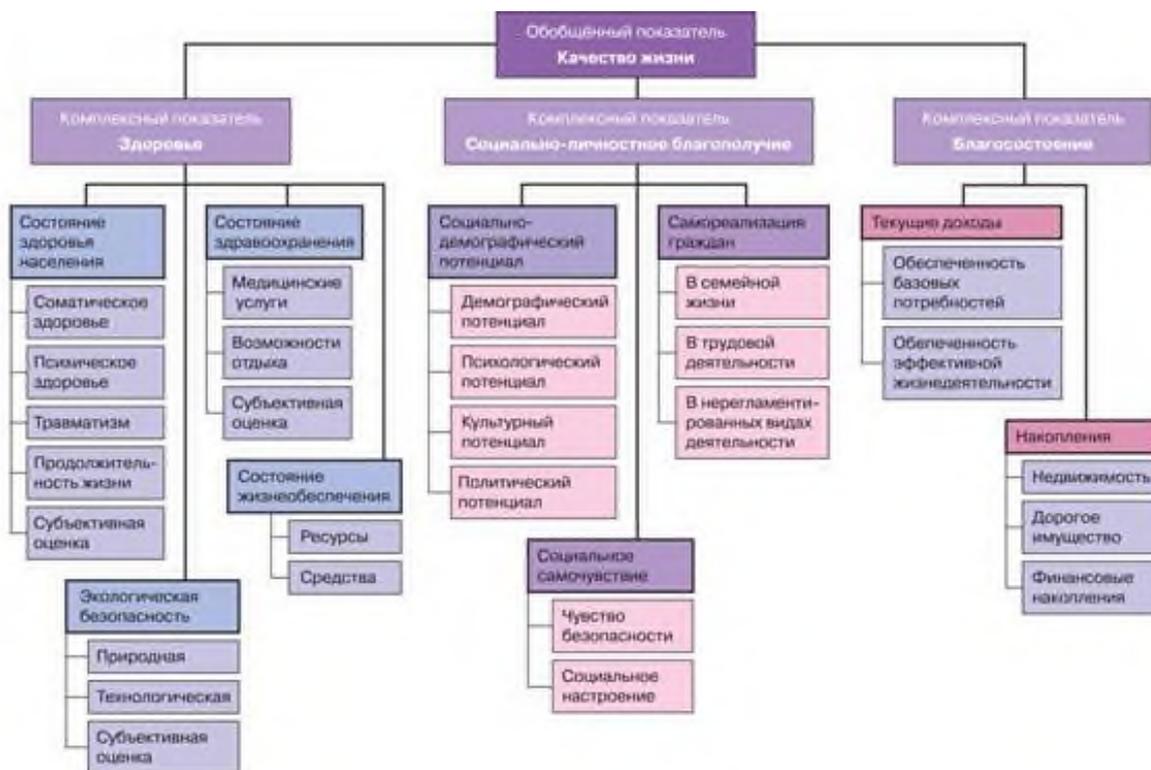


Рис. 3. Структура качества жизни (вариант ВНИИТЭ)

В энергетических исследованиях и качество жизни до последнего времени не учитывалось. Кроме того, население традиционно относилось к категории бытовых потребителей, нужды которых учитывались в последнюю очередь. Развитие такого научного направления, как исследования качества жизни, требует пересмотреть сложившуюся ситуацию и рассматривать качество жизни как категорию, связанную не только со здоровьем, но и с влиянием внешних факторов, в том числе, таких, как обеспеченность населения энергоресурсами, что напрямую связано с проблемой энергетической безопасности.

Поскольку для оценки качества жизни используются объективно-субъективные показатели, для комплексного решения проблемы необходимо привлечение качественных методов системного анализа, в частности, семантического моделирования, которое можно рассматривать совместно с математическим моделированием при наличии количественной информации, необходимой для математических моделей.

Под руководством Л.В. Массель была предложена и развивалась идея использования для интегральной оценки качества жизни когнитивного моделирования [15-16]. Это один из

видов семантического моделирования, основанный на построении когнитивных моделей, описывающих основные концепты моделируемых ситуаций и причинно-следственные связи между концептами. Их графическое отображение называют когнитивными картами. Когнитивное моделирование активно развивается и используется как в нашей стране (например, в Институте проблем управления РАН), так и за рубежом (Groumpos, Stilios и др.) [17-19].

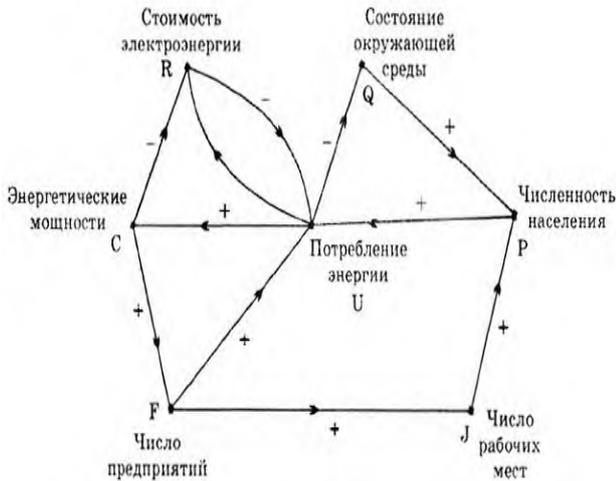


Рис. 4. Карта Робертса-Аксельрода

С помощью разработанного в коллективе, представляемом авторами, инструментального средства когнитивного моделирования CogMap построена когнитивная карта интегральной оценки качества жизни, на основе применяемой социологами методики SF-36, в которую включен внешний фактор «Обеспеченность энергетическими ресурсами»; для его определения сформирована анкета для социального опроса населения (рис. 5) [15-16].

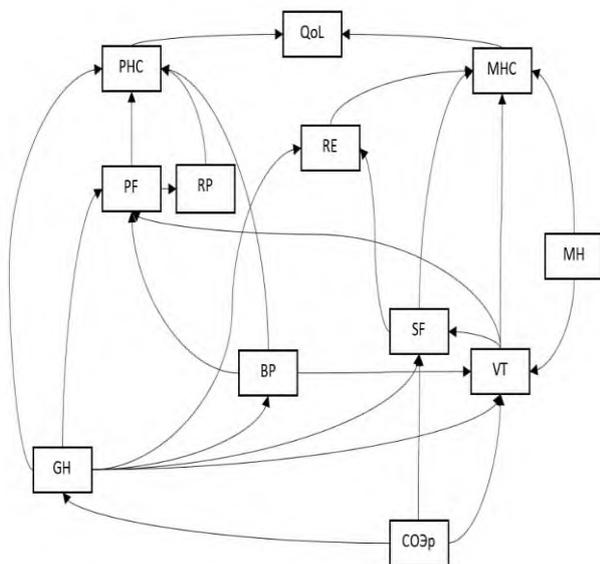


Рис. 5. Когнитивная карта индикаторов качества жизни согласно методике SF-36 (все связи положительные(+))

Одной из первых когнитивных карт, связывающих энергетические, экологические и социальные факторы, можно считать ставшую классической когнитивную карту Робертса-Аксельрода (рис. 4) [20-21].

Она была предложена Робертсом как знаковый оргграф и приведена впоследствии в книге Аксельрода как когнитивная карта, поэтому в ряде источников она приводится как когнитивная карта Аксельрода.

Комментарии к рис. 4:

PF (Physical Functioning) - физическое функционирование; RP (Role-Physical Functioning) – ролевое функционирование, обусловленное физическим состоянием; BP (Bodily pain) – интенсивность боли; GH (General Health) – общее состояние здоровья; VT (Vitality) – жизненная активность; SF (Social Functioning) – социальное функционирование; RE (Role-Emotional) – ролевое функционирование, обусловленное эмоциональным состоянием; MH (Mental Health) – психическое здоровье; PHC (Physical health) – общий компонент физического здоровья; MHC (Mental health) – общий компонент психического здоровья; QoL (Quality of Life) – интегральный показатель качества жизни; COЭр – степень обеспеченности энергетическими ресурсами.

Критерии устойчивости. Для энергетических систем такими критериями могут быть показатели обеспеченности энергоресурсами требуемого качества и в нужном объеме (т.е. количественные критерии – индикаторы энергетической безопасности).

Для экологических систем: в роли количественных критериев устойчивости могут выступать значения ПДК (предельно допустимых концентраций). Качественными критериями могут быть, например, общая и удельная (на человека и ВВП) эмиссия CO₂; тенденция выбросов парниковых газов; эффективность производства и потребления энергии; доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и АЭС и др. Для социальных систем критериями устойчивости могут быть основные показатели качества жизни: состояние экологии, здоровья, социальные отношения, самореализация (труд, образование), безопасность, эмоциональное и финансовое благополучие; обеспеченность энергетическими ресурсами.

При формировании критериев устойчивости для социо-экологических и социально-экономических систем целесообразно учитывать также параметры *ESG* [10].

E-факторы включают: оценку экологической политики компании; влияния деятельности компании на атмосферу; влияние на водную среду; влияние на почву; обращение с утилизацией отходов; использование компанией в своем управлении показателей, для оценки влияния деятельности компании на окружающую среду; наличие в компании плана по снижению негативного влияния на окружающую среду; наличие «зеленых проектов» в кредитном портфеле (рейтинга деятельности банков).

S-факторы включают: оценку политики компании в области корпоративной социальной ответственности; оплату труда сотрудников; социальную защищенность и профессиональное развитие сотрудников; текучесть кадров; охрану труда и производственную безопасность; работу с клиентами; наличие плана по улучшению социально значимых показателей.

G-факторы включают: оценку деловой репутации, стратегию развития, эффективность Совета директоров, деятельность исполнительных органов, наличие системы управления рисками, степень транспарентности (прозрачности) информации, защиту прав собственников [22].

Для нас в плане рассматриваемой постановки задачи важны *E*-факторы и *S*-факторы, которые преимущественно являются качественными. Очевидно, что для описания качественных критериев нужен новый инструментарий, для чего также могут быть использованы инструментальные средства семантического моделирования (когнитивное, событийное и вероятностное) [13].

Инструментальные средства для исследований устойчивости. Как упоминалось выше, адаптация концепции ситуационного управления к исследованиям устойчивости позволяет применить весь спектр инструментальных средств семантического моделирования (онтологического, когнитивного, событийного и вероятностного, на основе Байесовских сетей доверия), а также технологию управления знаниями [23], разработанные ранее для исследования проблем энергетической и экологической безопасности. На рис. 6 приведена разработанная ранее когнитивная карта в нотации инструментального средства когнитивного моделирования *CogMap* [24], которая в исследованиях устойчивости иллюстрирует связь экологических факторов (похолодание), энергетических факторов, влияющих на устойчивость энергетических систем (увеличение потребления энергоресурсов и возникновение их дефицита) и факторов (мероприятий), снижающих вероятность наступления критической ситуации (увеличение выработки теплоэнергии и электроэнергии).

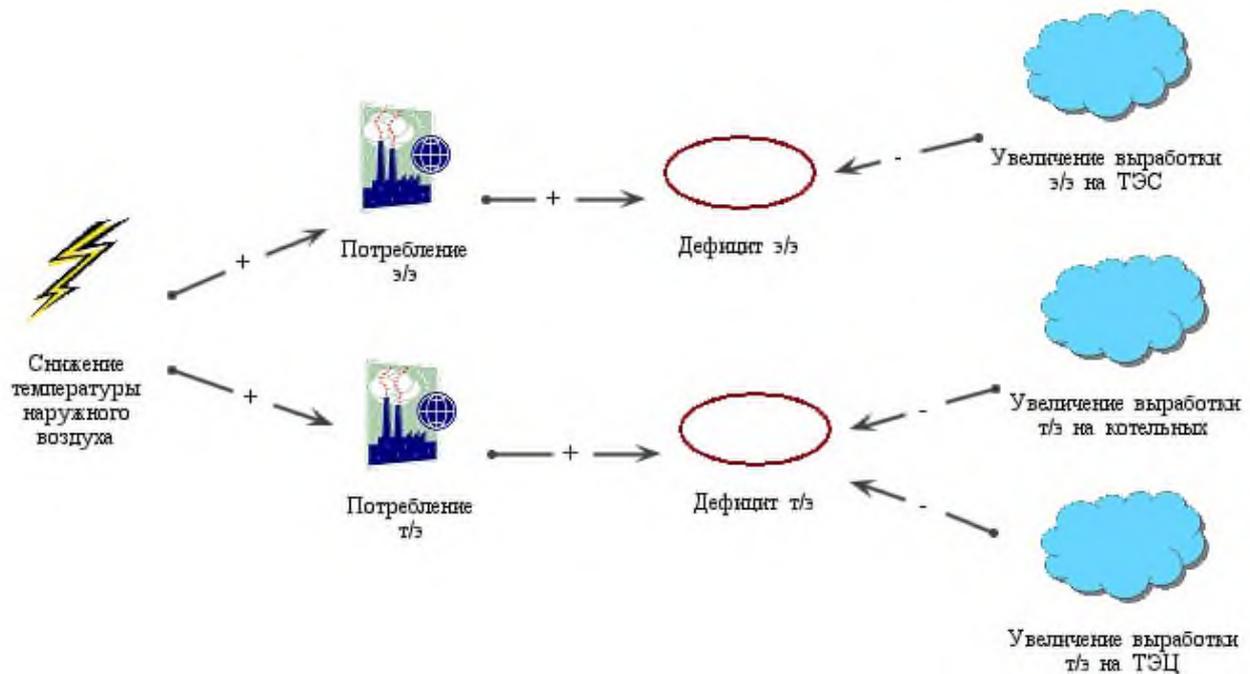


Рис. 6. Когнитивная карта, связывающая экологические и энергетические факторы

Будут применены также инструментальные средства поддержки технологии управления знаниями, обеспечивающие преобразование причинно-следственных отношений когнитивных карт в продукционные правила экспертной системы и последующий их анализ с применением машины вывода экспертной системы [23].

Кроме того, для поддержки исследований устойчивости будут использованы разработанная архитектура [25] и реализованные основные компоненты интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР), включающей четыре уровня: математического моделирования (методы, модели и программы), семантического моделирования (онтологического, когнитивного, событийного и вероятностного (на основе Байесовских сетей доверия)); представления данных и геовизуализации (базы данных и геоинформационные системы) и представления знаний (базы знаний и система онтологий) (в частности, [26]). Основные компоненты ИСППР были применены при выполнении международного проекта «Методы и технологии оценки влияния энергетики на геоэкологию региона», выполненного в 2018-2020 г. при поддержке фондов ЕАПИ-РФФИ совместно с учеными Армении и Беларуси [27, 28].

Заключение. В статье представлена постановка задачи интеграции исследований устойчивости энергетических, социо-экологических и социо-экономических систем с использованием качества жизни как фактора интеграции. Определены основные понятия, проиллюстрирована адаптация концепции ситуационного управления к этим исследованиям. Введены критерии устойчивости энергетических, социальных и экологических систем. Показаны примеры применения когнитивного моделирования индикаторов качества жизни и взаимосвязи энергетических, экологических и социальных факторов, рассмотрены возможности адаптации и применения разработанных ранее инструментальных средств для исследований устойчивости.

В настоящее время исследования выполняются в отделе «Системы искусственного интеллекта в энергетике», в рамках проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН №АААА-17-117030310444, при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант №19-07-00351, грант № 20-07-00195.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Массель Л.В., Комендантова Н.П. Оценка рисков природных и техногенных угроз устойчивости энергетических, экологических и социальных систем на основе интеллектуальных информационных технологий // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 31-45.
2. Массель Л.В., Массель А.Г., Комендантова Н.П. Подход к исследованиям устойчивости энергетических и экологических систем на основе интеллектуальных информационных технологий / Труды Международной научной конференции «Устойчивое развитие энергетики республики Беларусь: состояние и перспективы». Минск: Беларус. Навука. 2020. ISBN 978-985-08-2654-1. С. 33-43.
3. Davoudi, S. Resilience: A Bridging Concept or a Dead End / Planning Theory and Practice. – 2012. № 13 (2). Pp. 299-307.
4. Holling, C. Engineering Resilience Versus Ecological Resilience / Engineering Within Ecological Constraints. Ed.: Peter Schultz, National Academy Press. Washington D.C.. 1996. Pp. 31-43.
5. Cen Nan, Sansavini G., Kroeger W. Building an integrated metric for quantifying the resilience of interdependent infrastructure systems // 9th Intern. Conf. on Critical Information Infrastructure Security. Limassol. Cyprus. October 13-15. 2014. 12 p.
6. Cimellaro G., Reinhorn A. & Bruneau M. Seismic resilience of a hospital system, Structure and Infrastructure Engineering 6 (1-2). 2010. Pp. 127-144.
7. Yezhou Wang, Chen Chen, Jianhui Wang, Baldick R. Research on resilience of power systems under natural disasters – A review // IEEE Trans. Power Syst. 2016. Vol. 31. № 2. Pp. 1604–1612.
8. Zhonglin Wang, Nistor M.S., Pickl S.W. Analysis of the definitions of resilience // 20th IFAC World Congress. Toulouse. France. July 9-14. 2017. Pp. 11136-11144.
9. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути их решения / Н.И. Пяткова и др. Отв. ред. Н.И. Воропай, М.Б. Чельцов. ИСЭМ СО РАН. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2011. 198 с.
10. Environmental, social and governance (ESG) scores from refinitiv. Режим доступа: https://www.refinitiv.ru/content/dam/marketing/en_us/documents/methodology/esg-scores-methodology.pdf (дата обращения: 14.10.2021).
11. Поспелов Д.А. Ситуационное управление. Теория и практика. М. Наука. 1986. 284 с.
12. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. М. Радиотехника. 2009. 392 с.
13. Массель Л.В., Массель А.Г. Технологии и инструментальные средства интеллектуальной поддержки принятия решений в экстремальных ситуациях в энергетике // Вычислительные технологии. 2013. Т.18. С. 37-44.
14. Финогенко И.А., Дьякович М.П., Блохин А.А. Методология оценивания качества жизни, связанного со здоровьем // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. Т. 21. №. 1. 2016. С. 121-130.
15. Массель Л.В., Блохин А.А. Когнитивное моделирование индикаторов качества жизни: предлагаемый подход и пример использования // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. Т.14. №2. 2016. С. 72-79.
16. Массель Л.В., Блохин А.А. Метод когнитивного моделирования индикаторов качества жизни с учетом внешних факторов // Наука и образование. Научное издание МГТУ им. Баумана. №4. 2016. С. 65-75. DOI: 10.7463/0416.0839061.

17. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. М.:СИНТЕГ. 1998. 376 с.
18. Groumpos Peter P. Intelligence and fuzzy cognitive maps: scientific issues, challenges and opportunities // *Studies in Informatics and Control*. 2018. Vol. 27(3). Pp . 247-264. <https://doi.org/10.24846/v27i3y201801>.
19. Stylios C.D., Bourgani E., Georgopoulos V.C. Impact and Applications of Fuzzy Cognitive Map Methodologies // *Beyond Traditional Probabilistic Data Processing Techniques: Interval, Fuzzy etc. Methods and Their Applications*. *Studies in Computational Intelligence*. Vol 835. Springer, Cham, pp. 229-246. DOI: 10.1007/978-3-030-31041-7_13.
20. Roberts Fred S. *Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological, and Environmental Problems*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall. 1976. 559 p.
21. Axelrod R. *Structure of Decision: The Cognitive Maps of Political Elites*. Princeton: Princeton University Press. 1976. 422 p.
22. Соболева О.В., Стешенко А.С. «ESG-факторы» как новый механизм активизации ответственного инвестирования и достижения целей устойчивого развития / *Устойчивое развитие: вызовы и возможности* // Сб. научн. статей под ред. канд. экон. наук Е.В. Викторовой. СПб. : Изд-во СПбГЭУ. 2020. С. 246-255.
23. Массель Л.В., Массель А.Г., Пестерев Д.В. Технология управления знаниями с использованием онтологий, когнитивных моделей и продукционных экспертных систем. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2019. №4. С. 140-152.
24. Массель А.Г., Пяткова Е.В. Интеллектуальные информационные технологии для исследований проблем энергетической безопасности / *Труды Всероссийского семинара с международным участием «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики»: Вып.64. Надежность систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы*. ISBN 978-5-93908-115-3. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2014. С. 472-483.
25. Массель Л.В. Проблема оценки влияния энергетики на геоэкологию региона: постановка и пути решения / *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2018. №2. С. 5-21.
26. Кузьмин В.Р. Разработка информационной подсистемы для расчёта и визуализации вредных выбросов от объектов энергетики. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2020. № 1 (17). С. 142-154.
27. Массель Л.В., Массель А.Г. Интеллектуальная поддержка принятия решений по оценке влияния энергетики на геоэкологию с учетом качества жизни / *Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2019»*. Научное изд. В 2-х т. Т.1. Таганрог: Изд-во Ступина. 2019. С. 207-216.
28. L.V. Massel, T.G. Zorina, A.G. Massel. Methodological Approaches to Modeling the Assessment of the Impact of Energy on Geo-Ecology and Quality of Life (on the Example of the Russian and Belarusian Regions) // *Energy Systems Research*. 2019. Vol. 2. № 3. Pp. 63-72.

UDK 004.8: (620.9 + 504.03)

**QUALITY OF LIFE AS A FACTOR FOR INTEGRATION
OF RESILIENCE RESEARCH OF ENERGY, SOCIO-ECOLOGICAL
AND SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS**

Liudmila V. Massel

Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher,
Head of Department "Artificial Intelligence Systems in Energy",
e-mail: lvmassel@gmail.com

Dmitry V. Pesterev

Senior Engineer of the Department "Artificial Intelligence Systems in Energy",
e-mail: pesterev.dmitriy@gmail.com
Melentiev Energy Systems Institute (MESI) of SB RAS
664033 Irkutsk, Lermontov, 130.

Abstract. The concept of resilience and related concepts of energy and environmental safety are considered. It is proposed to use the quality of life as a integration factor of resilience research of energy, socio-ecological and socio-economic systems. Criteria for the resilience of energy, ecological and social systems are introduced. Cognitive modeling is seen as one of the main tools in resilience research. Examples of cognitive modeling are given.

Keywords: resilience, energy, socio-ecological and socio-economic systems, quality of life, cognitive modeling.

Acknowledgments: The research is carried out within the framework of the project under the state order of the MESI SB RAS № AAAA-17-117030310444, with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research, grant № 19-07-00351, № 20-07-00195.

REFERENCES

1. Massel L.V., Komendantova N.P. Ocenka riskov prirodnyh i tehnogennyh ugroz ustojchivosti jenergeticheskikh, jekologicheskikh i social'nyh sistem na osnove intellektual'nyh informacionnyh tehnologij [Risk assessment of natural and man-made threats to the resilience of energy, ecological and social systems based on intelligent information technologies] // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and Mathematical Technologies in Science and Management. 2019. № 4 (16). Pp. 31-45 (in Russian)
2. Massel L.V., Massel A.G., Komendantova N.P. Podhod k issledovanijam ustojchivosti jenergeticheskikh i jekologicheskikh sistem na osnove intellektual'nyh informacionnyh tehnologij [An approach to research on the sustainability of energy and ecological systems based on intelligent information technologies] // Trudy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Ustojchivoje razvitie jenergetiki respubliky Belarus': sostojanie i perspektivy». Minsk: Belarus. Navuka = Proceedings of the International Scientific Conference "Sustainable Development of the Energy Industry of the Belarus Republic: State and Prospects". Minsk: Belarus. Science. 2020. ISBN 978-985-08-2654-1. Pp. 33-43 (in Russian)
3. Davoudi, S. Resilience: A Bridging Concept or a Dead End / Planning Theory and Practice. 2012. № 13 (2). Pp. 299-307.
4. Holling, C. Engineering Resilience Versus Ecological Resilience / Engineering Within Ecological Constraints. Ed.: Peter Schultz, National Academy Press, Washington D.C.. 1996. Pp. 31-43.

5. Cen Nan, Sansavini G., Kroeger W. Building an integrated metric for quantifying the resilience of interdependent infrastructure systems // 9th Intern. Conf. on Critical Information Infrastructure Security. Limassol. Cyprus. October 13-15. 2014. 12 p.
6. Cimellaro G., Reinhorn A. & Bruneau M. Seismic resilience of a hospital system, Structure and Infrastructure Engineering 6 (1-2). 2010. Pp. 127-144.
7. Yezhou Wang, Chen Chen, Jianhui Wang, Baldick R. Research on resilience of power systems under natural disasters – A review // IEEE Trans. Power Syst. 2016. Vol. 31. № 2. Pp. 1604-1612.
8. Zhonglin Wang, Nistor M.S., Pickl S.W. Analysis of the definitions of resilience // 20th IFAC World Congress. Toulouse. France. July 9-14. 2017. Pp. 11136-11144.
9. Jenergeticheskaja bezopasnost' Rossii: problemy i puti ih reshenija [Energy security of Russia: problems and solutions] / N.I. Pjatkova i dr. Otv. red. N.I. Voropaj, M.B. Chel'cov. = N.I. Pyatkova et al. Ed. N.I. Voropaj, M.B. Cheltsov. MESI SB RAS. Novosibirsk. Izd-vo SO RAN = Publishing House of the SB RAS. 2011. 198 p. (in Russian)
10. Environmental, social and governance (ESG) scores from refinitiv. Available at: https://www.refinitiv.ru/content/dam/marketing/en_us/documents/methodology/esg-scores-methodology.pdf (accessed 14.10.2021).
11. Pospelov D.A. Situacionnoe upravlenie. Teorija i praktika [Contingency management. Theory and practice]. M. Nauka. = Moscow. Science. 1986. 284 p. (in Russian)
12. Vasil'ev V.I., Il'jasov B.G. Intellektual'nye sistemy upravlenija. Teorija i praktika [Intelligent management systems. Theory and practice]. M. 2009. 392 p. (in Russian)
13. Massel L.V., Massel A.G. Tehnologii i instrumental'nye sredstva intellektual'noj podderzhki prinjatija reshenij v jekstremal'nyh situacijah v jenergetike [Technologies and tools of intelligent decision-making support of in emergencies in the energy sector] // Vychislitel'nye tehnologii = Computational technologies. 2013. T.18. Pp. 37-44 (in Russian)
14. Finogenko I.A., D'jakovich M.P., Blohin A.A. Metodologija ocenivanija kachestva zhizni, svjazannogo so zdorov'em [Methodology for assessing the quality of life associated with health] // Vestnik Tambovskogo universiteta. Serija: Estestvennye i tehniczeskie nauki = Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences. 2016. Vol. 21. №. 1. Pp. 121-130 (in Russian)
15. Massel' L.V., Blohin A.A. Kognitivnoe modelirovanie indikatorov kachestva zhizni: predlagaemyj podhod i primer ispol'zovanija [Cognitive modeling of indicators of quality of life: the proposed approach and example of use] // Vestnik NGU. Serija: Informacionnye tehnologii = Bulletin of NSU. Series: Information Technology. 2016. Vol.14. № 2. Pp. 72-79 (in Russian)
16. Massel' L.V., Blohin A.A. Metod kognitivnogo modelirovanija indikatorov kachestva zhizni s uchetom vneshnih faktorov [The method of cognitive modeling of quality of life indicators taking into account external factors] // Nauka i obrazovanie. Nauchnoe izdanie MGTU im. Baumana = Science and Education. Scientific publication of MSTU Bauman. 2016. № 4. Pp. 65-75. DOI: 10.7463/0416.0839061 (in Russian)
17. Trahtengerc E.A. Komp'juternaja podderzhka prinjatija reshenij [Computer support of decision-making]. M.:SINTEG. 1998. 376 p. (in Russian)
18. Groumpos Peter P. Intelligence and fuzzy cognitive maps: scientific issues, challenges and opportunities // Studies in Informatics and Control. 2018. Vol. 27(3). Pp. 247-264. DOI: 10.24846/v27i3y201801.
19. Stylios C.D., Bourgani E., Georgopoulos V.C. Impact and Applications of Fuzzy Cognitive Map Methodologies // Beyond Traditional Probabilistic Data Processing Techniques: Interval, Fuzzy etc. Methods and Their Applications. Studies in Computational Intelligence, vol 835. Springer, Cham, pp. 229-246. DOI: 10.1007/978-3-030-31041-7_13.

20. Roberts Fred S. Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological, and Environmental Problems. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall. 1976. 559 p.
21. Axelrod R. Structure of Decision: The Cognitive Maps of Political Elites. Princeton: Princeton University Press. 1976. 422 p.
22. Soboleva O.V., Steshenko A.S. «ESG-factory» kak novyj mekhanizm aktivizacii otvetstvennogo investirovaniya i dostizheniya celej ustojchivogo razvitiya [ESG Factors as a New Mechanism to Promote Responsible Investment and Achieve Sustainable Development Goals] / Ustojchivoe razvitie: vyzovy i vozmozhnosti = Sustainable Development: Challenges and Opportunities // Sb. nauchn. statej pod red. kand. ekon. nauk E.V. Viktorovoj. = Sat. scientific. articles ed. Cand. econom. Sciences E.V. Viktorova. SPb.: Publishing house of UNECON 2020. Pp. 246 -255 (in Russian)
23. Massel' L.V., Massel A.G., Pesterev D.V. Tekhnologiya upravleniya znaniyami s ispol'zovaniem ontologij, kognitivnyh modelej i produkcionnyh ekspertnyh sistem [Usage management technology using ontologies, cognitive models and production expert systems] // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering sciences. 2019. №4. Pp. 140-152 (in Russian)
24. Massel A. G., Piatkova E. V. Intellektual'nye informacionnye tekhnologii dlya issledovanij problem energeticheskoj bezopasnosti. [Intelligent Information Technologies for Research on Energy Security Problems] // Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem v energetike = Methodological issues of research on the reliability of large systems in the energy sector. Irkutsk: Institut sistem energetiki im. L. A. Melenteva SO RAN= Irkutsk: L. A. Melentyev Institute of Energy Systems SB RAS. ISBN 978-5-93908-115-3. 2014. Pp. 472-483. (in Russian)
25. Massel' L.V. Problema otsenki vliyaniya energetiki na geoekologiyu regiona: postanovka i puti resheniya [The problem of assessing the impact of energy on the regional geo-ecology: formulation and solutions] // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2018. №2 (10). Pp. 5-21. DOI:10.25729/2413-0133-2018-2-01 (in Russian)
26. Kuzmin V.R. Razrabotka informacionnoj podsistemy dlya raschyota i vizualizacii vrednyh vybrosov ot ob"ektov energetiki [Development of an information subsystem for calculating and visualizing harmful emissions from energy facilities] // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2020. № 1 (17). Pp. 142-154. DOI: 10.38028/ESI.2020.17.1.011 (in Russian)
27. Massel' L.V., Massel A.G. Intellektual'naya podderzhka prinyatiya reshenij po ocenke vliyaniya energetiki na geoekologiyu s uchetom kachestva zhizni [Intellectual support for decision-making on assessing the impact of energy on geoecology, taking into account the quality of life] // Trudy Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa «Intellektual'nye sistemy i informacionnye tekhnologii – 2019» = Proceedings of the International Scientific and Technical Congress «Intelligent Systems and Information Technologies - 2019». Taganrog: Stupin Publishing House. 2019. Pp. 207-216. (in Russian)
28. L.V. Massel, T.G. Zorina, A.G. Massel. Methodological Approaches to Modeling the Assessment of the Impact of Energy on Geo-Ecology and Quality of Life (on the Example of the Russian and Belarusian Regions) / Energy Systems Research. 2019. Vol. 2. № 3. Pp. 63-72.

Статья поступила в редакцию 14.10.2021; одобрена после рецензирования 22.10.2021; принята к публикации 26.10.2021.

The article was submitted 14.10.2021; approved after reviewing 22.10.2021; accepted for publication 26.10.2021.

УДК 004.822: (620.9+504.05)

КОМПОНЕНТЫ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА ЗНАНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГЕТИКИ НА КАЧЕСТВО ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ

Ворожцова Татьяна Николаевна

к.т.н., вед. инженер отдела систем искусственного интеллекта в энергетике,
e-mail: tnn@isem.irk.ru

Иванова Ирина Юрьевна

к.э.н., зав. лабораторией энергоснабжения децентрализованных потребителей,
e-mail: nord@isem.irk.ru

Майсюк Елена Петровна

к.э.н., с.н.с. лаборатории энергоснабжения децентрализованных потребителей,
e-mail: maysyuk@isem.irk.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск
Иркутск, Лермонтова, 130.

Аннотация. В работе рассматривается онтологический подход к интеграции знаний для поддержки междисциплинарных исследований в области энергетики и экологии с точки зрения оценки качества жизни, предполагающих интеграцию экологической и социальной составляющих. Экологическая составляющая определяется природно-климатическими условиями и состоянием элементов природной среды конкретной территории. Социальная - подразумевает обеспечение потребностей населения в электрической и тепловой энергии, необходимых для комфортного проживания. Для сопоставления положительного и отрицательного влияния функционирования объектов энергетики на население рассматриваются индикаторы качества жизни, как способ оценки этого влияния. Использование онтологического подхода обеспечивает наглядное представление и интеграцию знаний разных предметных областей. Представлены онтологии, детализирующие базовые понятия предметной области исследований антропогенного влияния объектов энергетики, качества жизни и отражающие их интеграцию в едином онтологическом пространстве знаний.

Ключевые слова: онтологический подход, антропогенное воздействие, качество жизни, энергетика, природная среда, экология.

Цитирование: Ворожцова Т.Н., Майсюк Е.П., Иванова И.Ю. Компоненты онтологического пространства знаний для оценки влияния энергетики на качество жизни населения // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3 (23). С. 17-27.
DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.002.

Введение. В рамках проекта, выполняемого при поддержке гранта РФФИ № 20-07-00195 «Методы построения онтологического пространства знаний для интеллектуальной поддержки принятия решений в энергетике и экологии с учетом качества жизни» в ИСЭМ СО РАН проводятся исследования антропогенного влияния функционирования объектов энергетики на природную среду и человека с использованием семантических методов, в частности, онтологического и когнитивного моделирования, как элементов такой интеллектуальной поддержки. Для этих целей разрабатывается онтологическое пространство знаний, представляющее собой систему взаимосвязанных онтологий, обеспечивающих интеграцию знаний разных предметных областей. Основными компонентами онтологического пространства знаний являются онтологии энергетики и экологии, отражающие основные взаимосвязи предметных областей исследований. Для учета требований к функционированию объектов энергетики, связанных с необходимостью сохранения природной среды и условий проживания населения, предложено использовать понятие «качество жизни». Онтологический подход к описанию знаний позволяет представить требуемые компоненты знаний разных пред-

метных областей в формализованном виде с целью установления основных взаимосвязей и согласования методологического и информационного обеспечения.

1. Структура онтологического пространства знаний. Онтологическое пространство знаний включает совокупность разрабатываемых взаимосвязанных онтологий, обеспечивающих согласование терминологии предметных областей, интеграцию пересекающихся областей знаний и структурирование знаний для выполнения исследований [1]. Для изучения, оценки и анализа антропогенного влияния энергетики на природную среду и качество жизни населения необходимы в первую очередь знания о предметных областях энергетики и экологии. Понятие «качество жизни» используется нами для учета требований к функционированию объектов энергетики, связанных с условиями проживания населения и необходимостью сохранения природной среды для нынешних и будущих поколений. Таким образом, основными компонентами онтологического пространства знаний для выполняемых исследований являются онтологии, отражающие взаимосвязи некоторых понятий из областей энергетики, экологии и качества жизни.

Структура онтологического пространства знаний базируется на фрактальном подходе, предполагающем наличие метауровней для каждого из разделов и их дальнейшее расслоение и детализацию на каждом следующем уровне [2].

Метаонтологии содержат описания базовых понятий соответствующих предметных областей, имеющих отношение к междисциплинарным исследованиям. Такими базовыми понятиями являются «Энергетика», «Экология», «Качество жизни». Онтологии, детализирующие описание разделов исследований на следующих уровнях – это описание объектов, ресурсов, производственных процессов в разделе энергетики, описание элементов природной среды, антропогенных факторов в разделе экологии, а также описание факторов влияния и индикаторов качества жизни. Связующими элементами этих разделов онтологического пространства являются базовые понятия «антропогенный фактор», создаваемый объектами энергетики, и «элемент природной среды», на который влияет антропогенный фактор и от которого зависит качество жизни. Базовые понятия метаонтологии формулируются следующим образом:

Энергетика – область народного хозяйства, науки и техники, охватывающая энергетические ресурсы, производство, передачу, преобразование, аккумулирование, распределение и потребление различных видов энергии [3]. Энергетика на производственно-техническом уровне – это комплекс взаимосвязанных систем, состоящих из совокупности предприятий и установок получения, переработки, преобразования, транспорта, хранения и использования в народном хозяйстве энергетических ресурсов всех видов [4].

Экология – комплексная наука, которая исследует среду обитания живых существ и их взаимодействие [5]; дисциплина, изучающая общие законы функционирования экосистем различного иерархического уровня, в том числе структуру и функционирование систем надорганизменного уровня (популяции, сообщества, экосистемы) в пространстве и времени в естественных и изменённых человеком условиях. Данное определение в большей степени отражает современную тенденцию изучать последствия влияния производственной и другой деятельности человека на окружающую среду.

Качество жизни – совокупная характеристика уровня объективных и субъективных условий жизни населения, определяющих физическое, ментальное, социально-культурное развитие человека, группы или сообщества людей [6]. Согласно Н.Ф. Реймерсу [5] – это совокупность условий, обеспечивающих (или не обеспечивающих) соответствие среды жизни человека его потребностям и социально-психологическим установкам личности, интегрально отражаемое средней продолжительностью жизни, мерой здоровья людей и уровнем их заболеваемости (физической и психической), стандартизованных для данной группы населения.

Антропогенный фактор – это фактор, косвенно обязанный своим происхождением деятельности человека (планируемой или случайной, настоящей или прошлой) [5], причина воздействия этой деятельности на природную среду, обусловленная процессом и условиями функционирования объекта, его характерными особенностями [7].

Природная среда – совокупность природных и незначительно измененных деятельностью людей естественных факторов, оказывающих влияние на человека. Обладает свойством самоподдержания и саморегуляции без корректирующего воздействия человека [5].

Антропогенное влияние энергетики на природную среду является одним из наиболее серьезных, оно проявляется на всех стадиях производства энергии и приводит к загрязнению всех элементов природной среды – атмосферы, водных объектов, почвы (непосредственное влияние). Кроме этого, осуществляется опосредованное влияние на растительный, животный мир и человека (рисунок 1).

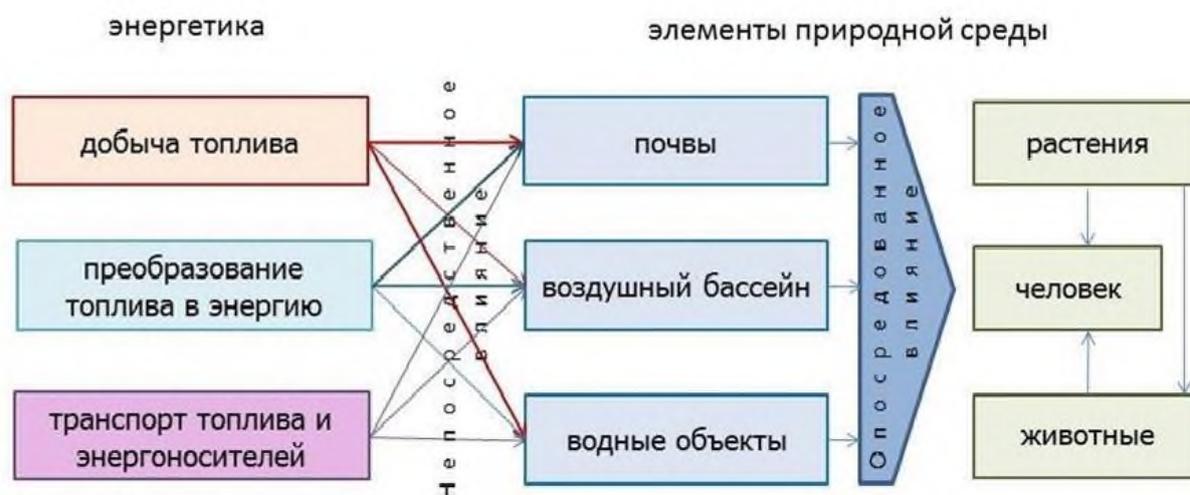


Рис. 1. Общая схема влияния энергетики на природную среду

Добыча энергоресурсов оказывает наибольшее и непосредственное воздействие на почвы и водные объекты. Это связано с изъятием значительных территорий при добыче нефти, природного газа и угля, особенно открытым способом, и со складированием хвостовых и шламовых отходов. В водные объекты, как правило, поступают неочищенные ливневые и шламовые воды. Преобразование топлива в электрическую и/или тепловую энергию характеризуется наибольшим воздействием на воздушный бассейн (атмосферу) и почвы. В атмосферу поступают загрязняющие вещества I, III и IV классов опасности, а на почвах в значительных количествах размещаются золошлаковые отходы от сжигания угля. Транспорт энергоресурсов на каждом этапе от добычи топлива до поступления к потребителю электрической и тепловой энергии оказывает непосредственное и незначительное воздействие на каждый элемент природной среды.

В ранее выполненных исследованиях дано подробное описание и представлена онтология понятия «антропогенный фактор», тип и свойства которого зависят от типа энергетического объекта, вида топлива и технологии его сжигания [8]. Для более детального исследования антропогенного влияния объектов энергетики на элементы природной среды предлагается систематизировать взаимосвязанные понятия «антропогенное воздействие», «антропогенное загрязнение» и «антропогенное последствие», которые определяются следующим образом:

- **антропогенное воздействие** – следствие антропогенного фактора, процесс влияния хозяйственной или иной деятельности человека на элементы природной среды;

- **антропогенное загрязнение** – результат изменения элементов природной среды, вызванный антропогенным воздействием;
- **антропогенное последствие** – результат антропогенного загрязнения, характеризующий степень изменения в элементах природной среды.

Такая детализация дает возможность классифицировать типы, свойства и количественную меру этих понятий в соответствии с существующими методическими подходами для оценки антропогенного воздействия.

2. Экологическая и социальная составляющие исследований антропогенного влияния энергетики. Эти комплексные исследования предполагают интеграцию экологической и социальной составляющих при оценке влияния энергетики на качество жизни населения.

Экологическая составляющая исследований определяется состоянием элементов природной среды конкретной территории, на которую осуществляется антропогенное влияние, и природно-климатическими условиями этой территории. Проанализирован состав загрязняющих веществ от объектов энергетики, поступающих в различные элементы природной среды, класс опасности этих веществ и тип их воздействия. Результаты анализа показаны в таблице 1.

Таблица 1. Воздействие загрязняющих веществ от объектов энергетики

Элемент природной среды	Загрязняющее вещество	Класс опасности	Тип воздействия								
			Х	Б	К	Т	Н	Д	С	Другое	
Атмосфера Почвы	пыль неорганическая	III	+								физическое
Атмосфера	бенз(а)пирен сажа	I III	+	+	+	+	+	+	+	+	
Атмосфера Водные объекты	диоксид серы оксиды азота	III III	+	+		+	+	+	+	+	фотохимическое
Атмосфера	диоксид углерода	IV	+	+							парниковый эффект
Водные объекты	нефтепродукты Подогретые воды	III -	+	+		+	+	+			тепловое
Почвы	золашлаковые отходы	IV	+	+							физическое эстетическое

Примечание: Х – химическое, Б – биологическое, К – канцероген, Т – токсикант, Н – способное накапливаться, Д – долгоживущее, С – синергетик

Антропогенное воздействие определяется антропогенной нагрузкой, которая зависит от состава загрязняющих веществ, их класса опасности и физико-химических свойств. Кроме того, на уровень антропогенной нагрузки оказывают влияние климатические, орографические и фоновые условия территории, в которые поступают загрязняющие вещества.

Класс опасности – условная величина вредного воздействия, предназначенная для упрощенной классификации потенциально опасных веществ. Признаки определения класса опасности установлены стандартом [9]. Согласно ГОСТ, вредным является такое вещество, которое при контакте с организмом человека в случае нарушения требований безопасности может вызвать производственные травмы, профессиональные заболевания или отклонения в состоянии здоровья, обнаруживаемые современными методами как в процессе работы, так и в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений [10].

Социальная составляющая рассматривается в двух аспектах. Во-первых, подразумевается обеспечение потребностей населения в электрической и тепловой энергии, необходимых для комфортного проживания. Во-вторых, функционирование объектов энергетики не должно отрицательным образом влиять на здоровье населения, проживающего на соответствующей территории.

Эти аспекты являются важными индикаторами качества жизни [11]. Зарубежные исследователи рассматривают понятие «качество жизни» как совокупность объективных и субъективных параметров, которая характеризует разные аспекты жизни человека, его удовлетворенность положением в обществе, финансовое благополучие, здоровье, социальное благополучие и другие [12-14]. Наиболее часто качество жизни характеризуют по показателям здравоохранения, образования, демографии, экономических условий, экологической обстановки, условий жизни, занятости и реализации конституционных прав [15-17].

3. Компоненты онтологического пространства знаний. Ранее в работе [8] была представлена метаонтология понятий, связанных с влиянием энергетики на природную среду, включающая энергетический объект, энергетический ресурс, элемент природной среды, а также, антропогенный фактор, антропогенное воздействие, антропогенное загрязнение и антропогенное последствие. В результате их более детального рассмотрения по правилам онтологического инжиниринга предлагается систематизировать характеристики этих базовых понятий. Каждое из них имеет тип, свойство и количественную меру, что представлено в графическом виде на рисунке 2.

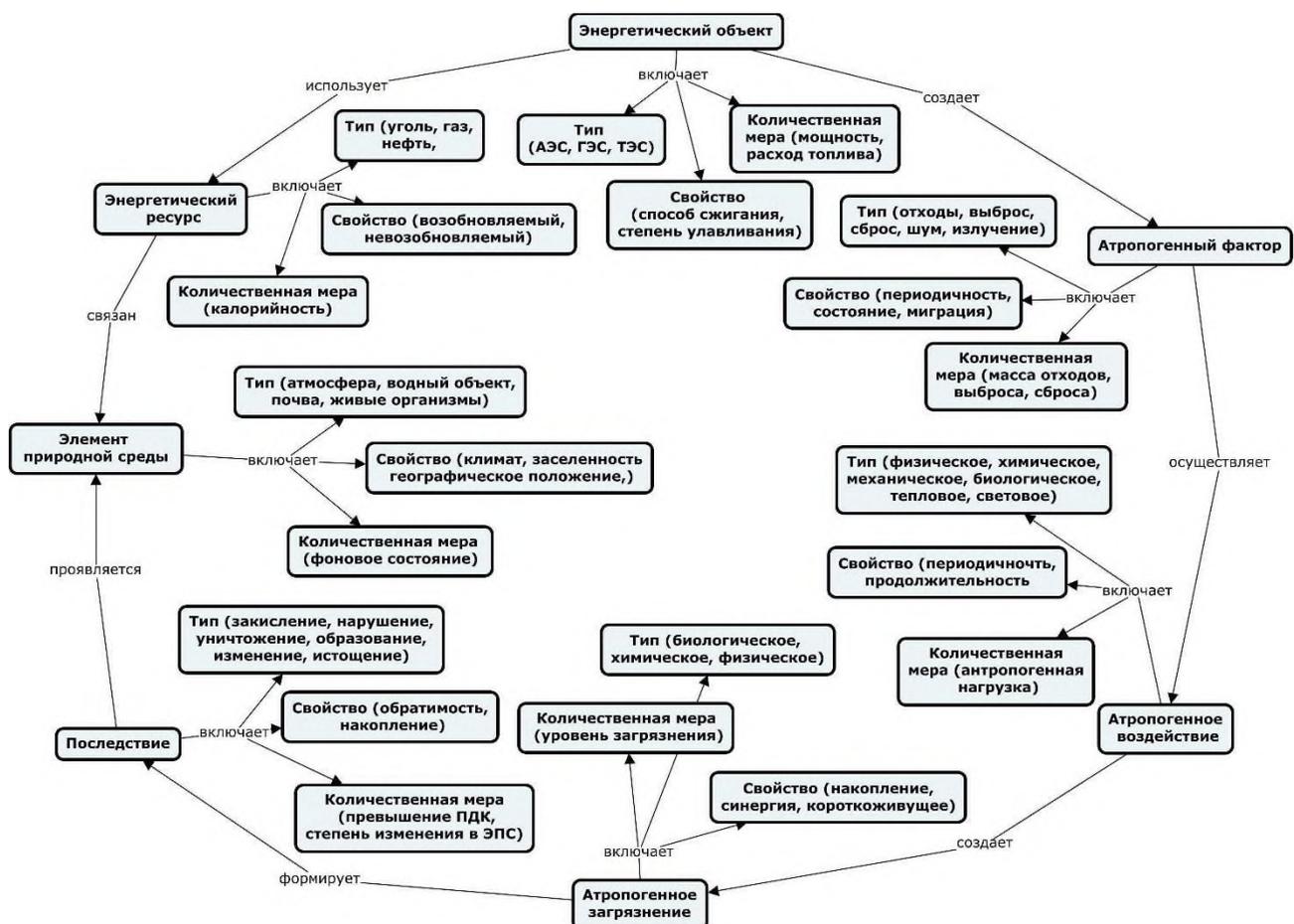


Рис. 2. Метаонтология антропогенного влияния объектов энергетики

Именно эти характеристики дают возможность установить зависимости между базовыми понятиями метаонтологии. В частности, тип энергетического объекта связан, с одной

стороны, с определенным типом используемого энергетического ресурса и, с другой стороны, влияет на тип создаваемого антропогенного фактора. От свойств энергетических объектов, описывающих их технические и технологические особенности (способ сжигания или степень очистки), и количественной меры (мощность, расход топлива) зависят тип и масса производимых отходов, выбросов, сбросов соответственно. От типа антропогенного фактора и его количественной меры зависят тип антропогенного воздействия, характер и величина антропогенной нагрузки. Далее, от типа антропогенного воздействия (физическое, химическое и др.) и его свойств (продолжительность или периодичность) зависят тип, свойство и количественная мера (уровень) антропогенного загрязнения. В свою очередь, уровень антропогенного загрязнения, его тип и свойства влияют на тип, свойства и количественную меру формирующегося последствия антропогенного влияния энергетических объектов на элементы природной среды.

Приведенная систематизация не полностью отражает все сложные взаимосвязи между рассматриваемыми понятиями. Для более детальной оценки антропогенного влияния энергетического объекта на конкретной территории необходимо на следующем уровне онтологического пространства знаний рассматривать взаимосвязи между характеристиками этого конкретного объекта и соответствующими характеристиками всех остальных компонентов представленной онтологии. Предлагаемая онтология отражает структуру знаний, необходимых для оценки экологической составляющей исследований.

4. Энергетика и качество жизни населения. Для сопоставления положительного и отрицательного влияния функционирования объектов энергетики на население и природную среду рассматриваются индикаторы качества жизни, как способ оценки этого влияния. Качество жизни – это междисциплинарное понятие, отражающее множество аспектов жизнедеятельности человека. Исследование качества жизни проводится учеными в разных странах мира, несмотря на то, что не существует однозначного определения данного понятия. По определению Всемирной организации здравоохранения оно включает уровень физического, социального, культурного развития и характеризуется показателями здоровья, образования, экономических условий, экологической обстановки, условий жизни и т.п. [18]. Показатели для оценки качества жизни зависят от научного направления исследований. В экономике делается акцент на степень удовлетворения основных материальных потребностей человека, уровень его развития, степень обеспечения безопасности и др. В социологии исследуются культурные потребности, доступность образования, качество обслуживания и тому подобное. В медицине оцениваются качество услуг здравоохранения и показатели здоровья населения. В экологии наиболее важным является уровень загрязнения и связанные с ним последствия, характеризующие качество элементов природной среды.

Существует множество методик для оценки качества жизни, таких, как расчет индикаторов, социологические опросы, статистика социальных явлений и другие [19]. Основные показатели качества жизни в разных странах во многом зависят от стадии экономического развития. Основным объективным индикатором качества жизни с конца 20 века является разработанный участниками программы развития ООН Индекс Развития Человеческого Потенциала (ИРЧП), включающий следующие базовые параметры – ожидаемая продолжительность жизни, уровень образования, величина валового внутреннего продукта (ВВП) на душу населения. В настоящее время для оценки качества жизни рассматривают объективные и субъективные индикаторы. Объективные индикаторы отражают природные и социальные аспекты жизни, например, уровень благосостояния и развития социальной инфраструктуры, качество элементов природной среды и природно-климатические условия. К субъективным индикаторам относятся когнитивные и эмоциональные оценки удовлетворенности жизнью самого человека (здоровьем, окружающей средой, условиями труда и отдыха, безопасно-

стью, уверенностью в будущем и др.). Для более комплексной оценки качества жизни существуют интегральные показатели, включающие такие группы индикаторов, как: здоровье, благосостояние (доход, жилье, инфраструктура), социальная сфера (условия труда, личная и национальная безопасность), качество развития населения (образование, квалификация, демографические показатели), качество элементов природной среды (воздух, вода, почва, биологическое разнообразие), природные условия (климат, природные ресурсы, форсмажорные ситуации).

Предлагается следующая метаонтология знаний для сопоставления положительного и отрицательного влияния объектов энергетики на качество жизни населения, рисунок 3.

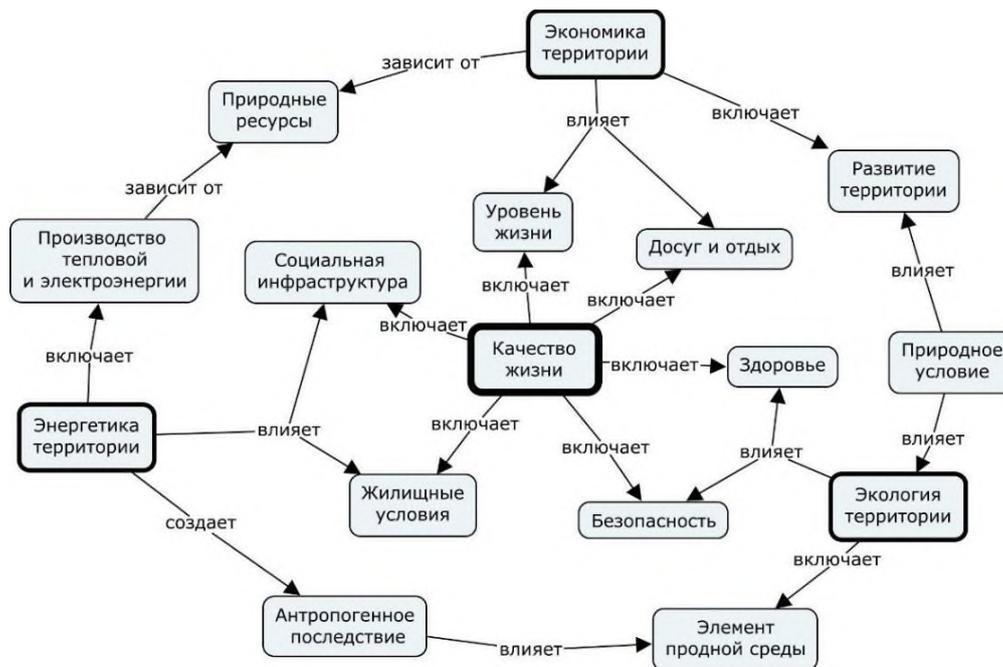


Рис. 3. Метаонтология базовых индикаторов качества жизни

Данная структура компонентов онтологического пространства знаний отражает основные понятия, связанные с качеством жизни и его основными индикаторами. В частности, производство тепловой и электрической энергии, с одной стороны, непосредственно положительно влияет на экономическое развитие территории, на качество жизни через улучшение жилищных условий и социальной инфраструктуры. Опосредованно, через развитие экономики территории положительное влияние осуществляется и на уровень жизни, обеспечение досуга и отдыха. С другой стороны, антропогенное влияние энергетики на элементы природной среды отрицательно воздействуют на здоровье и безопасность, тем самым ухудшая качество жизни. Представленная схема отражает базовые компоненты онтологического пространства знаний, связанные с выполняемыми исследованиями влияния энергетики на качество жизни.

Заключение. Выполненные исследования являются продолжением работы по формированию онтологического пространства знаний с целью их интеграции для междисциплинарных исследований в области энергетики и экологии с точки зрения оценки качества жизни населения. В данной работе представлена группа онтологий, связанных с понятием антропогенного воздействия объектов энергетики на элементы природной среды. Антропогенное воздействие определяется антропогенной нагрузкой, которая зависит от состава загрязняющих веществ, их класса опасности и физико-химических свойств, а также от климатических, орографических и фоновых условий территории. Интеграция экологической и социальной составляющих в этих исследованиях необходима для сопоставления положительного

и отрицательного влияния функционирования объектов энергетики на население и природную среду. Индикаторы качества жизни предлагается рассматривать как критерии оценки этого влияния. Выполненный онтологический инжиниринг области пересечения знаний разных предметных областей и предлагаемые онтологические модели обеспечивают наглядное представление и структурирование взаимосвязанных компонентов знаний.

Благодарности. Результаты получены в рамках проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН АААА-А21-121012090007-7 (проект № FWEU-2021-0007), при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-07-00195 с использованием ресурсов ЦКП "Высокотемпературный контур" (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Массель Л.В., Иванова И.Ю., Ворожцова Т.Н., Майсюк Е.П., Ижбулдин А.К., Зорина Т.Г., Барсегян А.Р. Онтологические аспекты исследования взаимовлияния энергетики и геоэкологии // *Онтология проектирования*. 2018. Т.8. № 4(30). С. 550-561. DOI:10.18287/2223-9537-2018-8-4-550-561.
2. Массель Л.В. Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения // *Онтология проектирования*. 2016. Т.6. № 2(20). С. 149-161. DOI:10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.
3. ГОСТ 19431-84. Энергетика и электрификация. Термины и определения. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200005816> (дата обращения: 14.07.2021).
4. Энергетическая безопасность. Термины и определения. / Отв. редактор чл.-корр. РАН Воропаев Н.И. М.: «ИАЦ Энергия». 2005. 60 с.
5. Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник. М.: Мысль. 1990. 637 с.
6. Большая Российская энциклопедия. Режим доступа: <https://bigenc.ru/economics/text/2054276> (дата обращения: 14.07.2021).
7. Биологический энциклопедический словарь. Режим доступа: https://dic.academic.ru/dic.nsf/dic_biology/6915/ (дата обращения: 10.07.2021).
8. Ворожцова Т.Н., Майсюк Е.П., Иванова И.Ю. Система онтологий для исследования антропогенного влияния объектов энергетики на окружающую среду // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2020. № 1 (17). С. 89-104. DOI: 10/38028/ESI.2020.17.1.007.
9. ГОСТ 12.1.007-76 «Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности». Режим доступа: <https://rosstandart.msk.ru/gost/001.013.300/gost-12.1.007-76/> (дата обращения: 10.06.2021).
10. А.С.Т. Классы опасности веществ. Режим доступа: <http://astbusiness.ru/klassy-opasnosti-veshhestv/> (дата обращения: 23.06.2021).
11. Финогенко И.А., Дьякович М.П., Блохин А.А. Методология оценивания качества жизни, связанного со здоровьем // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2016. Т. 21. № 1. С. 121-130.
12. Jenkinson, Crispin. "Quality of life". *Encyclopedia Britannica*, 6 May. 2020. Режим доступа: <https://www.britannica.com/topic/quality-of-life>. Accessed 13 May 2021. (дата обращения: 20.06.2021).
13. Magee Liam; James Paul; Scerri Andy (2012). "Measuring Social Sustainability: A Community-Centred Approach". *Applied Research in the Quality of Life*. 7 (3): 239-261 Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11482-012-9166-x>. (дата обращения: 16.06.2021). DOI:10.1007/s11482-012-9166-x. S2CID 145257262.

14. White A. A. Global Projection of Subjective Well-being: A Challenge to positive psychology? Psychtalk 56. 2007. Pp. 17-20. Режим доступа: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.661.5083&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 02.06.2021).
15. Лебедева Л. С. "Качество жизни": ключевые подходы и структура понятия // Мониторинг общественного мнения. 2018. № 4. С. 68-80.
16. Ушаков И. Б. Качество жизни и здоровье человека. М: «Истоки». 2005. 130 с. ISBN 55-88242-364-3.
17. Рубанова Е. Ю. Теоретические аспекты качества жизни в контексте психологии здоровья // Учёные заметки ТОГУ : 2014. Т. 5. № 3. С. 108-115. ISSN 2079-8490.
18. WHO Quality of Life Assessment Group. (1996). What quality of life? / The WHOQOL Group. World Health Forum 1996. 17(4). Pp. 354-356. Режим доступа: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/54358> (дата обращения: 02.06.2021).
19. Окрепилова И. Г., Венедиктова С. К. Управление качеством жизни: Учебное пособие / Под ред. д-ра экон. наук, профессора И.Г. Окрепиловой. СПб.: Изд-во СПб ГУЭФ, 2010. 104 с. Режим доступа: <https://2lib.org/ireader/2727760> (дата обращения: 15.05.2021).

UDK 004.822: (620.9+504.05)

COMPONENTS OF THE ONTOLOGICAL KNOWLEDGE SPACE FOR ASSESSING THE IMPACT OF ENERGY ON THE QUALITY OF LIFE OF THE POPULATION

Vorozhtsova T.N.

Ph.D, lead engineer of Department of Artificial Intelligence Systems in the Energy Sector,
e-mail: tnn@isem.irk.ru

Ivanova I.Y.

Ph.D, Head of Laboratory of energy supply for decentralized consumers,
e-mail: nord@isem.irk.ru

Maysyuk E.P.

Ph.D, Senior researcher of Laboratory of energy supply for decentralized consumers,
e-mail: maysyuk@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. This paper examines an ontological approach to integrating knowledge to support interdisciplinary studies in energy and ecology in terms of quality of life assessment. These studies involve the integration of environmental and social components. The environmental component is determined by natural and climatic conditions and the state of elements of the natural environment of a particular territory. The social component implies meeting the demand of the population for electricity and heat, which are necessary for comfortable living. To compare the positive and negative impacts of the operation of energy facilities on the natural environment and the population, quality of life metrics are considered as a way to assess these impacts. We present ontologies detailing the basic concepts of the subject area of research on the anthropogenic impact of energy facilities and quality of life, and reflecting their integration into a single ontological space of knowledge. The use of the ontological approach provides a visual representation and integration of knowledge from different subject areas.

Keywords: ontological approach, anthropogenic impact, quality of life, energy, environment, ecology.

Acknowledgements: The work is carried out within the framework of the project supported by the Russian Foundation for Basic Research grant № 0-07-00195, and the project on the state task of MESI SB RAS,

State registration №.FWE U-2021-0007 (AAAA-A21-121012090007-7) using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no 13.СКР.21.0038).

REFERENCES

1. Massel L.V., Ivanova I.Yu., Vorozhtsova T.N., Maysyuk E.P., Izbuldin A.K., Zorina T.G., Barseghyan A.R. Ontologicheskie aspekty issledovaniya vzaimovliyaniya energetiki i geoeologii [Ontological aspects of the study of the mutual influence of energy and geoeology] // *Ontologiya proektirovaniya = Ontology of designing*. 2018. Vol.8. №. 4(30). Pp. 550-561. DOI:10.18287/2223-9537-2018-8-4-550-561 (in Russian)
2. Massel L.V. Fraktal'nyj podhod k strukturirovaniyu znaniy i primery ego primeneniya [Fractal approach to knowledge structuring and examples of its application] // *Ontologiya proyektirovaniya = Ontology of designing*. 2016. Vol.6. №. 2(20). Pp. 149-161. DOI:10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161 (in Russian)
3. GOST 19431-84. Energetika i elektrifikaciya. Terminy i opredeleniya [Energy industry and electrification Terms and definitions]. (in Russian)
4. Energeticheskaya bezopasnost'. Terminy i opredeleniya [Energy security. Terms and definitions] / Responsible Editor Corresponding member RAS Voropai N. I. M.: "IAC Energia". 2005. 60 p. (in Russian)
5. Reimers N.F. Prirodopol'zovanie: Slovar'-spravochnik.[Nature management: Handbook and dictionary] M.: Mysl' = M: Thought. 1990. Pp. 592-593 (in Russian)
6. Bol'shaya Rossijskaya enciklopediya [Great Russian Encyclopedia]. Available at: <https://bigenc.ru/economics/text/2054276> (accessed 14.07.2021) (in Russian)
7. Biologicheskij enciklopedicheskij slovar' [The Biological Encyclopedic Dictionary]. Available at: https://dic.academic.ru/dic.nsf/dic_biology/6915/ (accessed 10.07.2021) (in Russian).
8. Vorozhtsova T.N., Maysyuk E.P., Ivanova I.Yu. Sistema ontologij dlya issledovaniya antropogennogo vliyaniya ob'ektov energetiki na okruzhayushchuyu sredu [System of ontologies for studies of the anthropogenic impact of energy facilities on the environment] // *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management*. 2020. №. 1 (17). Pp. 89-104. DOI: 10/38028/ESI.2020.17.1.007 (in Russian)
9. GOST 12.1.007-76. Vrednye veshchestva. Klassifikaciya i obshchie trebovaniya bezopasnosti [Harmful substances. Classification and general safety requirements] (in Russian)
10. A.S.T. Klassy opasnosti veshchestv [Hazard classes of substances]. Available at: <http://astbusiness.ru/klassy-opasnosti-veshhestv/> (accessed 23.06.2021) (in Russian)
11. Finogenko I.A., Diakovich M.P., Blokhin A.A. Metodologiya ocenivaniya kachestva zhizni, svyazannogo so zdorov'em [Methodology for assessing health-related quality of life] // *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskiye nauk = Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences*. 2016. Vol. 21. № 1. Pp. 121-130 (in Russian)
12. Jenkinson, Crispin. "Quality of life". *Encyclopedia Britannica*, 6 May. 2020. Available at: <https://www.britannica.com/topic/quality-of-life> (accessed 13.05.2021).
13. Magee Liam, James Paul, Scerri Andy (2012). "Measuring Social Sustainability: A Community-Centred Approach". *Applied Research in Quality of Life*. 7(3): 239-261. DOI:10.1007/s11482-012-9166-x.S2CID145257262. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11482-012-9166-x> (accessed 16.06.2021).

14. White A. (2007). A Global Projection of Subjective Well-being: A Challenge to positive psychology? *Psychtalk* 56. 17-20. Available at: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.661.5083&rep=rep1&type=pdf> (accessed 02.06.2021).
15. Lebedeva L. S. "Kachestvo zhizni": klyuchevye podhody i struktura ponyatiya ["Quality of life": key approaches and structure of the concept] // *Monitoring obshchestvennogo mneniya = Public opinion monitoring*. 2018. №. 4. Pp. 68-80. (in Russian)
16. Ushakov I. B. *Kachestvo zhizni i zdorov'e cheloveka [Quality of life and human health]*. M.: Istoki = Origins. 2005. 130 p. ISBN 55-88242-364-3 (in Russian)
17. Rubanova E. Yu. *Teoreticheskie aspekty kachestva zhizni v kontekste psihologii zdorov'ya [Theoretical aspects of quality of life in the context of health psychology]* // *Uchyonye zametki TOGU = Scientific notes of the TOGU*. 2014. Vol. 5. №. 3. Pp. 108-115. (in Russian)
18. WHO Quality of Life Assessment Group. (1996). What quality of life? / The WHOQOL Group. *World Health Forum* 1996. 17(4): Pp. 354-356 Available at: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/54358> (accessed 02.06.2021).
19. Okrepilova I. G., Venediktova S. K. *Upravlenie kachestvom zhizni: Uchebnoe posobie [Management of quality of life: Textbook]* / Ed. by Prof. D.Sc. in Economics I.G. Okrepilova. St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg State University of Economics and Finance, 2010. 104 p. Available at: <https://2lib.org/ireader/2727760> (accessed 15.05.2021) (in Russian).

Статья поступила в редакцию 14.07.2021; одобрена после рецензирования 13.09.2021; принята к публикации 05.10.2021.

The article was submitted 14.07.2021; approved after reviewing 13.09.2021; accepted for publication 05.10.2021.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГРАНИЧНОЙ АНАЛИТИКИ (EDGE ANALYTICS) ПРИ СОЗДАНИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ОБЪЕКТОВ ЕЭС РОССИИ

Колосок Ирина Николаевна

д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории

«Управление функционированием электроэнергетических систем»,

e-mail: kolosok@isem.irk.ru

Коркина Елена Сергеевна

к.т.н., доцент, старший научный сотрудник лаборатории

«Управление функционированием электроэнергетических систем»,

e-mail: korkina@isem.irk.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130.

Аннотация. Технология цифровых двойников является одной из базовых технологий в процессе «цифровизации» энергетики. Важным компонентом цифрового двойника является сбор данных с физического объекта для мониторинга и управления этим объектом. Современные средства информационного обеспечения задач управления режимами ЕЭС России – SCADA и СМПП – предоставляют в центры диспетчерского управления огромные объемы информации, которая может быть использована для создания цифрового двойника отдельного объекта энергетики или всей энергосистемы в целом. В статье для снижения объемов и стоимости передачи и хранения больших объемов данных при создании цифровых двойников объектов энергетики предлагается использовать технологию «Edge Analytics» – граничной аналитики, которая позволяет осуществлять сбор, обработку и анализ данных на периферийных устройствах сети рядом с источником информации. В качестве объекта для создания цифрового двойника рассматривается современная цифровая подстанция.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, цифровой двойник, SCADA, СМПП, технология «Edge Analytics», цифровая подстанция.

Цитирование: Колосок И. Н., Коркина Е.С. Применение технологии граничной аналитики (Edge Analytics) при создании цифровых двойников объектов ЕЭС России // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3 (23). С. 28-39. DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.003

Введение. Технологии цифровых двойников (ЦД) сегодня активно применяются в различных технических областях, в том числе и в электроэнергетике, как в России, так и за рубежом [1, 2, 3, 4]. Целью создания цифровых двойников объектов энергетики является повышение надежности и эффективности эксплуатации на всех стадиях жизненного цикла оборудования объектов. Важными компонентами цифрового двойника являются сбор данных с физического объекта для мониторинга и управления этим объектом и хранилища собираемых данных. Создание и функционирование цифрового двойника большого распределенного объекта, каким является ЕЭС России, связано с необходимостью сбора, передачи, хранения и обработки больших объемов измерительной информации, поступающей от географически распределенных источников.

Одним из путей снижения объемов и стоимости передачи и хранения больших объемов данных при создании цифровых двойников является применение технологии «Edge Analytics» – граничной аналитики [5]. Концепция «Edge Analytics» основана на сборе, обработке и анализе данных на периферийных устройствах сети, рядом с датчиками, сетевым коммутаторами или другими подключенным устройствами, т. е. рядом с источником информации.

В настоящее время на наиболее ответственных объектах ЭЭС – межсистемных связях, крупных подстанциях электростанций устанавливаются устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ), являющиеся основным измерительным оборудованием СМНР (системы мониторинга переходных режимов). УСВИ регистрируют измерения параметров режима с высокой точностью и частотой 50 измерений в сек. В онлайн и офлайн режимах с каждого УСВИ снимаются в среднем по 20 измерений, то есть, почти 18000 синхронизированных векторных измерений (СВИ) в срезе [6]. Дальнейший рост количества УСВИ на объектах энергетики приведет к неоправданным затратам на передачу больших объемов «сырых» данных в центры диспетчерского управления.

В статье будут рассмотрены вопросы применения технологии Edge Analytics при создании цифровых двойников объектов ЭЭС России. В качестве такого объекта рассматривается современная цифровая подстанция. Интеллектуальные устройства и системы такой подстанции (терминалы РЗА (релейной защиты и автоматики), РАС (регистрации аварийных событий), УСВИ, измерительные центры, контроллеры присоединений) дают возможность обрабатывать данные измерений непосредственно на месте их получения, а установленные рабочие станции могут использоваться в качестве локального концентратора информации и выполнять функции архивирования [7].

1. Цифровой двойник в энергетике. Цифровой двойник в энергетике рассматривается в качестве основного инструмента интеллектуального управления объектами современной ЭЭС. Согласно мнению главного инженера подразделения «Интеллектуальные сети» компании Siemens Е. Никитиной, «наиболее подходящее определение цифрового двойника – это реальное отображение всех компонентов в жизненном цикле продукта с использованием физических данных, виртуальных данных и данных взаимодействия между ними, то есть цифровой двойник создает виртуальный прототип реального объекта, с помощью которого можно проводить эксперименты и проверять гипотезы, прогнозировать поведение объекта и решать задачу управления его жизненным циклом» [8].

В [4] были рассмотрены основные понятия цифровых двойников и их типы. К ним относятся:

- Двойник-прототип (*Digital Twin Prototype*). Это виртуальный аналог реально существующего элемента. Он содержит информацию, которая описывает определенный элемент на всех стадиях, начиная от требований к производству и технологических процессов при эксплуатации, заканчивая требованиями к утилизации элемента.
- Двойник-экземпляр (*Digital Twin Instance*). Содержит в себе информацию по описанию элемента (оборудования), то есть данные о материалах, комплектующих, информацию от системы мониторинга оборудования.
- Агрегированный двойник (*Digital Twin Aggregate*). Объединяет прототип и экземпляр, то есть собирает всю доступную информацию об оборудовании или системе.

Для электроэнергетических компаний наиболее актуален двойник-экземпляр. Он основывается на математической модели сети и содержит информацию о технических параметрах оборудования ЭЭС (ЛЭП, трансформаторы, выключатели и т.д.), дате его ввода в эксплуатацию, географические координаты, данные с измерительных устройств. Эта информация используется для проведения расчетов по подключению новых потребителей, а также различных расчетов электрических сетей.

Таким образом, для ЭЭС и ее объектов цифровой двойник включает базу данных с информацией о сети, которая интегрирована с другими ИТ-системами энергокомпании (системами сбора и обработки информации о параметрах режима, геоинформационной системой, системой управления активами и пр.).

Функционирование цифрового двойника можно разделить на три этапа [5]: видеть, думать и делать. На стадии «видения» речь идет о получении эксплуатационных данных о состоянии объекта. На этапе «думать» цифровой двойник анализирует полученную информацию и принимает решение о соответствии состояния объекта заданным технико-экономическим параметрам и условиям безопасной эксплуатации. На третьем шаге – «делать» ЦД в случае получения информации о нарушениях технологического процесса с помощью искусственного интеллекта (ИИ) в рамках цифрового двойника формирует решение о самостоятельных действиях по ликвидации этих нарушений в автоматическом режиме, либо информирует оператора сети о том, что необходимо сделать.

2. СМНР ЕЭС России. С 2005 г. в России создается Система мониторинга переходных режимов (СМНР) – российский аналог WAMS. СМНР представляет собой комплекс УСВИ или PMU (Phasor Measurement Units), распределенных по объектам энергосистемы (подстанции, крупные узлы) и связанных каналами передачи данных с пунктами сбора информации – PDC (концентратор векторных измерений) – (уровень «СО-РДУ¹» или «СО-ОДУ²»), в свою очередь передающих ее в центр управления данными (ГВЦ). Структура СМНР ЕЭС России показана на рис. 1 [6].

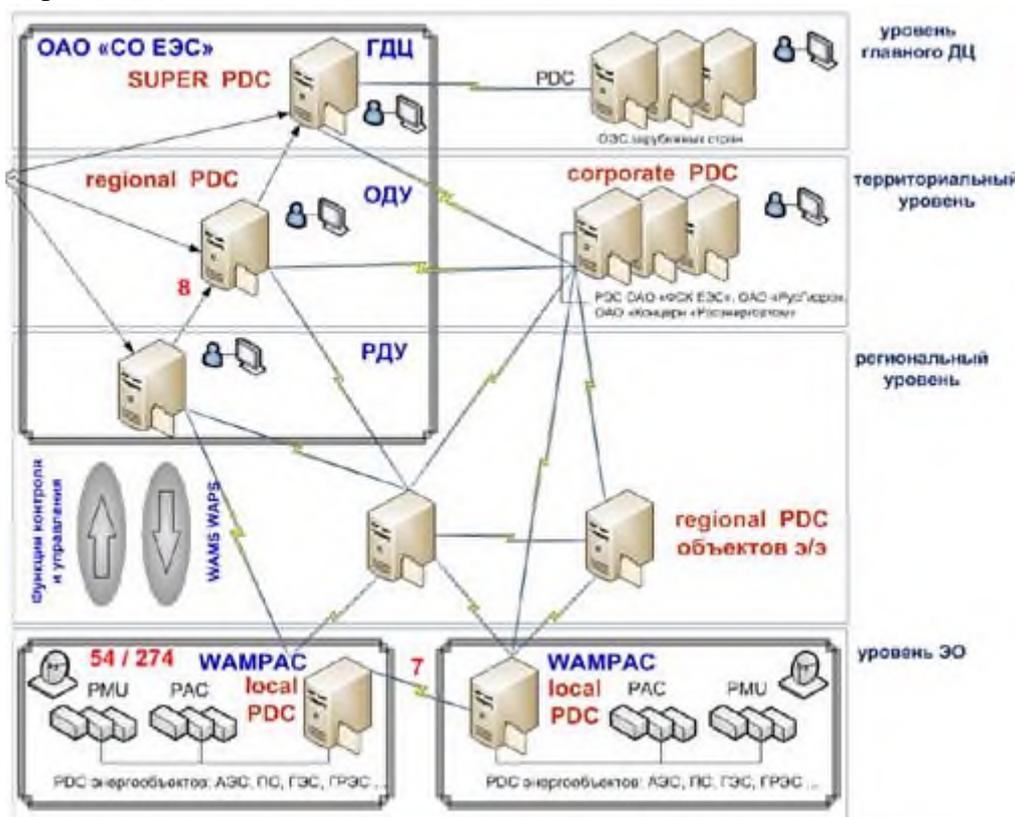


Рис. 1. Структура СМНР ЕЭС России

Данные синхронизированных векторных измерений с метками времени передаются в PDC различного уровня, на которых устанавливается специализированное программное обеспечение для сбора данных от УСВИ, их обработки, вычисления, хранения, а также, отображения в режиме реального времени текущих параметров состояния энергосистемы и выдачу сообщений и сигналов.

Развитие СМНР в России идет стремительными темпами, если в 2005-2009 гг. на 25 объектах электроэнергетики было установлено менее 100 PMU, то в настоящее время на 135 объектах электроэнергетики уже введено более 900 УСВИ преимущественно отечественного

¹ СО РДУ – Региональное диспетчерское управление Системного Оператора ЕЭС России

² СО ОДУ – Объединенное диспетчерское управление Системного Оператора ЕЭС России

производства [6]. В настоящее время УСВИ устанавливаются в обязательном порядке на наиболее ответственных объектах ЭЭС – межсистемных связях, крупных подстанциях напряжением 330 кВ и выше, электростанциях с установленной мощностью 500 МВт и более.

УСВИ регистрируют измерения параметров режима с высокой точностью и частотой (50 измерений в сек), среднее время доставки данных синхронизированных векторных измерений в центры диспетчерского управления составляет 150 мс, что обеспечивает возможность их применения в задачах автоматического и противоаварийного управления.

Важная роль при создании цифровых двойников отводится виртуальным датчикам, представляющим расчётные значения физических характеристик для тех мест моделируемого объекта, где установка реального датчика невозможна или нецелесообразна. УСВИ (PMU), установленное в узле ЭЭС, позволяет получить расчётные значения комплексов узловых напряжений в смежных узлах, они получили название «расчетных» PMU. Исследования показали, что точность «расчетных» PMU практически не уступает точности физических PMU. «Расчетные» PMU позволяют существенно улучшить наблюдаемость ЭЭС и повысить избыточность измерений, что очень важно при расчете и анализе текущих режимов ЭЭС.

Объем данных СВИ, поступающих в ДЦ (Дата Центр – центр данных) в онлайн и офлайн режимах – порядка 20 измерений с каждого УСВИ. Это означает, что в ДЦ приходит в онлайн режиме около 5 000 СВИ каждые 20 мс, т.е. 250 000 СВИ каждую секунду [6]. Дальнейший рост количества УСВИ на объектах энергетики приведет к неоправданным затратам на передачу больших объемов «сырых» данных в центры диспетчерского управления. Решить или смягчить эту проблему позволяет иерархическая структура СМПР, в которой концентраторы векторных измерений (PDC) установлены на всех уровнях иерархии от объектов энергосистемы до главного диспетчерского центра в «СО-ЦДУ». Это дает возможность выполнять локальную обработку данных непосредственно в PDC различного уровня. Результаты локальных вычислений периодически или по запросу передаются в PDC более высокого уровня, что позволяет существенно сократить объем передачи информации в центры диспетчерского управления. Еще больший эффект в плане снижения объемов и стоимости передачи и хранения больших объемов данных при создании цифровых двойников объектов энергетики обеспечивает применение технологии «Edge Analytics» или граничной аналитики [5].

3. Технология Edge Analytics (граничной аналитики) при создании цифровых двойников. Цифровой двойник (ЦД) сам по себе не является технологией. Это слияние многих новейших цифровых технологий, таких как, облачные хранилища и вычисления, Интернет вещей (IoT – Internet of Things), искусственный интеллект (ИИ), машинное обучение и др. [5, 9]. С технологией IoT, обеспечивающей коммуникации между различными компонентами ЦД, тесно связана технология «Edge Computing», базирующаяся на концепции граничной аналитики «Edge Analytics».

Концепция граничной аналитики «Edge Analytics» [5] основана на сборе, обработке и анализе данных на периферийных устройствах сети, рядом с датчиками, сетевыми коммутаторами или другими подключенными устройствами, т.е. рядом с источником информации и исполняемыми элементами, например, на производстве. Граничные вычисления стимулируют рост четвертой промышленной революции благодаря развитию технологий в облачных системах, программном обеспечении, вычислениях, коммуникациях, современных системах хранения и памяти. Сам термин «Edge Computing» означает, что часть обработки данных происходит на конечных элементах сети, в том месте, где в системах IoT физические объекты связываются с Интернетом. Граничные вычисления дают возможность анализировать ключевые данные в режиме реального времени «на месте», не отправляя их на центральный

сервер. Однако граничные вычисления Edge Computing — это гораздо больше, чем просто расчет и обработка данных на местах. Предполагается, что эта технология обеспечит плавную интеграцию периферийных устройств и облачных вычислений, а также двусторонний обмен информацией.

Облачные вычисления – стабильно развивающаяся, в том числе и на российском рынке, технология. «Cloud Computing наиболее динамично развивается последнее десятилетие, уровень проникновения технологии в развитых странах превышает 90%» – Олег Любимов, генеральный директор Selectel. Граничные технологии только приходят в нашу страну, в [10] рассмотрены их основные отличия, преимущества и недостатки, а также области применения.

Облачные вычисления – это технология, которая позволяет хранить и обрабатывать данные удаленно в «облаке». Для этого используются центры обработки данных (ЦОД). Компании, применяющей облачные технологии, не обязательно создавать свою ИТ-инфраструктуру — все необходимое ей может предоставить провайдер. Нужен только доступ в Интернет, чтобы открыть сайт или приложение.

Преимущества:

- Надежное оборудование. У провайдеров облаков есть ресурсы для передачи, хранения и обработки данных: хранилища, серверы, сети, программное обеспечение и многое другое.
- Безопасность. Оператор облачных сервисов отвечает за сохранность данных. Например, организует шифрование, защиту от атак и аварийное восстановление.
- Развитость технологии. На мировом и российском рынках существует множество компаний, которые занимаются облачными технологиями. Список услуг разнообразный: посекундная тарификация, частные, публичные и гибридные облака, круглосуточная техническая поддержка, несколько ЦОД в разных местах.

Недостатки:

- Задержка в передаче данных между клиентом и ЦОД. Данные передаются от клиента в ЦОД и обратно, проходя многие километры сетей. Это может создать задержки.
- Сложная и дорогая инфраструктура. Если компания не хочет использовать публичное облако, то выбирает частное или гибридное. Облачные технологии применяются повсеместно: в госсекторе, производстве, ритейле, ИТ-компаниях, финансовой сфере и телекоммуникациях.

В энергетике Облачные технологии пока не нашли достаточно широкого применения, хотя время от времени в литературе появляются предложения и даже результаты их использования. В основном это касается таких задач, как расчет экономических показателей, документооборот, проектирование, телефония [11]. В [12] было предложено использовать технологии информационного облака для формирования единого конкурентного рынка услуг при создании интеллектуальной энергосистемы (ИЭС) России. С помощью такой технологии в ИЭС может выполняться, например, одновременно несколько функций:

- управление спросом;
- привлечение распределенной генерации;
- мониторинг и диагностика состояния оборудования;
- информационный обмен в рамках хозяйственной деятельности организаций отрасли и др.

Вместе с тем, в работе отмечено, что применение данной технологии требует решения вопросов информационной безопасности, и в современной практике этому уделяется значи-

тельное внимание³. Это одна из причин, почему Облачные технологии не нашли пока широкого применения в электроэнергетических компаниях.

Граничные вычисления – это технология обработки и хранения данных на конечном устройстве.

Преимущества:

- Практически нулевая задержка в передаче данных. Вычисления производятся на конечных устройствах, поэтому информации не нужно преодолевать километры сетей, чтобы добраться до ЦОД.
- Надежность вычислений. Данные обрабатываются даже в отсутствие подключения к Интернету.
- Безопасность и конфиденциальность. Информация предварительно обрабатывается на месте, и только данные, соответствующие политике конфиденциальности, передаются в облако для дальнейшего анализа.

Недостатки:

- Затраты на оборудование и сотрудников. Пользователю технологии придется купить и настроить оборудование, привлечь специалистов. Это сложнее, чем подключить публичное облако.

Главное преимущество граничных технологий – скорость передачи и анализа данных, поэтому эти технологии используются там, где важна обработка информации в реальном времени, – например, в сферах IoT. IoT и граничные вычисления будут применяться в отраслях промышленности, где генерируются большие объёмы оперативной информации, к которым, несомненно относится современная электроэнергетика. В [13] выполнен обзор современного состояния и перспективных областей применения граничных вычислений при создании интеллектуальных энергосистем (Smart Grid), в том числе рассмотрены вопросы применения граничных вычислений при создании цифровых двойников передающих и распределительных сетей ЭЭС.

Как показано в [13], предприятия электроэнергетики обладают наиболее благоприятной почвой для применения технологии граничных вычислений из-за развитой инфраструктуры и автоматизации. Большое количество стационарных датчиков и микропроцессорных систем управления позволяют собирать данные на объектах энергетики, проводить их обработку и вырабатывать управляющие воздействия непосредственно на местах. Одним из таких объектов является современная цифровая подстанция (ЦПС).

4. Цифровая подстанция – современный объект энергетики. ЦПС – это подстанция с высоким уровнем автоматизации управления, в которой информация, необходимая для выполнения технологических задач различными устройствами и электрооборудованием, передается в цифровом виде на основе международного стандарта IEC 61850 (в России – МЭК 61850) по оптоволоконным каналам связи [14]. ЦПС – важное звено технологического управления ЭЭС, в сфере её функционирования находится управление противоаварийной автоматикой (ПА), микропроцессорными устройствами (МП) релейной защиты (РЗ), АСУ ТП, АИИСКУЭ, коммуникационная сеть.

В настоящее время вопросам разработки и применения интеллектуальных электронных устройств различного функционального назначения для цифровых подстанций уделяется много внимания [15, 16]. Так, специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис» разработан ряд многофункциональных интеллектуальных устройств с поддержкой технологии векторных измерений, в том числе устройство синхронизированных векторных измерений ЭНИП-2-УСВИ с функциями концентратора векторных данных,

³ NERC Reliability standards – Critical Infrastructure Protection (CIP).

устройство сопряжения с шиной процесса ENMU, многофункциональное измерительное устройство ESM, устройство релейной защиты и автоматики ENBC с функциями контроллера присоединения. Применение интеллектуальных электронных устройств с одновременной поддержкой технологий цифровой подстанции и синхронизированных векторных измерений позволяют создавать более эффективные системы автоматизации подстанций.

В качестве примера рассмотрим систему сбора и передачи данных, реализованную на одной из подстанций 330 кВ (рис. 2) [17].

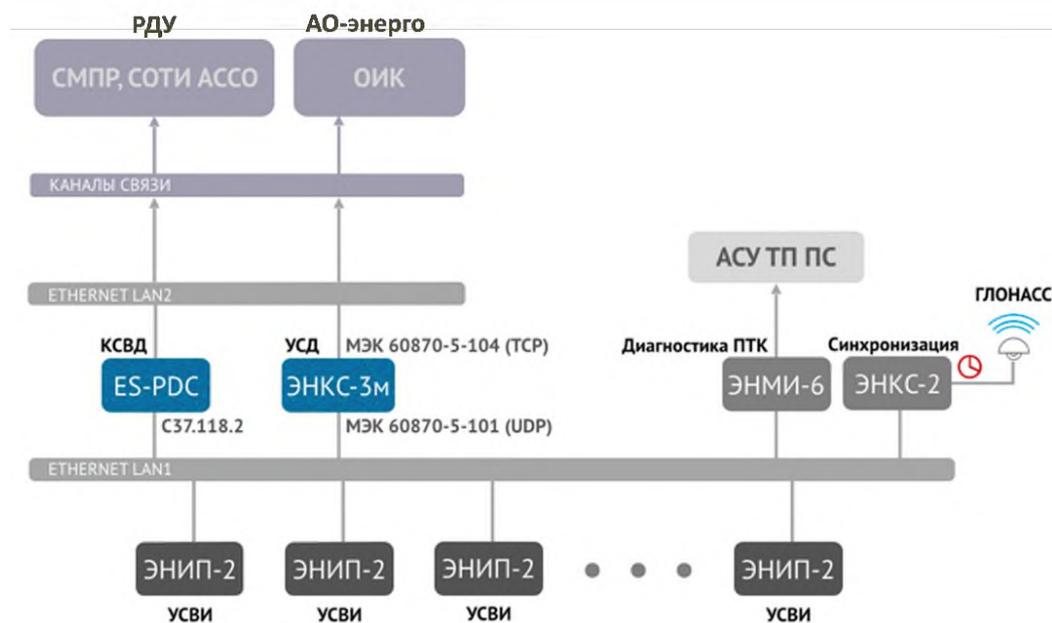


Рис. 2. Применение УСВИ для СМПР и АСТУ

В составе системы задействованы 15 устройств специальной модификации «ЭНИП-2-УСВИ» с цифровыми входами согласно МЭК 61850-9-2, разработанные отечественными производителями для применения в составе цифровой подстанции [17].

Для сбора и передачи данных для СМПР и АСТУ (автоматизированных систем технологического управления) используются концентратор векторных данных ES-PDC и устройство сбора данных «ЭНКС-3м» соответственно. Синхронизация времени для всех компонентов системы осуществляется с помощью блока синхронизации времени «ЭНКС-2». Для диагностики и мониторинга компонентов системы сбора и передачи данных используется модуль «ЭНМИ-6».

Концентратор ES-PDC выполняет следующие функции:

- сбор данных от УСВИ или других КСВД (концентраторов синхронных векторных данных) по протоколу IEEE C37.118.2;
- агрегации векторных измерений от нескольких УСВИ по метке времени UTC;
- расчет параметров режима электрической сети;
- передачу клиентским устройствам данных по протоколу IEEE C37.118.2;
- архивирование данных: циклические и аварийные архивы (CSV-файлы);
- организацию доступа к архивным данным по протоколам FTP, HTTPS/SOAP.

Концентратор ES-PDC может осуществлять расчет мощности, средних значений измеренных величин, пересчет величин с учетом коэффициентов трансформации, расчет симметричных составляющих токов, напряжений, мощностей и т.д.

ES-PDC обеспечивает регистрацию и хранение в архивах всех принятых пакетов данных от УСВИ для предотвращения потери данных в результате сбоя каналов передачи данных. Принятые от УСВИ данные хранятся в циклических архивах внутренней базы

данных с настраиваемой глубиной хранения. В аварийных режимах дополнительно ES-PDC обеспечивает запись архивов аварийных событий.

Рассмотренная структура системы сбора и передачи данных современной цифровой подстанции позволяет реализовать ряд важных функций сбора и обработки данных локально, на уровне энергообъекта, например, провести достоверизацию СВИ и локальное линейное оценивание состояния по реальным и расчетным СВИ [18], т.е. выполнить первый этап работы цифрового двойника, и затем на базе полученной модели текущего режима провести мониторинг состояния подстанции и реализацию функций управления ее оборудованием.

Полученные в результате такой локальной обработки данных значения параметров режима могут передаваться в PDC более высокого уровня и в центр управления данными для координации и формирования математической модели полной схемы ЭЭС. Важно подчеркнуть, что при таком подходе в центр управления передаются не «сырые» СВИ, а их оценки, строго синхронизированные по времени.

Заключение. Целью создания цифровых двойников объектов энергетики является повышение их надежности и эффективности эксплуатации. Создание и функционирование цифрового двойника большого распределенного объекта, каким является ЭЭС России, связано с необходимостью сбора, передачи, хранения и обработки больших объемов измерительной информации, поступающей от географически распределенных источников. СМПР предоставляет в центры диспетчерского управления ЭЭС огромные объемы информации, необходимой для создания цифрового двойника отдельного объекта или всей энергосистемы в целом. Дальнейший рост количества УСВИ на объектах энергетики приведет к неоправданным затратам на передачу больших объемов «сырых» данных в центры диспетчерского управления. Одним из путей снижения объемов и стоимости передачи и хранения больших объемов данных при создании цифровых двойников в энергетике может стать применение технологии граничных вычислений в рамках концепции граничной аналитики – «Edge Analytics». В качестве объекта для создания цифрового двойника и применения технологии граничных вычислений рассмотрена современная цифровая подстанция. Системы сбора и передачи данных современных подстанций дают возможность обрабатывать данные измерений непосредственно в локальном концентраторе данных, что позволяет получить математическую модель объекта, необходимую для создания его ЦД. Установленные рабочие станции могут использоваться в качестве локального концентратора информации и выполнять функции архивирования.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-07-00351 А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Digital Twin Market by Technology, Type (Product, Process, and System), Industry (Aerospace & Defense, Automotive & Transportation, Home & Commercial, Healthcare, Energy & Utilities, Oil & Gas) and Geography – Global Forecast to 2025. Режим доступа: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html> (дата обращения: 28.05.2021).
2. Ерошенко С.А., Хальясмаа А.И. Технологии цифровых двойников в энергетике. Электроэнергетика глазами молодежи. Т. 1. Иркутск. 2019. С. 37-40.
3. Андриюшкевич С.К., Ковалев С.П., Нефедов Е. Подходы к разработке и применению цифровых двойников энергетических систем // Цифровая подстанция. 2019. № 12. С. 38–43.
4. Воропай Н.И., Массель Л.В., Колосок И.Н., Массель А.Г. ИТ-инфраструктура для

- построения интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики на основе цифровых двойников и цифровых образов // Известия РАН. Энергетика. №1. 2021. С. 3-13.
5. Курганова Н.В., Филин М.А., Черняев Д.С., Шаклеин А.Г., Намиот Д.Е. Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 Т. 7. № 5. 2019. С. 105-115.
 6. Дубинин Д.М. Актуальные задачи развития и применения технологии синхронизированных векторных измерений для задач управления в электроэнергетике // Доклад 06.12.19 на заседании НТС СО ЕЭС.
 7. Холкин Д. Цифровая энергетика: что это такое? // Цифровая подстанция. 2018. №10. С. 52-55.
 8. Никитина Е. Попали в сети: как работают цифровые двойники в электроэнергетике. Режим доступа: <https://pro.rbc.ru/news/5db1b59a9a79474bb142a3fe> (дата обращения: 24.11.2019).
 9. Массель Л.В., Массель А.Г., Копайгородский А.Н. Эволюция технологий исследований энергетики и применения их результатов: от математических моделей и компьютерных программ к цифровым двойникам и цифровым образам // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 5-19. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-01.
 10. Хрисанфова Е. Облачные, туманные и граничные вычисления: отличия и перспективы развития технологий. Режим доступа: <https://rb.ru/story/edge-computing/> (дата обращения: 24.06.2021).
 11. Шайхутдинов А.М. Возможности использования облачных технологий в энергетике // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 2. Ч. 3. Режим доступа: <https://web.snauka.ru/issues/2015/02/45646> (дата обращения: 18.06.2021).
 12. Бердников Р.Н, Бушуев В.В., Воропай Н.И., Ефимов Д.Н., Колосок И.Н., Курбацкий В.Г. и др. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью. М.: ОАО "НТЦ ФСК ЕЭС. 2012. 235с.
 13. ChengFeng, YiWang, QixinChen, YiDing GoranStrbac, ChongqingKang. Smart grid encounters edge computing: opportunities and applications //Advances in Applied Energy. Volume 1, 23 February 2021, 100006. DOI:10.1016/j.adapen.2020.100006.
 14. Цифровая подстанция. Эффективные решения // Журнал «ИСУП». Режим доступа: <http://isup.ru/articles/6/13855/> (дата обращения: 14.05.19)
 15. Мокеев А. В., Бовыкин В. Н., Драницын И. В., Миклашевич А. В., Орлов Ф. Ю., Хромцов Е. И. Многофункциональные интеллектуальные устройства для цифровых подстанций // Цифровая подстанция, использующая стандарт IEC 61850. Москва. 2017 г. С. 42-43.
 16. Мокеев А. В. Применение технологии СВИ для выполнения функций управления, защиты и автоматики // Цифровая подстанция. Режим доступа: <https://digitalsubstation.com/blog/2018/03/05/primenenie-tehnologii-sinhronizirovannyh-vektornyh-izmerenij-svi-dlya-vypolneniya-funksij-upravleniya-zashhity-i-nbsp-avtomatiki/> (дата обращения: 10.06.2021).
 17. Бовыкин В.Н., Драницын И.В., Орлов Ф.Ю., Хромцов Е.И. Вопросы интеграции технологий векторных измерений и цифровых подстанций // «Релейная защита и автоматика энергосистем 2017» 25-28 апреля 2017 г. Санкт-Петербург.
 18. Kolosok I., Korkina E., Buchinsky E. Monitoring of EPS Facilities Using PMU-Based Linear State Estimation. // Proc.of the 5th International Conference «Liberalization and Moderni-

zation of Power Systems: Smart Technologies for Joint Operation of Power Grid». Irkutsk: ESI. August 6-10. 2012. Pp. 245-253.

UDK 004.89: 620.9

APPLICATION OF EDGE ANALYTICS TECHNOLOGY TO DEVELOP DIGITAL TWINS OF RUSSIA'S UNITED ELECTRIC POWER SYSTEM FACILITIES

Irina N. Kolosok

Professor, Leading Researcher of Laboratory
of Electric Power Systems Operation and Control,
e-mail: kolosok@isem.irk.ru

Elena S. Korkina

Doctor, Senior Researcher of Laboratory
of Electric Power Systems Operation and Control,
e-mail: korkina@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
664033, Irkutsk, Russia, Lermontov Str., 130.

Abstract. The technology of digital twins is a basic one in the process of energy "digitalization." An essential component of the digital twin development is data collection from a physical facility to monitor and control this facility. Advanced information support systems designed to control the UES of Russia (SCADA and WAMS) provide control centers with considerable amounts of information, which can be used to create a digital twin of an individual energy facility or entire power system.

This paper proposes the use of edge analytics technology that enables the collection, processing, and analysis of data on network peripheral units near the information source, to reduce the amount and cost of transmission and storage of a whole host of data when creating digital twins of energy facilities. A modern digital substation is considered as a facility to be digitally twinned.

Keywords: power systems, digital twin, SCADA, WAMS, Edge analytics technology, digital substation.

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research. (project No. 19-07-00351 A).

REFERENCES

1. Digital Twin Market by Technology, Type (Product, Process, and System), Industry (Aerospace & Defense, Automotive & Transportation, Home & Commercial, Healthcare, Energy & Utilities, Oil & Gas), and Geography – Global Forecast to 2025. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html> (accessed 28.05.2021).
2. Eroshenko S.A., Hal'yasmaa A.I. Tekhnologii cifrovyyh dvoynikov v energetike [Digital twin technologies in energy industry]// Electric power industry through the eyes of young people. Vol. 1. Irkutsk. 2019. Pp. 37-40 (in Russian)
3. Andryushkevich S.K., Kovalev S.P., Nefedov E. Podhody k razrabotke i primeneniyu cifrovyyh dvoynikov energeticheskikh sistem [Approaches to the development and application of digital twins of energy systems] // Tsifrovaya podstantsiya = Digital substation. 2019. № 12. Pp. 38-43 (in Russian)
4. Voropaj N.I., Massel' L.V., Kolosok I.N., Massel' A.G. IT-infrastruktura dlya postroeniya intellektual'nyh sistem upravleniya razvitiem i funkcionirovaniem sistem energetiki na os-

- nove cifrovyyh dvoynikov i cifrovyyh obrazov [IT infrastructure for building intelligent control systems for the development and functioning of energy systems based on digital twins and digital images] // Izvestiya RAN. Energetika = Izvestia RAN. Energy. №1. 2021. Pp. 3-13 (in Russian)
5. Kurganova N.V., Filin M.A., Chernyaev D.S., Shaklein A.G., Namiot D.E. Vnedrenie cifrovyyh dvoynikov kak odno iz klyuchevyyh napravlenij cifrovizacii proizvodstva [Implementation of digital twins as one of the key areas of digitalization of production] // International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 . Vol.7. № 5. 2019. Pp.105-115.
 6. Dubinin D.M. Aktual'nye zadachi razvitiya i primeneniya tekhnologii sinhronizirovannykh vektornykh izmerenij dlya zadach upravleniya v elektroenergetike [Actual problems of the development and application of the technology of synchronized phasor measurements for control problems in the electric power industry] // Report 06.12.19 at the meeting of the Scientific and Technical Council of SO UES (in Russian)
 7. Holkin D. Cifrovaya energetika: chto eto takoe? [Digital energy: what is it?] // Tsifrovaya podstantsiya = Digital substation. 2018. №10. Pp. 52-55. (in Russian)
 8. Nikitina E. Popali v seti: kak rabotajut cifrovyje dvoyniki v elektroenergetike [Caught in the network: how digital twins work in the electric power industry]. Available at: <https://pro.rbc.ru/news/5db1b59a9a79474bb142a3fe> (accessed 24.11.2019) (in Russian)
 9. Massel' L.V., Massel' A.G., Kopajgorodskij A.N. Evolyuciya tekhnologij issledovaniy energetiki i primeneniya ih rezul'tatov: ot matematicheskikh modelej i komp'yuternyyh programm k cifrovym dvoynikam i cifrovym obrazam [Evolution of energy research technologies and the application of their results: from mathematical models and computer programs to digital twins and digital images] // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. Irkutsk: ISEM SB RAS. 2019. № 4. Pp. 5-9 (in Russian). DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-01 (in Russian)
 10. Hrisanfova E. Oblachnye, tumannyye i granichnyye vychisleniya: otlichiya i perspektivy razvitiya tekhnologij [Cloud, Fog and Edge Computing: Differences and Technological Prospects]. Available at: <https://rb.ru/story/edge-computing/> (accessed 06.24.2021) (in Russian)
 11. Shajhutdinov A.M. Vozmozhnosti ispol'zovaniya oblachnykh tekhnologij v energetike [Possibilities of using cloud technologies in the energy sector] // Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii = Modern scientific research and innovations. 2015. №. 2. Part 3 Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2015/02/45646> (accessed 18.06.2021)
 12. Berdnikov R.N, Bushuev V.V., Voropaj N.I., Efimov D.N., Kolosok I.N., Kurbackij V.G. i dr. Konceptsiya intellektual'noj elektroenergeticheskoy sistemy Rossii s aktivno-adaptivnoj set'yu [The concept of an intelligent electric power system of Russia with an active-adaptive network]. Moscow: JSC "STC FGC UES". 2012. 235 p. (in Russian)
 13. ChengFeng, YiWang, QixinChen, YiDing GoranStrbac, ChongqingKang. Smart grid encounters edge computing: opportunities and applications //Advances in Applied Energy. Volume 1, 23 February 2021, 100006. DOI:10.1016/j.adapen.2020.100006.
 14. Cifrovaya podstantsiya. Effektivnyje resheniya [Digital substation. Effective solutions] // ISUP magazine. Available at: <http://isup.ru/articles/6/13855/> (accessed 14.05.19).
 15. Mokeev A.V., Bovykin V.N., Dranicyn I.V., Miklashevich A.V., Orlov F.Yu., Hromcov E.I. Mnogofunkcional'nye intellektual'nye ustrojstva dlya cifrovyyh podstancij [Multifunctional intelligent devices for digital substations] // Tsifrovaya podstantsiya, ispol'zuyushchaya standart IEC 61850 = Digital substation using the IEC 61850 standard. Moscow. 2017. Pp. 42-43 (in Russian)
 16. Mokeev A.V. Primenenie tekhnologii SVI dlya vypolneniya funkciy upravleniya, zashchity i

- avtomatiki [Application of PMU technology to perform control, protection and automation functions] // Tsifrovaya podstantsiya = Digital substation. Available at: <https://digitalsubstation.com/blog/2018/03/05/primenenie-tehnologii-sinhronizirovannyh-vektornyh-izmerenij-svi-dlya-vypolneniya-funksij-upravleniya-zashhity-i-nbsp-avtomatiki/> (accessed 10.06.2021) (in Russian)
17. Bovykin V.N., Dranicyn I.V., Orlov F.Yu., Hromcov E.I. Voprosy integracii tekhnologij vektornyh izmerenij i cifrovyyh podstancij [Integration issues of phasor measurement technologies and digital substations] // «Releynaya zashchita i avtomatika energosistem 2017» 25 – 28 aprelya 2017 g = "Relay protection and automation of power systems 2017" April 25 – 28. 2017. St. Petersburg (in Russian)
18. Kolosok I., Korkina E., Buchinsky E. Monitoring of EPS Facilities Using PMU-Based Linear State Estimation. // Proc.of the 5th International Conference «Liberalization and Modernization of Power Systems: Smart Technologies for Joint Operation of Power Grid». Irkutsk: ESI. August 6-10. 2012. Pp.245-253.

Статья поступила в редакцию 22.07.2021; одобрена после рецензирования 10.09.2021; принята к публикации 15.10.2021.

The article was submitted 22.07.2021; approved after reviewing 10.09.2021; accepted for publication 15.10.2021.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИНФРАСТРУКТУРНОЙ ДОСТУПНОСТИ РЕГИОНОВ С ПОЗИЦИЙ ОСВОЕНИЯ И РАЗВИТИЯ

Расторгуев Иван Александрович

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, e-mail: rastorguev_ia@nrcki.ru

Щепетина Татьяна Дмитриевна,

к.т.н., нач. лаборатории «Перспективных концепций», e-mail: Schepetina_TD@nrcki.ru

Баланин Андрей Леонидович,

старший научный сотрудник, e-mail: Balanin_AL@nrcki.ru

НИЦ «Курчатовский институт»

123182, Москва, пл. Курчатова, д.1.

Аннотация. Аналитическая ГИС-программа предназначена для целей многопараметрической оценки доступности транспортной и энергетической инфраструктуры, потенциала добычи полезных ископаемых, в т.ч. энергоресурсов, а также доступности альтернативных возобновляемых источников энергии в некотором определяемом географическими координатами месте, перспективном с точки зрения потребности развёртывания энергопроизводства, располагаемом в удаленных или труднодоступных районах России; для целей стратегического планирования развития регионов, освоения новых территорий, в т.ч. месторождений различных ресурсов. Практическое применение ГИС позволяет повысить эффективность процесса принимаемых стратегических решений.

Ключевые слова: ГИС, язык программирования Python v 3.7, модули QGIS, арктические территории РФ, инфраструктура, атомная энергетика, оптимизация.

Цитирование: Расторгуев И. А., Щепетина Т.Д., Баланин А.Л. Применение геоинформационной системы для оценки инфраструктурной доступности регионов с позиций освоения и развития // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3 (23). С. 40-48. DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.004

Введение. Такой геополитический фактор как большая широтная протяженность России, накладывает особые требования на развитие транспортной и энергетической обеспеченности регионов. Если в западной части страны идет поступательное развитие производственной инфраструктуры, то в восточной части отмечается существенное отставание [1, 2]. В качестве примера такого региона будет рассмотрена территория Западной Якутии. Наличие большой доли арктических и близких к ним по типу территорий с суровыми природно-климатическими условиями ведет к существенной нагрузке на бюджет в виде затрат на относительно комфортное освоение этих территорий. Наличие ценных минерально-сырьевых ресурсов вызывает естественное стремление к их освоению, а это сопряжено с относительно высокими затратами, как на создание производственной инфраструктуры, так и на обеспечение энергоресурсами. Особенно возрастает транспортная составляющая всех статей затрат.

Данная работа выполняется с целью создания геоинформационно-аналитического инструментария для поддержки принятия решений путем многопараметрической оценки доступности транспортной и энерго-транспортной инфраструктуры, потенциала добычи полезных ископаемых, в т.ч. энергоресурсов (нефть, газ, уголь), а также возможности использования возобновляемых источников энергии в некотором определяемом географическими координатами местоположении, перспективном с точки зрения потребности развёртывания энергопроизводства, расположенном в удаленных или труднодоступных районах России.

Постановка задачи. Задачей данной работы стало составление гео-инфраструктурно-логистических карт [3] обеспеченности и доступности регионов для энергоснабжения новых производств. Такие карты позволяют вычислить для любой точки рассматриваемой террито-

рии удаленность от основных элементов инфраструктуры. Это дает возможность оценить уязвимость региона (в случае форс-мажорной ситуации, при которой может выйти из строя система энергообеспечения либо прекращается транспортное сообщение) и принять решение для определения дальнейшей стратегии освоения территории – создания новых транспортных артерий или систем энергообеспечения.

Из общедоступных источников была собрана картографическая база данных для геоинформационной системы (ГИС) [4-7]. Данные включают в себя линии электропередач (ЛЭП) и газоснабжения, железнодорожные пути и автодороги, реки и акватории мировых океанов, федеральные границы РФ, города, а также расположение АЭС, ГЭС и месторождений полезных ископаемых. В статье предлагается рассмотреть удаленность территории Западной Якутии (таблица 1) в районе месторождения редкоземельных элементов Томтор от рассматриваемых инфраструктурных элементов – ЛЭП, рек и автодорог.

Таблица 1. Угловые координаты расчётной области

Расположение	Координаты
Северо-запад	N73.912 E110.58
Юго-запад	N58.44 E110.58
Северо-восток	N72.74 E112.11
Юго-восток	N58.44 E112.11

2. Результаты расчёта. ГИС была дополнена математическими расчетами. Методами пространственного анализа оценивается удаленность определённых территорий Российской Федерации в зависимости от указанных ранее инфраструктурных элементов.

Подход к оценке доступности транспортной и энергетической инфраструктуры в выбранном месте можно отнести к одному из методов пространственного анализа — направлению в современной географической науке, соединяющего компьютерное моделирование в геоинформационных системах (ГИС) с пространственной метрикой и математической статистикой. Пространственный анализ – это произведение вычислительных операций над гео-данными с целью извлечения из них дополнительной информации. Совокупность методов проведения операций над данными обеспечивает анализ расположения, связей, закономерностей и иных пространственных отношений объектов [8].

Технологии пространственного анализа данных в ГИС включают 4 типа базовых операций [9]:

- объединение смежных объектов, относящихся к одному классу;
- вырезание подмножества объектов для создания нового слоя;
- анализ близости объектов, включая построение буферных зон;
- наложение слоев.

В принципе, в рамках пространственного анализа может быть рассмотрен любой масштаб – как региональный, так и локальный. Необходима только нужная детализация инфраструктурных элементов в рамках выбранного масштаба. Для рассматриваемой далее территории Западной Якутии с помощью программных модулей, написанных на языке Python [5], и модулей QGIS [4, 6, 7, 10] рассчитаны региональные «матрицы удалённости». Алгоритм расчёта для рассматриваемой территории следующий. Область размером 1700 км на 650 км разбивается на 60x60 расчётных точек и для каждой точки вычисляется удаленность до ближайшего инфраструктурного элемента – реки, автодороги или ЛЭП. Затем по полученным расчётным точкам производится интерполяция на всю расчётную область и строится карта - матрица удаленности

Рассматриваются несколько вариантов расчёта удаленности. Совместно все три указанных ранее элемента, по два и для каждого по отдельности (рис. 1). Для совместных расчётов

вес каждого инфраструктурного элемента считается одинаковым. Для всех вариантов, позволяющих учитывать инфраструктурные элементы как совместно (суперпозиция), так и по отдельности, рассчитаны матрицы удаленности.

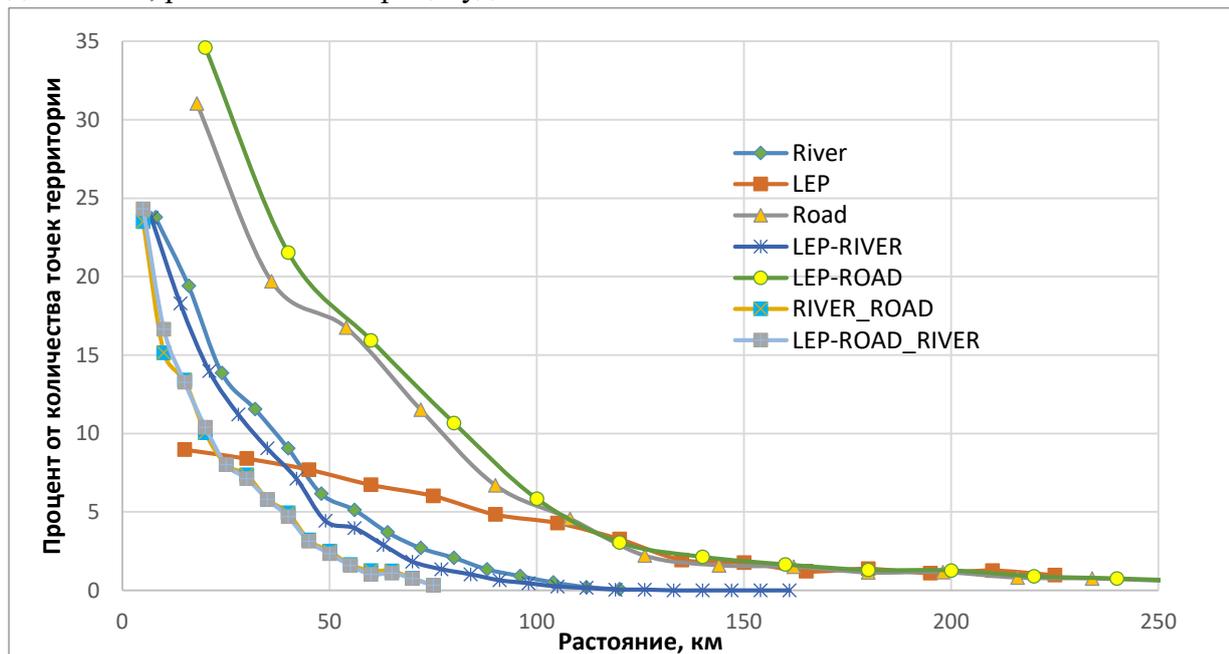


Рис. 1. Статистика распределения удаленности от основных инфраструктурных объектов

Далее приводятся результаты расчёта, показанные в виде матриц удаленности. Под матрицами удаленности здесь понимается характеристика каждой точки расчётной области с точки зрения ее удаленности (расстояния) для ближайшего инфраструктурного объекта - реки, автодороги, линии электропередач.

Результаты расчёта удаленности рассматриваемой территории от структурных элементов в виде матрицы удаленности показаны ниже (рис. 2 - рис. 4).

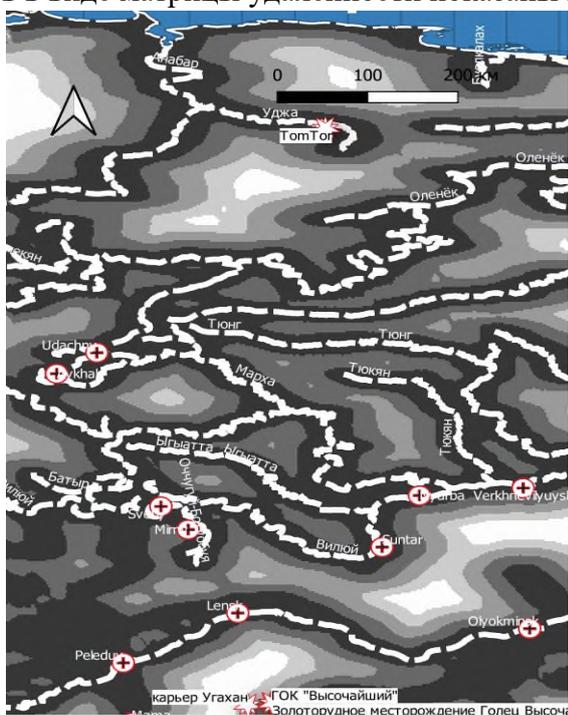


Рис. 2. Результаты расчёта удаленности для структурных элементов «Реки»

Статистика расчёта удаленности для структурных элементов «Реки» (рис. 2) такова, что всего 24% расчётных точек удалены от рек менее чем на 7 км. Остальные точки распределены так, что удалённости составляют от 7 до 115 км. Большое количество белых участков (удаленностей >100 км) отмечаются в юго-восточной и северной части, где речная сеть слабо развита. Присутствие вблизи месторождения Томтор реки Уджа делает его «временно» доступным, т.е. в зимнее время, когда существует возможность транспортировки по автозимникам – замерзшим руслам рек. В случае отсутствия такой возможности в летний период этот район перестает быть доступным.

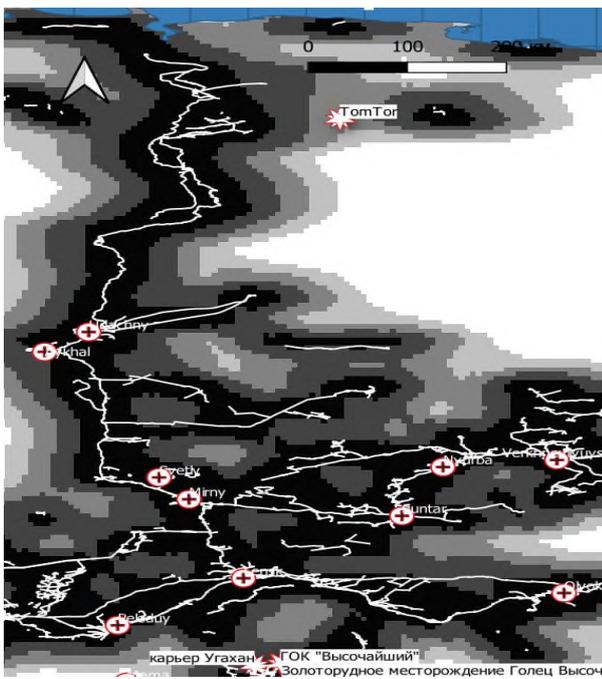


Рис. 3. Результаты расчёта удаленности для структурных элементов «Дороги»

Матрицы удаленности для структурных элементов «ЛЭП» приведены на рис. 4.

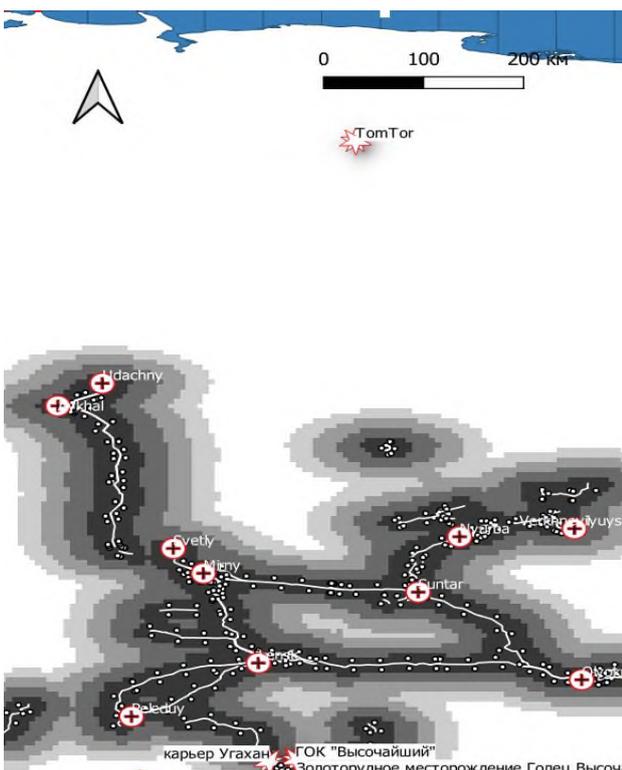


Рис. 4. Результаты расчёта удаленности для структурных элементов «ЛЭП»

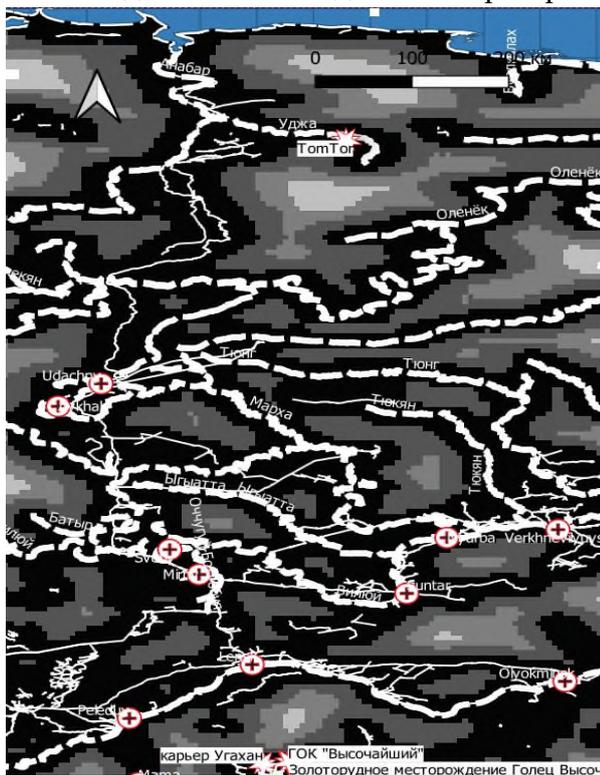
Для совмещенных расчётов результаты приведены на рисунках 5а) - 5д) Если посмотреть на статистику (рис. 1) процентного распределения расчётных точек, то можно отметить следующее. В совмещенных расчётах превалирует тот структурный элемент, который находится ближе; в основном это реки. В ряде случаев, когда ЛЭП расположена вдоль автодорог, статистические распределения совмещенных расчётов (где присутствует ЛЭП) практически

На рис. 3 показаны результаты расчёта для структурных элементов «Дороги».

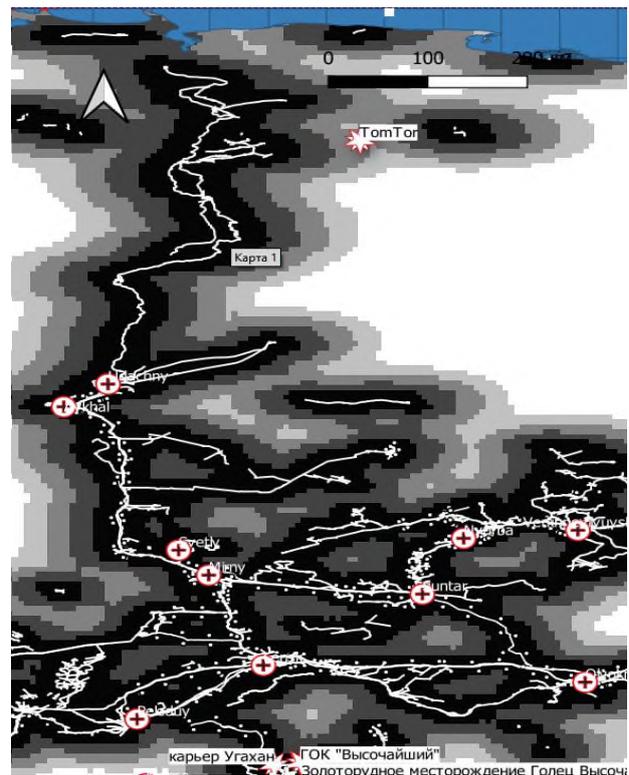
Статистика удаленности для этого расчёта такова, что <30% расчётных точек удалены от дорог менее, чем на 18 км. Остальные точки распределены так, что удалённости составляют от 18 до 250 км. Большое количество белых участков (удаленностей >100 км) отмечается в восточной части, где сеть автодорог не развита совсем.

В основном линии электропередач проходят вдоль автодорог (в иллюстрации накладываются друг на друга). Только в юго-восточной части существует ветка ЛЭП без автодорог. В основном ЛЭП сосредоточены в южной части расчётной области и заканчиваются в районе города Удачный. Севернее этого места ЛЭП нет и везде отмечаются белые участки. Статистика удаленности для этого расчёта (рис. 2в) такова, что 9% расчётных точек удалены от ЛЭП менее, чем на 15 км. Остальные точки распределены так, что удалённости составляют от 7 до 250 км. Сеть ЛЭП слабо развита в северной части расчётной области.

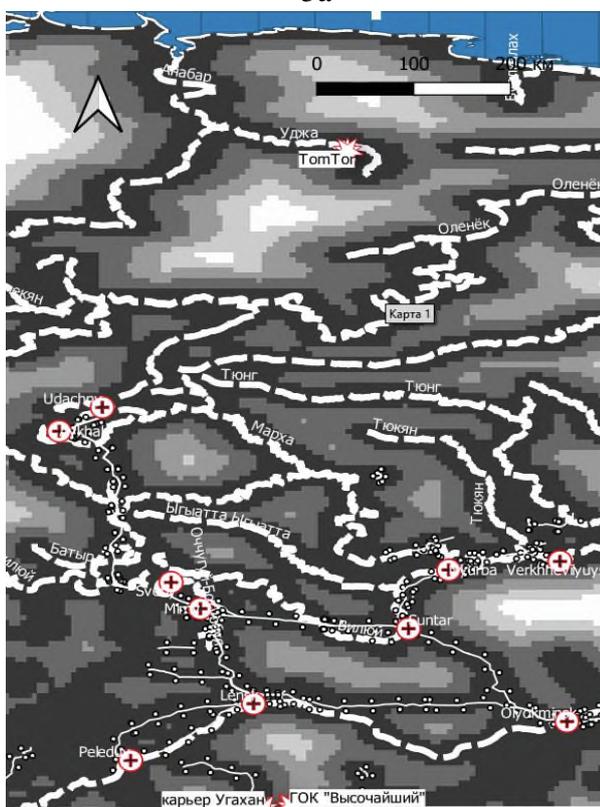
совпадают с расчётами остальных структурных элементов, где ЛЭП нет. В плане энергообеспечения, реки и дороги можно рассматривать в единой связке с ЛЭП как линии доставки топлива для локальных дизельгенераторов.



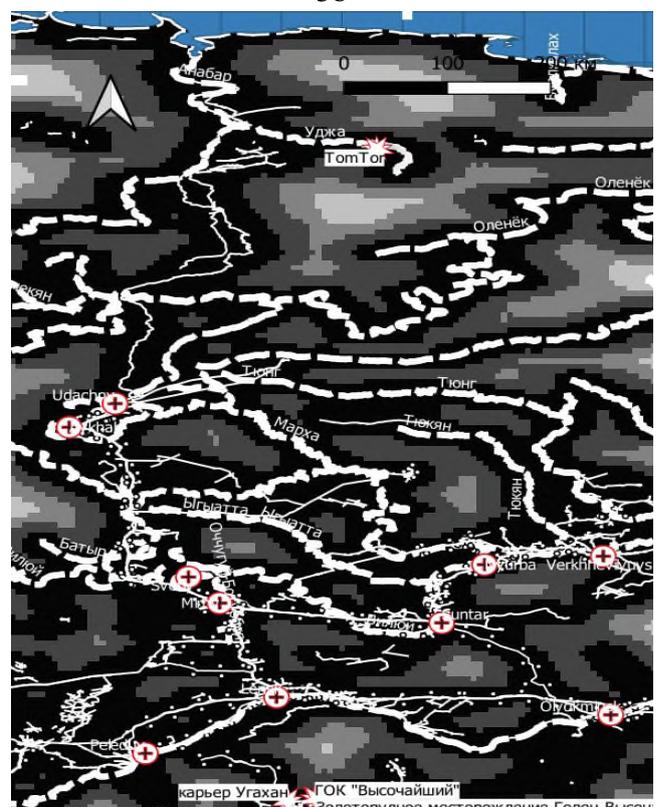
5а



5б



5с



5д

Рис. 5. Результаты расчёта удаленности рассматриваемой территории от структурных элементов.

а) реки и дороги, б) ЛЭП и реки, в) ЛЭП и автодороги, д) ЛЭП, автодороги и реки.

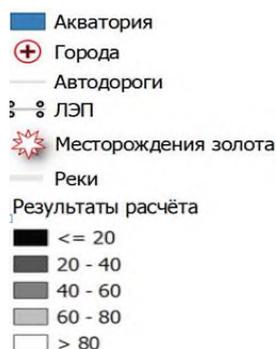


Рис 6. Условные обозначения для рис.2 - рис.5

Представленный анализ первоначально имел своей целью оценить перспективность территорий для размещения новых автономных атомных энергоисточников – АЭС малой мощности, поскольку доставка топлива по линии северного завоза в удаленные пункты до сих пор сопряжена с повышенными расходами и рисками, и с течением времени трудности только усугубляются.

Следует учесть, что реки в рассмотренном регионе могут быть использованы в качестве транспортных артерий только в зимний период («зимники»); в летний период они несудоходны. Сильные снегопады, туманы и ледяной дождь несут риск сделать недоступными автодороги из-за образования гололедицы или снежных препятствий; снегопад или ледяной дождь – к обрушению опор ЛЭП и прекращению передачи электроэнергии на каком-то участке либо по всей сети.

Выводы. Работа носит прикладной характер. С помощью разработанного инструментария для выбранного региона «месторождение Томтор» определена удаленность от объектов транспортной и логистической инфраструктуры. Предложенный алгоритм оценки удалённости чувствителен к виду структурных объектов и зависит от линейного расположения рек, автодорог и линий электропередач.

Результаты расчётов и их графическое представление помогут в принятии решений по стратегии освоения региона и оценке различных рисков на начальных этапах хозяйственного освоения территорий.

Дальнейшие расчёты позволят наметить стратегию расположения новых энергетических установок. Расчёты могут быть использованы для оценки удаленности от ЛЭП для вновь создаваемых энергообъектов, в частности, АЭС малой мощности. Очевидно, что при введении новых энергоисточников и сетей энергоснабжения количество инфраструктурно не обеспеченных территориальных «белых пятен» будет снижаться. С помощью разработанного инструментария можно также оценить удаленности от структурных объектов для регионов с более богатой инфраструктурой и для них выявить наличие «белых пятен». Это поможет оценить риски, например, при выходе из строя энергетической системы либо остановки транспортного сообщения.

В качестве численных величин при сравнительной многопараметрической оценке [9 - 12] нескольких точечных местоположений предложено использовать кратчайшие расстояния до объектов инфраструктуры. Эти характеристики также могут быть использованы при оценке экономического эффекта, например, изменения себестоимости электроэнергии в регионе в случае введения нового энергоисточника или локальной изолированной энергосистемы в сравнении с комбинированной доставкой дизельного топлива в рамках северного завоза.

Благодарности. Работа выполняется при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ №2222 от 23.10.2020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / Н.И. Пяткова, В.И. Рабчук, С.М. Сендеров и др. Новосибирск: Наука, 2011. 211 с.
2. Алексеев П.Н., Субботин С.А., Стукалов В.А., Щепетина Т.Д. Система атомных станций малой мощности как фактор национальной безопасности // Академия энергетики. 2015. № 2 (64). С. 74-79.
3. Новаковский Б. А., Прасолова А. И., Карпачевский А. М., Филиппова О. Г. Картографирование структуры изолированных энергосистем (на примере Камчатского края, Магаданской и Сахалинской областей) // Геодезия и картография. 2017. Т. 78. № 5. С. 56–63. DOI: 10.22389/0016-7126-2017-923-5-56-63.
4. Домашняя страница приложения QGIS 3.0. Режим доступа: <https://qgis.org/ru/site/> (дата обращения: 27.05.2021).
5. Домашняя страница языка программирования Python 3.7. Режим доступа: <https://www.python.org/downloads/release/python-370/> (дата обращения: 27.05.2021).
6. Всемирная система геодезических параметров Земли (Система координат WGS 84) Режим доступа: <https://geostart.ru/post/324#> (дата обращения: 20.05.2021).
7. Система координат Режим доступа: <https://epsg.io/4326> (дата обращения: 20.05.2021).
8. Лахина Е.Р., Томакова Р.А. Технология пространственного анализа данных в геоинформационных системах. / Программная инженерия: современные тенденции развития и применения (ПИ-2020). Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 30-летию создания кафедры программной инженерии. 2020.
9. Шихов А.Н., Черепанова Е.С., Пьянков С.В. Геоинформационные системы: методы пространственного анализа: учеб. пособие. Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2017. 88 с.
10. Векторный формат географических файлов Режим доступа: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/sitecore-archive/Files/Pdfs/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf> (дата обращения: 20.05.2021).
11. Шакиров В.А., Панкратьев П.С. Методика многокритериального двухуровневого анализа пунктов размещения электростанций // Искусственный интеллект и принятие решений. 2017. №1. С. 69-83.
12. Елтаренко Е.А. Методы оценки и выбора инженерных и управленческих решений. Учебное пособие. Москва. МИФИ. 1987. 54с.
13. Перминов Г.И. Метод выделения общности в альтернативах и критериях в задачах принятия решений // Социология науки и технологий. 2011. Том 2. №2. С. 90-104.
14. Подиновский В.В, Потапов М.А. Метод взвешенной суммы критериев в анализе многокритериальных решений: PRO ET CONTRA // Бизнес-информатика. №3 (25). 2013. С. 41-48.

**APPLICATION OF A GEOINFORMATION SYSTEM
FOR ASSESSING THE INFRASTRUCTURE ACCESSIBILITY OF REGIONS
FROM THE PERSPECTIVE OF LAND USE PLANNING AND DEVELOPMENT**

Ivan A. Rastorguev

Ph.D., senior researcher, e-mail: rastorguev_ia@nrcki.ru

Tatiana D. Shchetina

Ph.D., head of laboratory "Perspective Concepts" e-mail: Shchetina_TD@nrcki.ru

Andrey L. Balanin

senior researcher, e-mail: Balanin_AL@nrcki.ru

National Research Center "Kurchatov Institute",
123182, Moscow, sq. Kurchatova, 1.

Abstract. The analytical GIS program is intended for the purposes of a multi-parameter assessment of transport and energy infrastructure availability, potential for mining, incl. energy resources, as well as availability of alternative renewable energy sources in a certain geographic location, promising from point of requirement for energy production deployment, located in remote or inaccessible regions of Russia; for the purposes of strategic planning of the development of regions, the development of new territories, incl. deposits of various resources. Practical application of GIS makes it possible to increase the efficiency of the strategic decision-making process.

Keywords: GIS, Python, QGIS, Arctic territories of the Russian Federation, infrastructure, nuclear energy, optimization.

Acknowledgments: The work is carried out with the support of the National Research Center "Kurchatov Institute" (order №. 2222 dated 23.10.2020).

REFERENCES

1. Jenergeticheskaja bezopasnost' Rossii: problemy i puti reshenija [Energy security of Russia: problems and solutions] / N.I. Pyatkova, V.I. Rabchuk, S.M. Senderov and others. Novosibirsk: Nauka= Novosibirsk: Science. 2011. 211 p. (in Russian)
2. Alekseev P.N., Subbotin S.A., Stukalov V.A., Shchetina T.D. Sistema atomnyh stancij maloj moshchnosti kak faktor nacional'noj bezopasnosti [The system of small nuclear power plants as a factor of national security] // Akademiya energetiki = Energy Academy. 2015. № 2 (64). Pp. 74-79 (in Russian)
3. Novakovskiy B.A., Prasolova A.I., Karpachevskiy A.M., Filippova O.G. Kartografirovaniye struktury izolirovannykh energosistem (na primere Kamchatskogo kraya, Magadanskoj i Sahalinskoj oblastej) [Cartography of the structure of isolated power systems (on the example of the Kamchatka Territory, Magadan and Sakhalin regions)] // Geodeziya i kartografiya = Geodesy and Cartography. 2017. Vol. 78. № 5. Pp. 56-63. DOI: 10.22389 / 0016-7126-2017-923-5-56-63 (in Russian)
4. Home page of the QGIS 3.0 application. Available at: <https://qgis.org/ru/site/> (accessed 05.27.2021) (in Russian)
5. Home page of the Python programming language 3.7. Available at: <https://www.python.org/downloads/release/python-370/> (accessed 27.05.2021) (in Russian)
6. World system of geodetic parameters of the Earth (Coordinate system WGS 84). Available at: <https://geostart.ru/post/324#> (accessed 27.05.2021) (in Russian)

7. Coordinate system. Available at: <https://epsg.io/4326> (accessed 20.05.2021) (in Russian)
8. Lahina E.R., Tomakova R.A. Tekhnologiya prostranstvennogo analiza dannyh v geoinformacionnyh sistemah. [Spatial data analysis technology in geographic information systems.] / Programmaya inzheneriya: sovremennye tendencii razvitiya i primeneniya (PI-2020). Sbornik materialov IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 30-letiyu sozdaniya kafedry programmnoj inzhenerii = Software Engineering: Current Trends in Development and Application (PI-2020). Collection of materials of the IV All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 30th anniversary of the creation of the Department of Software Engineering. 2020 (in Russian)
9. Shihov A.N., Cherepanova E.S., P'yankov S.V. Geoinformacionnye sistemy: metody prostranstvennogo analiza: ucheb. posobie [Geographic information systems: methods of spatial analysis: a tutorial]. Perm. gos. nac. issled. un-t. Perm'. 2017. 88 p. (in Russian)
10. Vector format of geographic files. Available at: <https://www.esri.com/content/dam/esrisites/sitecore-archive/Files/Pdfs/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf> (accessed 20.05.2021) (in Russian)
11. Shakirov V.A., Pankrat'ev P.S. Metodika mnogokriterial'nogo dvuhurovneвого analiza punktov razmeshcheniya elektrostancij [Methodology for multicriteria two-level analysis of power plant locations] // Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshe-nij = Artificial intelligence and decision making. 2017. №1. Pp. 69-83 (in Russian)
12. Eltarenko E.A. Metody ocenki i vybora inzhenernyh i upravlencheskih reshenij. Uchebnoe posobie [Methods for evaluating and choosing engineering and management solutions. Tutorial]. Moskva. MIFI. 1987. 54 p. (in Russian)
13. Perminov G.I. Metod vydeleniya obshchnosti v al'ternativah i kriteriyah v zadachah prinya-tiya reshenij [The method of identifying commonality in alternatives and criteria in decision-making problems] // Sociologiya nauki i tekhnologij = Sociology of Science and Technology. 2011. Vol 2. № 2. Pp. 90-104. (in Russian)
14. Podinovskij V.V., Potapov M.A. Metod vzveshennoj summy kriteriev v analize mnogokriterial'nyh reshenij: PRO ET CONTRA [Weighted sum of criteria method in the analysis of multicriteria decisions: PRO ET CONTRA] // BIZNES-INFORMATIKA. № 3 (25). 2013. Pp. 41-48. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 10.07.2021; одобрена после рецензирования 29.08.2021; принята к публикации 28.09.2021.

The article was submitted 10.07.2021; approved after reviewing 29.08.2021; accepted for publication 28.09.2021.

УДК 004.021 (620.9:502.7)

**ИНФОРМАЦИОННОЕ НАПОЛНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ**

Майсюк Елена Петровна

к.э.н., с.н.с. лаборатории энергоснабжения децентрализованных потребителей,
e-mail: maysyuk@isem.irk.ru

Иванова Ирина Юрьевна

к.э.н., в.н.с., зав. лабораторией энергоснабжения децентрализованных потребителей,
e-mail: nord@isem.irk.ru

Иванов Роман Андреевич

к.т.н., н.с. лаборатории энергоснабжения децентрализованных потребителей,
e-mail: crowndriver@gmail.com

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 130.

Аннотация. В статье сформирована последовательность выполнения действий по определению экологических характеристик функционирования объектов энергетики. Приведены показатели энергообъектов и справочные данные, необходимые для получения промежуточных показателей этапов исследований. Дано описание расчетных моделей определения массы выбросов в атмосферу загрязняющих веществ и парниковых газов и массы образующихся золошлаковых отходов. Модели разработаны на основе утвержденных методик для тепловых электростанций, котельных и дизельных электростанций. Показано, что технологии расчетов экологических характеристик для каждой категории энергообъектов зависят от вида сжигаемого топлива и типа используемого оборудования. Выполнена систематизация информации для моделей определения экологических характеристик функционирования энергетических объектов. Вся необходимая информация представлена в виде трех крупных блоков: характеристика населенных пунктов; показатели энергообъектов; справочные данные по видам топлива, энергетическому и улавливающему оборудованию. Приведено подробное описание показателей каждого блока информации. Показана зависимость перечня определяемых экологических характеристик энергообъектов от вида сжигаемого топлива. Обозначены источники информации и доступность получения показателей каждого блока.

Ключевые слова: загрязняющие вещества, парниковые газы, золошлаковые отходы, технология расчетов, систематизация информации, справочные данные, показатели энергообъектов.

Цитирование: Майсюк Е.П., Иванова И.Ю., Иванов Р.А. Информационное наполнение моделей определения экологических характеристик функционирования объектов энергетики// Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3 (23). С. 49-61. DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.005.

Введение. Наибольшее влияние на природную среду среди энергообъектов оказывают объекты генерации электрической и тепловой энергии. К экологическим характеристикам таких энергообъектов относятся расчетные значения массы выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, парниковых газов, в частности, углекислого газа (CO₂), а также массы золошлаковых отходов, образующихся от сжигания твердых топлив.

Среди объектов генерации энергии с экологических позиций можно выделить три категории: крупные тепловые электростанции (ТЭС, ТЭЦ), котельные и дизельные электростанции, поскольку расчет экологических характеристик для них несколько различается. В зависимости от категории энергообъекта и его технических характеристик разработаны модели определения массы выбросов в атмосферу и массы отходов, в основу которых положены утвержденные методики расчета. Для крупных тепловых электростанций используется методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных уста-

новок ТЭС (РД 34.02.305-98) [1]. Для котельных – методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 т пара в час или менее 20 Гкал в час [2 – 4]. Для дизельных электростанций – методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных дизельных установок [5]. Для определения выбросов парниковых газов - методические указания Министерства природных ресурсов России по количественному определению объема выбросов парниковых газов (Приказ № 300 от 30.06.2015 г. [6]. В основе определения количества золошлаковых отходов от энергообъектов лежит метод материально-сырьевого баланса [7] и рекомендации по оценке отходов энергетических предприятий в виде суммы шлака и уловленной в золоулавливающих установках золы [8 – 9].

В общем виде последовательность выполнения действий по определению экологических характеристик функционирования объектов энергетики приведена на рис. 1. Предварительно, в зависимости от категории энергообъекта и мощности оборудования, выбираются методика и соответствующая ей расчетная модель. Информацию, необходимую для определения экологических характеристик функционирования энергообъектов, можно подразделить на две группы: показатели исследуемых объектов и справочные данные (рис.1).

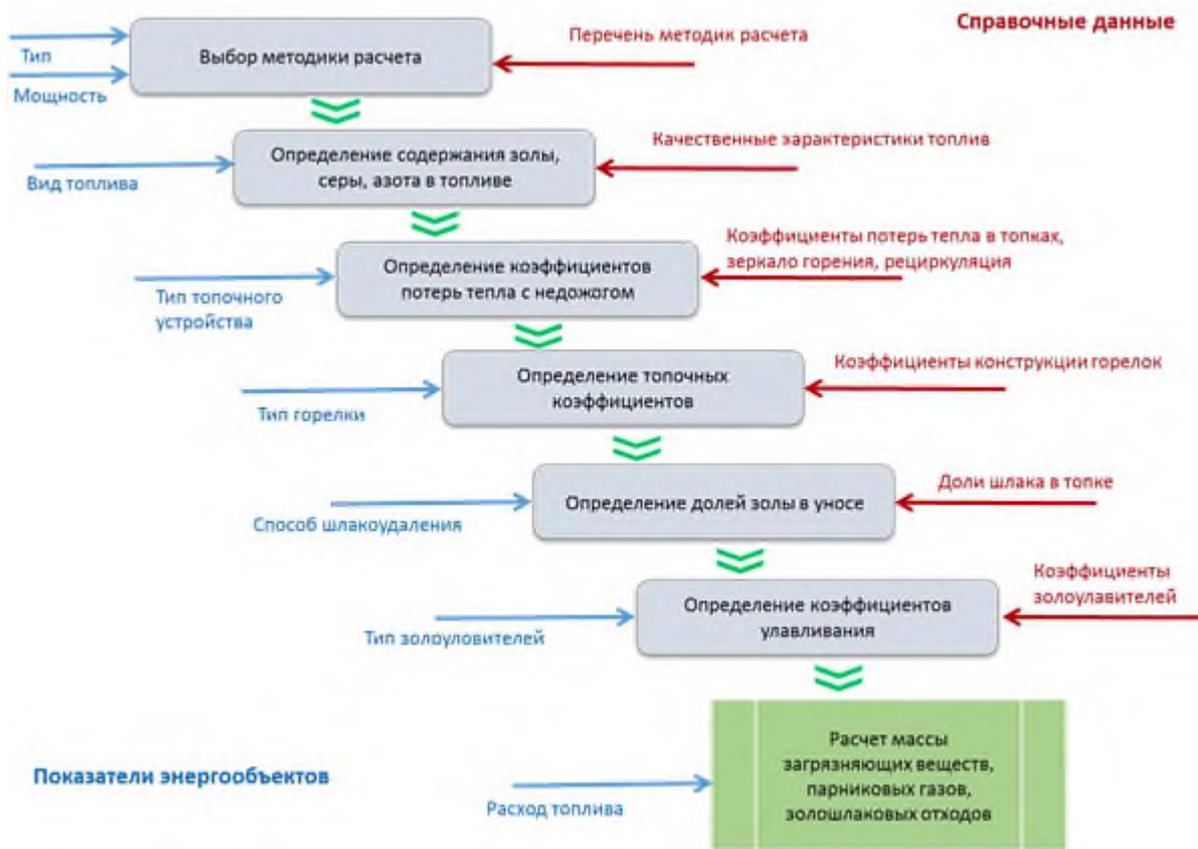


Рис. 1. Последовательность выполнения действий по определению экологических характеристик функционирования объектов энергетики

По виду используемого на энергообъекте топлива из справочных данных определяется его качественный состав. Перечень качественных характеристик топлив подробно описан в [10]. В зависимости от типа горелки и топочного устройства энергообъекта устанавливаются топочные коэффициенты и коэффициенты потерь тепла, от способа шлакоудаления – доли золы в уносе и доли шлака в топке. Затем по типу золоуловителей и их состоянию назначается степень улавливания. В завершение, исходя из расхода топлива, рассчитываются масса выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферу и масса золошлаковых от-

ходов. Технология расчета зависит от категории энергоисточника, типа оборудования, вида сжигаемого топлива и перечня выходных показателей.

1. Описание расчетных моделей. Для определения массы выбросов в атмосферу и массы образующихся отходов для каждой категории энергообъектов разработана расчетная модель, в которой в зависимости от вида используемого топлива предусмотрена определенная последовательность действий и перечень исходных данных, от которых зависит конечный результат.

1.1 Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. В модели определения массы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от ТЭС и котельных реализованная технология расчета в зависимости от вида топлива и типа оборудования приведена на рис. 2. Модель включает три основных блока: топливо, оборудование и непосредственно расчет выбросов. В блоке *топливо* задается вид сжигаемого топлива, для которого определяются качественные характеристики, и объем его потребления.

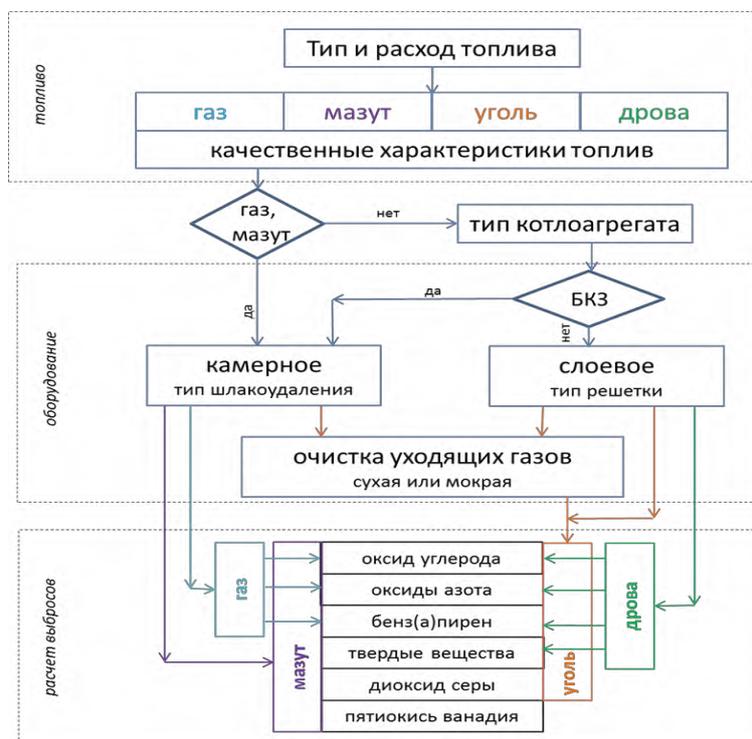


Рис. 2. Технология расчета массы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от ТЭС и котельных

Блок *оборудование* содержит информацию об энергетическом оборудовании, используемом для получения тепловой или электрической энергии. В зависимости от способа сжигания топлив (камерного или слоевого) выбираются справочные данные по рекомендуемым значениям топочных характеристик, как для котельных установок со слоевым сжиганием топлив, так и для электростанций с камерным (пылевидным). К топочным характеристикам относятся потери тепла с химическим, механическим недожогом топлива в топке, доля золы в уносе, коэффициент потери тепла из-за неполного выгорания топлива, коэффициенты учета типов горелок и типа золошлакоудаления. Участие топочных характеристик и коэффициентов в расчете массы различных загрязняющих веществ подробно представлено в [10].

Наряду с энергетическим оборудованием в данном блоке предусматривается назначение показателей установок по очистке уходящих газов. Данные о степени улавливания вредных примесей очистными устройствами непосредственно влияют на конечный результат – масса выбросов загрязняющих веществ.

В блоке *расчет выбросов* с использованием всех исходных данных осуществляется сам расчет на основе методик с использованием математических зависимостей с подробным набором основных показателей. В приведенной на рис. 2 технологии расчета указан перечень выходных данных в зависимости от вида сжигаемого топлива. Так, при сжигании газа расчет выбросов в атмосферу проводится для трех загрязняющих веществ: оксида углерода (CO), оксидов азота (NOx) и бенз(а)пирена. При сжигании угля рассчитываются выбросы пяти загрязняющих атмосферу веществ: оксида углерода (CO), оксидов азота (NOx), бенз(а)пирена, твердых веществ, диоксида серы (SO₂). От сжигания дров – то же, что и от угля, за исключением диоксида серы (SO₂). Наибольшее количество загрязняющих веществ образуется при сжигании мазута – шесть ингредиентов, где наряду с вредными веществами, как от угольного сжигания в атмосферу, поступает зола мазута с содержанием в ней пятиоксида ванадия (V₂O₅), а к твердым веществам отнесен расчет сажи.

Реализованная в модели оценки количественных показателей выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от дизельных электростанций, технология расчета в зависимости от мощностной группы и наработанного моторесурса оборудования представлена на рис. 3.

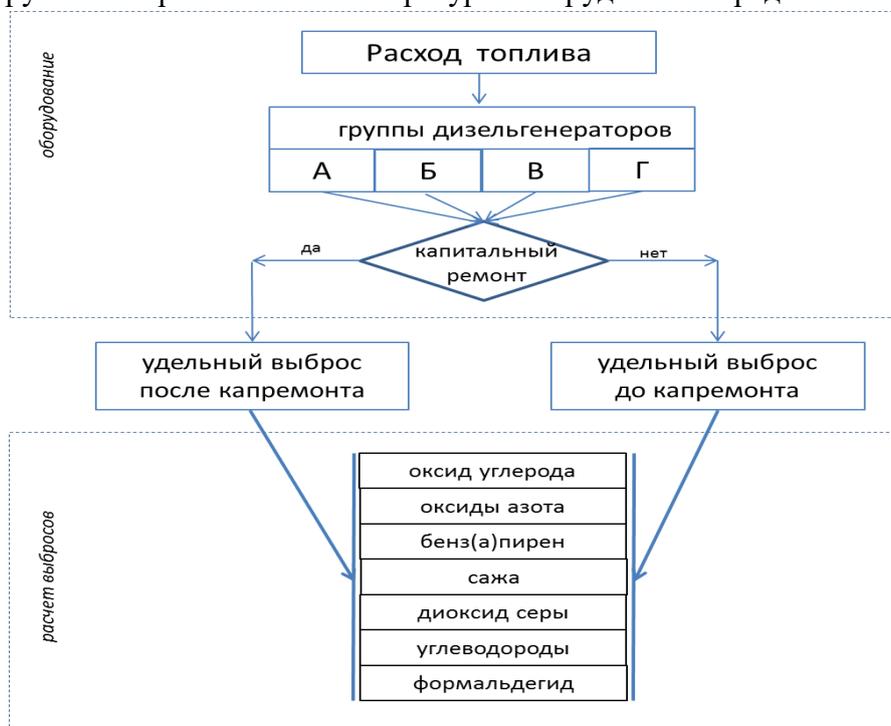


Рис. 3. Технология расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от дизельных электростанций

В блоке *оборудование* осуществляется не только ввод расхода дизельного топлива, но и указание мощности дизельгенераторов, которые, в соответствии с методикой расчета выбросов от ДЭС [5], подразделены на четыре группы: А – маломощные, быстроходные дизельгенераторы или дизель-электрический агрегат; Б – средней мощности, средней быстроходности и быстроходные (автоматизированный дизель-электрический агрегат); В – мощные, средней быстроходности (буровой агрегат, дизельгенератор ДГ-400); Г – мощные, повышенной быстроходности, многоцилиндровые. В основе методики заложены значения удельных выбросов в атмосферу для семи загрязняющих веществ (см. рис. 3) в зависимости от проведения капитального ремонта оборудования.

1.2 Выбросы парниковых газов в атмосферу. В моделях определения экологических характеристик всех категорий энергообъектов предусмотрена технология расчета выбросов парниковых газов, в частности CO₂, в зависимости от вида топлива (рис. 4).

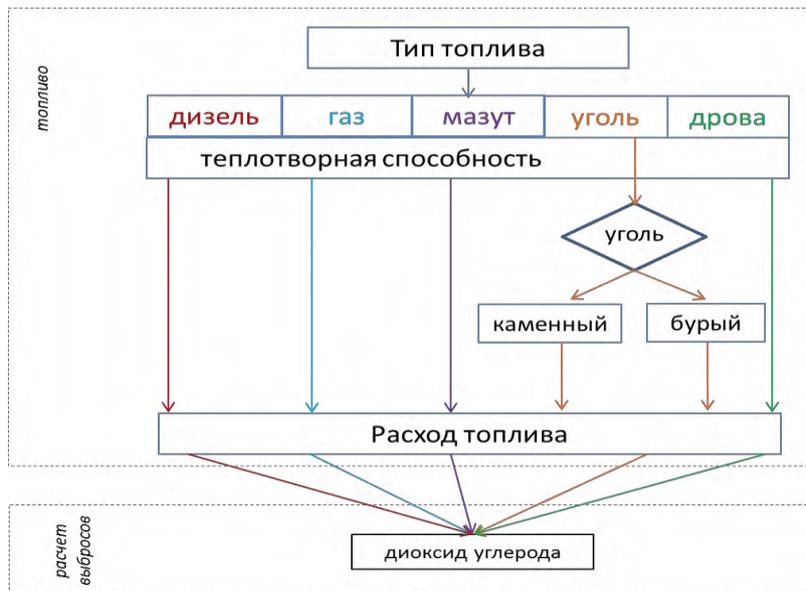


Рис. 4. Технология расчета массы выбросов диоксида углерода в атмосферу от всех категорий энергообъектов

Представленная технология расчета выбросов парниковых газов (CO₂) достаточно простая, поскольку зависит только от вида топлива, его теплотворной способности и суммарного расхода на производство тепловой и/или электрической энергии.

1.3 Образующиеся золошлаковые отходы. В моделях определения экологических характеристик ТЭС и котельных реализована технология расчета массы золошлаковых отходов (ЗШО), представленная в общем виде на рис. 5.

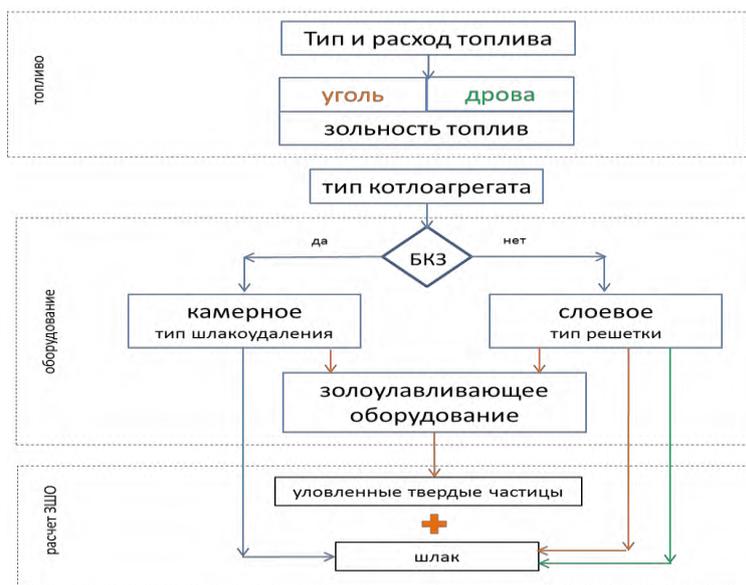


Рис. 5. Технология расчета массы золошлаковых отходов от ТЭС и котельных, сжигающих твердое топливо

Как и в случае с расчетом выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, расчет массы золошлаковых отходов предполагает три основных блока. При этом расчет предусмотрен лишь для энергообъектов различной мощности, сжигающих твердое топливо (уголь и дрова). Важное значение в данном расчете имеет функционирование золоулавливающего оборудования, поскольку, в зависимости от степени улавливания твердых золовых частиц, масса зо-

лошлаковых отходов будет изменяться: чем больше уловили, тем большее количество ушло в отходы.

2. Информационное наполнение моделей. В общем виде всю информацию, необходимую для определения экологических характеристик функционирования энергетических объектов, можно представить в виде трех крупных блоков с характеристикой населенных пунктов, показателями энергообъектов и справочными данными по качественным характеристикам топлива, энергетическому и улавливающему оборудованию. Агрегировано связи между блоками показаны на рис. 6.

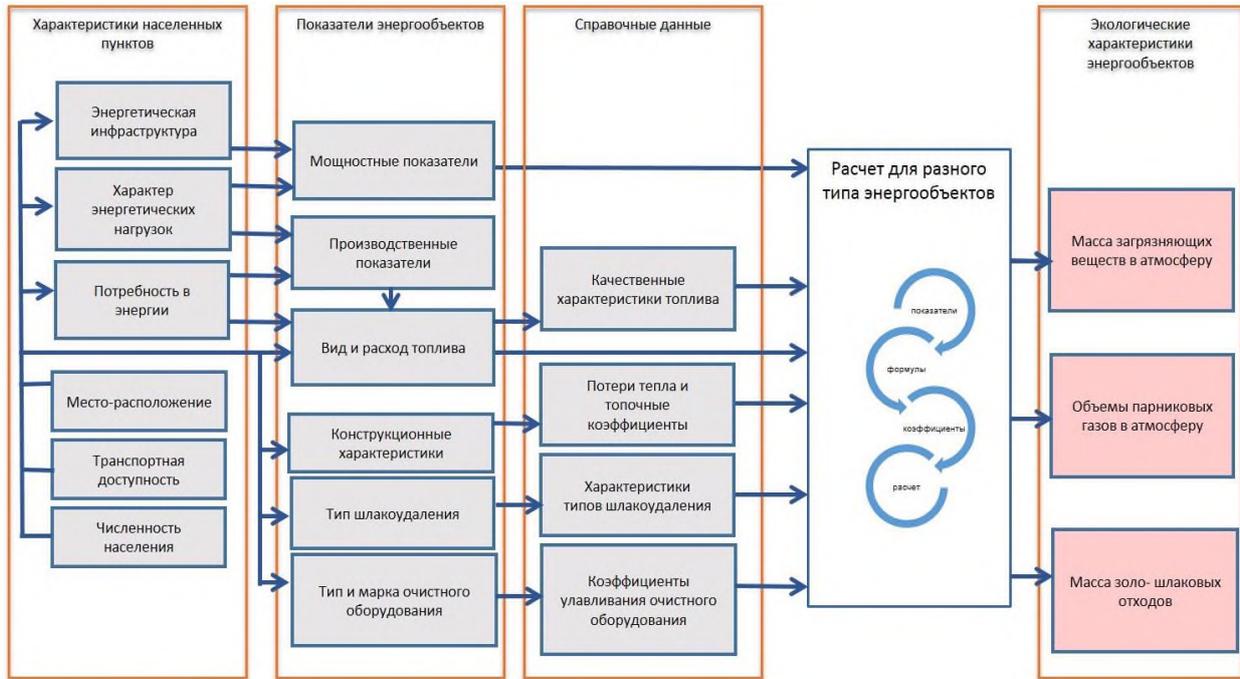


Рис. 6. Связи между блоками информации для определения экологических характеристик функционирования энергообъектов

Более подробно всю необходимую информацию для определения экологических характеристик в соответствии с технологиями расчетов можно подразделить на несколько блоков: Б1 «Характеристика населенного пункта», Б2 «Производственно-технические показатели энергообъектов», Б3 «Сведения об используемом топливе», Б4 «Показатели процесса сжигания», Б5 «Характеристика природоохранного оборудования» и Б6 «Расчетные экологические показатели» (рис. 7).

Блок Б1 включает в себя основные составляющие, характеризующие каждый населенный пункт: субъект РФ, административный район, название, координаты месторасположения, наличие или отсутствие автомобильных и железных дорог, численность населения, объем потребления тепловой и электрической энергии, максимум нагрузок.

Блок Б2 включает общие сведения обо всех энергоисточниках, функционирующих в конкретном населенном пункте: состав и тип оборудования, установленная мощность, производство тепловой и электрической энергии. Энергоисточники могут быть подразделены на группы объектов, сжигающих различные виды органического топлива (уголь, газовое топливо, древесное топливо, мазут). Кроме того, для котельных и тепловых электростанций указываются тип и марка котлоагрегатов, номинальная и фактическая паро- и теплопроизводительность котлов, тип топочного устройства, конструкция горелок, тип шлакоудаления и золоулавливающего оборудования. Для дизельных электростанций дополнительной информацией служат тип двигателей, износ оборудования, моторесурс наработки, число цилиндров, число оборотов, сведения о капитальных ремонтах.



Рис. 7. Информационное наполнение блоков моделей для определения экологических характеристик функционирования энергообъектов

Блок B3 содержит данные о качественных характеристиках различных типов (марок) топлива. Например, уголь бурый или каменный, мазут топочный малосернистый, среднесернистый или высокосернистый и т.д. Для углей указывается месторождение. Качественный состав и технические характеристики топлива, сжигаемого на энергетических объектах, включают: зольность, содержание серы, азота, углерода, водорода, кислорода, влажность, теплотворную способность, количество ванадия в 1 т мазута, доля серы, связываемая летучей золой в топке и гранулометрический состав.

Блок B4 охватывает сведения о способе сжигания топлива, конструкции горелок, типе топочного оборудования и пр., которые позволяют определить необходимые для расчета показатели, характеризующие процесс сжигания топлив. К таким показателям относятся: химический и механический недожог топлива, доля золы в уносе, доля шлака в топке, коэффициент избытка воздуха, коэффициенты, учитывающие конструкцию горелки, тип шлакоудаления, качество топлива, избыток воздуха, ступенчатый ввод воздуха в топку, а также площадь зеркала горения в топке, тепловое напряжение зеркала горения и топочного объема, объем топочной камеры, коэффициент, учитывающий влияние очистки поверхностей нагрева котла, коэффициент типа колосниковой решетки и вида топлива, степень рециркуляции уходящих газов, коэффициент, учитывающий рециркуляцию газов, коэффициент, характеризующий схему подачи воздуха в топку, доля воздуха, подаваемого в промежуточную зону факела, доля ванадия, оседающего с твердыми частицами на поверхностях нагрева.

Блок B5 включает данные о характеристиках очистного оборудования, производительности и степени улавливания загрязняющих веществ из уходящих газов котельной установки. В перечень показателей этого блока включены данные: тип и марка очистного оборудования, степень золоулавливания, степень улавливания мазутной золы, доля оксидов серы, уловленная в мокром золоуловителе, доля оксидов серы, уловленная в сероулавливающих установках, коэффициент улавливания бенз(а)пирена в золоуловителях, доля оксидов азота, уловленная в установках по связыванию азота, эффективность природоохранных технологий ДЭС.

Блок B6 содержит выходные расчетные показатели, включающие массу выбросов в атмосферу от объектов энергетики твердых частиц, оксидов серы, азота, углерода, бенз(а)пирена в зависимости от сжигаемого топлива. В состав загрязняющих веществ от ди-

зельных электростанций дополнительно включены формальдегид, углеводороды и сажа. Кроме того, в качестве выходных показателей выступают выбросы парниковых газов от стационарного сжигания в виде углекислого газа. В блоке Б6 определяется также и масса образующихся золошлаковых отходов от сжигания твердых топлив. Расчетные экологические характеристики объектов энергетики в зависимости от сжигаемого топлива представлены в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные экологические характеристики объектов энергетики в зависимости от видов сжигаемого топлива

Экологическая характеристика	Вид сжигаемого топлива
Твердые частицы	уголь, древесное топливо, мазут
Оксиды серы	уголь, мазут, дизельное топливо
Оксиды азота	уголь, древесное топливо, мазут, дизельное топливо, природный газ
Оксид углерода	
Диоксид углерода	
Бенз(а)пирен	уголь, древесное топливо, мазут, дизельное топливо
Формальдегид	дизельное топливо
Углеводороды	
Сажа	уголь, дизельное топливо, мазут
Мазутная зола в пересчете на пятиокись ванадия	мазут, нефть
Масса золошлаковых отходов	уголь, древесное топливо

Для информационного наполнения моделей определен источник информации каждого показателя и его доступность. Для показателей блока Б2 по крупным энергоисточникам из форм статистической отчетности и годовых отчетов генерирующих компаний можно получить некоторые основные показатели, экологические характеристики содержатся в обязательных экологических паспортах предприятий. Для объектов коммунальной энергетики (котельным и дизельным электростанциям) подобная информация в статистике не отражается. Паспорта ЖКХ муниципальных образований, данные министерств субъектов РФ и эксплуатирующих организаций чаще всего содержат противоречивую информацию, вследствие чего получить достоверные сведения возможно лишь при обследовании таких энергообъектов на местах. Кроме того, можно пользоваться данными статистической отчетности, официальными сайтами, годовыми отчетами генерирующих компаний. Эта информация требует постоянного обновления и мониторинга.

Набор показателей о качественных и технических характеристиках топлива в блоке Б3, как правило, представлен в зависимости от месторождений и содержится в справочной литературе, например, [11-15]. Для месторождений, данные по которым отсутствуют в справочниках, подобную информацию возможно получить непосредственно на месте использования по сертификатам топлива.

Информация для блока Б4 о способе сжигания топлива представлена справочными данными о топочных характеристиках котельных агрегатов, о конструкции горелочных устройств, типе шлакоудаления. Эта информация содержится в Методиках расчета и нормативном методе теплового расчета котельных агрегатов [5-9].

Справочная информация для блока Б5 о характеристиках очистного оборудования содержится в паспортных данных энергообъекта, а также в различных каталогах и статистических сборниках [16-18].

Заключение. Исходя из анализа утвержденных методик, сформирована последовательность выполнения действий для определения экологических характеристик функционирования объектов энергетики, которая позволила выделить показатели энергообъектов и справочные данные, необходимые для получения промежуточных показателей этапов исследований. При структурировании технологий расчета массы выбросов в атмосферу загрязняющих веществ и парниковых газов, и массы образующихся золошлаковых отходов для тепловых электростанций, котельных и дизельных электростанций выявлены основные влияющие показатели. Перечень экологических характеристик и сами технологии их расчета для разных категорий энергообъектов зависят от вида сжигаемого топлива и типа используемого оборудования.

При функционировании энергетических объектов необходимо иметь информацию не только по конкретной территории и конкретным предприятиям, но и справочные данные по показателям энергетических и природоохранных технологий. На основе проведенной систематизации информации, необходимой для наполнения моделей, выделены три крупных блока: характеристика населенных пунктов, показатели энергообъектов и справочные данные. Справочные данные можно подразделить на качественные характеристики топлива, показатели процесса сжигания и параметры улавливающего оборудования.

Проведенная систематизация информации, анализ разработанных расчетных моделей, структурирование технологий расчета экологических характеристик энергетических объектов позволят в дальнейшем сформировать базу данных и описать алгоритмы для автоматизации процесса вычисления.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта №075-15-2020-787 в виде субсидии на крупный научный проект Министерства науки и высшего образования России «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС. РД 34.02.305-98/ВТИ. М. 1998.
2. 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. М.: Гос. комитет по охране окружающей среды Российской Федерации (при участии фирмы «Интеграл», Санкт-Петербург). 1999. 53 с.
3. Методическое письмо НИИ Атмосфера №335/33-07 от 17 мая 2000 г. «О проведении расчетов выбросов вредных веществ в атмосферу по «Методике определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час». СПб.:НИИ Атмосфера. 2000. 20 с.
4. Письмо НИИ Атмосфера № 838/33-07 от 11.09.2001. СПб.:НИИ Атмосфера.
5. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных дизельных установок. СПб. 2001. 18 с.
6. Приказ Минприроды России от 30.06.2015 № 300 Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации. Режим доступа: https://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=1740 (дата обращения: 20.07.2020).

7. Об утверждении отдельных методических документов в области охраны окружающей среды. Приказ министерства охраны окружающей среды Республики Казахстан от 18 апреля 2008 г. №100-п. Режим доступа: <http://new.ecogofond.kz/wpcontent/uploads/100-ves.pdf> (дата обращения: 24.10.2018).
8. Назмеев Ю.Г. Системы золошлакоудаления ТЭС. М.: Изд-во МЭИ. 2002. 572 с.
9. Сидельковский Л.Н., Юренев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат. 1988. 528 с.
10. Майсюк Е.П., Иванова И.Ю. Анализ существующих методов оценки воздействия энергетических объектов на окружающую среду // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. №4(12). С. 113-127. DOI: 10.25729/2413-0133-2018-4-12.
11. Вдовченко В.С. Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий природный газ). Справочник. М.: Энергоатомиздат. 1991. 184 с.
12. Качественные характеристики угольной продукции России. Информационно-справочное издание. М.: Росинформуголь. 2006. 258 с.
13. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Под ред. Н.В. Кузнецова и др. М.: Энергия. 1973. 296 с.
14. Сведения о технических характеристиках углей, добываемых ООО «Компания «Востсибуголь». Режим доступа: <http://www.aovsu.ru/products/specification.asp> (дата обращения: 24.03.2021).
15. Алехнович А.Н. Характеристики и свойства энергетических углей. Челябинск: Цицеро. 2012. 549 с.
16. Очистка выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух при производстве продукции (товаров), а также при проведении работ и оказании услуг на крупных предприятиях. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (ИТС 22-2016). Федеральное агентство по Техническому регулированию и метрологии: Бюро НДТ. М. 2016. 212 с.
17. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (ИТС 38-2017). Федеральное агентство по Техническому регулированию и метрологии: Бюро НДТ. М. 2017. 280 с.
18. Справочник по удельным показателям выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для некоторых производств – основных источников загрязнения атмосферы. НИИ Атмосфера. МСЦ-В. СПб. 2001. С.26-27.

**INFORMATION CONTENT OF MODELS FOR DETERMINING THE
ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS
OF THE ENERGY FACILITIES FUNCTIONING**

Elena P. Maysyuk

PhD of economy,

Senior researcher of the Laboratory of energy supply for distributed consumers,

e-mail: maysyuk@isem.irk.ru

Irina Yu. Ivanova

PhD of economy, Head of the Laboratory of energy supply for distributed consumers,

e-mail: nord@isem.irk.ru

Roman A. Ivanov

PhD in engineering, Researcher of the Laboratory of energy supply for distributed consumers,

e-mail: crowndriver@gmail.com

Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
664033, Irkutsk, Russia, Lermontov Str., 130.

Abstract. The article forms a sequence of actions to determine the environmental characteristics of the functioning of energy facilities. The indicators of energy facilities and reference data required to obtain intermediate indicators of research stages are presented. A description of the models for determining the mass of emissions of pollutants and greenhouse gases into the atmosphere and the mass of ash and slag waste are described. The models are developed on the basis of approved methodologies for thermal power plants, boiler houses and diesel power plants. It is shown that technologies for calculating environmental characteristics for each category of energy facilities depend on the type of fuel burned and the type of equipment used. The systematization of information for models to determining the environmental characteristics of the functioning of energy facilities has been carried out. All the necessary information is presented in the form of three large blocks: characteristics of settlements; indicators of energy facilities; reference data on types of fuel, energy and capture equipment. A detailed description of the indicators of each block of information is given. The dependence of the list of determined environmental characteristics of energy facilities on the type of burned fuel is shown. The sources of information and the availability of obtaining indicators for each block are indicated.

Keywords: calculation technology, pollutants, greenhouse gases, ash and slag waste, systematization of information, reference data, indicators of energy facilities.

Acknowledgements: The work was supported by the grant №075-15-2020-787 in the form of a subsidy for a Major scientific project from Ministry of Science and Higher Education of Russia «Fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation on the Baikal natural territory».

REFERENCES

1. Metodika opredeleniya valovykh vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu ot kotel'nykh ustanovok TES [Methodology for determining gross emissions of pollutants into the atmosphere from boiler plants of thermal power plants.]. RD 34.02.305-98/VTI. M. 1998 (in Russian)
2. Metodika opredeleniya vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu pri szhiganii topliva v kotlakh proizvoditel'nost'yu meneye 30 tonn para v chas ili meneye 20 Gkal v chas. M.: Gos. komitet po okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy federatsii [He methodology for determining emissions of pollutants into the atmosphere when burning fuel in boilers with a capacity of less than 30 tons of steam per hour or less than 20 Gcal per hour.

- М.: State. Committee on Environmental Protection of the Russian Federation]. 1999. 53 p. (in Russian)
3. Metodicheskoye pis'mo NII Atmosfera №335/33-07 ot 17 maya 2000 g. «O provedenii raschetov vybrosov vrednykh veshchestv v atmosferu po «Metodike opredeleniya vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu pri szhiganii topliva v kotlakh proizvoditel'nost'yu menee 30 tonn para v chas ili menee 20 Gkal v chas» [Methodical letter of the Research Institute of Atmosphere № 335 / 33-07 of May 17, 2000 “On the calculation of emissions of harmful substances into the atmosphere according to the“ Methodology for determining emissions of pollutants into the atmosphere when burning fuel in boilers with a capacity of less than 30 tons of steam per hour or less 20 Gcal per hour ”]. SPb.: NII Atmosfera = Research Institute Atmosphere. 2000. 20 p. (in Russian)
 4. Pis'mo NII Atmosfera № 838/33-07 ot 11.09.2001. [Letter of the Atmosphere Research Institute № 838/33-07 dated 11.09.2001]. SPb.: NII Atmosfera = Research Institute Atmosphere (in Russian)
 5. Metodika rascheta vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv v atmosferu ot stacionarnykh dizel'nykh ustanovok [Methodology for calculating emissions of pollutants into the atmosphere from stationary diesel installations]. SPb. 2001. 18 p. (in Russian)
 6. Prikaz Minprirody Rossii ot 30.06.2015 № 300 Ob utverzhdenii metodicheskikh ukazaniy i rukovodstva po kolichestvennomu opredeleniyu ob"ema vybrosov parnikovyykh gazov organizatsiyami, osushchestvlyayushchimi hozyajstvennyuyu i inuyu deyatel'nost' v Rossijskoj Federacii [Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation № 300 of 30.06.2015 On the Approval of Methodological Guidelines and Guidelines for the Quantitative Determination of Greenhouse Gas Emissions by Organizations Engaged in Economic and Other Activities in the Russian Federation]. Available at: https://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=1740 (accessed 20.07.2020) (in Russian)
 7. Ob utverzhdenii otдел'nykh metodicheskikh dokumentov v oblasti ohrany okruzhayushchej sredy. Prikaz ministerstva ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Kazahstan ot 18 aprelya 2008 g. № 100-p. [On approval of separate methodological documents in the field of environmental protection. Order of the Ministry of Environmental Protection of the Republic of Kazakhstan of April 18, 2008 № 100-p.]. 2008. Available at: <http://new.ecogofond.kz/wp-content/uploads/100-ves.pdf> (accessed 24.10.2018) (in Russian)
 8. Nazmeev YU.G. Sistemy zoloshlakoudaleniya TEHS [Ash-and-slag removal systems of thermal power plants]. Moscow. Izd-vo MEI = MPEI Publishing House. 2002. 572 p. (in Russian)
 9. Sidelkovsky L.N., Yurenev V.N. Kotel'nye ustanovki promyshlennykh predpriyatij [Boiler installations of industrial enterprises]. Moscow. Energoatomizdat Publ. 3rd ed. 1988. 528 p. (in Russian)
 10. Maysyuk Ye.P., Ivanova I.YU. Analiz sushchestvuyushchikh metodov otsenki vozdeystviya energeticheskikh ob"ektov na okruzhayushchuyu sredu [Analysis of existing methods for assessing the impact of energy facilities on the environment] // Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2018. №4 (12). Pp. 113-127. DOI: 10.25729/2413-0133-2018-4-12 (in Russian)
 11. Vdovchenko V.S. Energeticheskoe toplivo SSSR (iskopaemye ugli, goryuchie slancy, torf, mazut i goryuchij prirodnyj gaz): Spravochnik [Energy fuel of the USSR (fossil coals, oil

- shale, peat, fuel oil and combustible natural gas): Reference book]. M.: Energoatomizdat, 1991. 184 p. (in Russian)
12. Kachestvennye harakteristiki ugol'noj produkcii Rossii. Informacionno-spravochnoe izdanie. [Qualitative characteristics of coal products in Russia. Information and reference edition]. M.: Rosinformugol' = Rosinformugol, 2006. 258 p. (in Russian)
 13. Teplovoj raschet kotel'nyh agregatov (Normativnyj metod) [Thermal calculation of boiler units (Standard method)]. M.: Energiya – Energy. 1973. 296 p. (in Russian)
 14. Svedeniya o tekhnicheskikh harakteristikah uglej, dobyvaemyh OOO «Kompaniya «Vostsibugol'». [Information about the technical characteristics of coals produced by LLC "Company "Vostsibugol"']. Available at: <http://www.aovsu.ru/products/specification.asp> (accessed 24.03.2021) (in Russian)
 15. Alekhnovich A.N. Harakteristiki i svoystva energeticheskikh uglej [Characteristics and properties of energy coals]. Chelyabinsk: Tsitsero = Pica. 2012. 549 p. (in Russian)
 16. Ochistka vybrosov vrednyh (zagryaznyayushchih) veshchestv v atmosferyj vozduh pri proizvodstve produkcii (tovarov), a takzhe pri provedenii rabot i okazanii uslug na krupnyh predpriyatiyah. Informacionno-tekhnicheskij spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam (ITS 22-2016) [Cleaning of emissions of harmful (polluting) substances into the atmospheric air during the production of products (goods), as well as during the work and provision of services at large enterprises. Information and Technical Guide to the best available Technologies (ITS 22-2016)]. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology: Bureau of NDT. M. 2016. 212 p. (in Russian)
 17. Szhiganie topliva na krupnyh ustanovkah v celyah proizvodstva energii. Informacionno-tekhnicheskij spravochnik po nailuchshim dostupnym tekhnologiyam (ITS 38-2017) [Fuel combustion in large installations for energy production. Information and Technical Guide to the best available Technologies (ITS 38-2017)]. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology: Bureau of NDT. M. 2017. 280 p. (in Russian)
 18. Spravochnik po udel'nyh pokazatelyam vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv v atmosferu dlya nekotoryh proizvodstv – osnovnyh istochnikov zagryazneniya atmosfery [Handbook on specific indicators of emissions of pollutants into the atmosphere for some industries – the main sources of atmospheric pollution]. Atmosphere Research Institute. MSC-V. SPb. 2001. Pp. 26-27 (in Russian)

Статья поступила в редакцию 08.07.2021; одобрена после рецензирования 26.08.2021; принята к публикации 28.09.2021.

The article was submitted 08.07.2021; approved after reviewing 26.08.2021; accepted for publication 28.09.2021.

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ИССЛЕДОВАНИЯХ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОТРАСЛЕЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ УГРОЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Массель Алексей Геннадьевич

к.т.н., с.н.с. отдела «Системы искусственного интеллекта в энергетике»

e-mail: amassel@isem.irk.ru

Мамедов Тимур Габирович

аспирант отдела «Системы искусственного интеллекта в энергетике»

e-mail: mamedowtymur@yandex.ru

Пяткова Наталья Ивановна

к.т.н., с.н.с. лаборатории «Надежность топливо- и энергоснабжения»

e-mail: nata@isem.irk.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130.

Аннотация. В работе представлен алгоритм проведения вычислительного эксперимента на примере реализации одной из угроз энергетической безопасности «Недостаток инвестиций в отрасли энергетике» с использованием когнитивных и экономико-математических моделей. Рассмотрены особенности включения инвестиционной составляющей в модель оптимизации вариантов развития ТЭК с учетом энергетической безопасности. Представлена когнитивная модель для анализа угрозы «Недостаток инвестиций в отрасли энергетике». Дается описание ПК ИНТЭК-А, обеспечивающего возможность интеграции когнитивных и математических моделей.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, угрозы энергетической безопасности, когнитивное моделирование, экономико-математическая модель.

Цитирование: Массель А.Г., Мамедов Т.Г., Пяткова Н.И. Технология вычислительного эксперимента в исследованиях работы энергетических отраслей при реализации угроз энергетической безопасности // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. №3(23). С. 62-73. DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.006.

Введение. В современных условиях планирования работы и развития энергосистем возрастают актуальность и значимость исследований проблем энергетической безопасности. Это прежде всего связано с высоким ущербом, а иногда с катастрофическими последствиями в случаях прерывания поставки энергоресурсов потребителям. Энергетическая безопасность касается двух аспектов [1-4]: необходимости долгосрочного бездефицитного обеспечения потребителей требуемыми видами энергоресурсов при функционировании энергетики в нормальных условиях, и необходимости создания условий для обеспечения энергоресурсами потребителей в условиях чрезвычайных ситуаций (вызванных реализацией угроз энергетической безопасности).

Как известно, реализация угроз энергетической безопасности приводит к значительному ущербу для экономики страны и регионов. Так, к примеру, снижение инвестиционных возможностей приводит к уменьшению уровней добычи нефти и газа в стране, к росту доли физически и морально устаревших основных производственных фондов в энергетических отраслях, к замедлению темпов снижения величины удельной энергоёмкости ВВП [2].

Снижение инвестиционных возможностей в целом по топливно-энергетического комплексу и отдельно прослеживается для электроэнергетики, газовой и угольной отраслей, а именно [5, 6]:

- в электроэнергетике сокращение инвестиций в 2020 году по сравнению с 2019 годом составило 5,8 %;
- в газовой отрасли инвестиции сократились на 12 %, при этом большая часть инвестиций распределяется в строительство новых магистральных трубопроводов;
- в угольной отрасли объем инвестиций носил переменный характер: в 2016 году они составили 44 % от уровня 2012 года, к 2019 году увеличились в 2 раза по сравнению с 2016, в 2020 снизились на 27% по сравнению с 2019 годом.

В случае природных угроз возможны отклонения максимальных сезонных отопительных нагрузок регионов в зависимости от их климатических условий, от состава потребителей в них вплоть до 20-30 %. Также отклонения могут сопровождаться значительным ростом спроса на энергоресурсы как для единой климатической зоны, так и нескольких соседних регионов.

Техногенные угрозы наиболее критичны для газовой отрасли и электроэнергетики. В системе газоснабжения одним из наиболее опасных фактором является возможность повреждения трансконтинентальных газопроводов, идущих из крупного газодобывающего района через Урал в европейскую часть России [2]. В электроэнергетике значительные недопоставки могут быть вызваны разрывами связей между отдельными энергосистемами или аварийными ситуациями на конкретных электростанциях (например, авария на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г., системная авария на энергообъектах Сибирского федерального округа из-за сбоя на Братской ГЭС в июне 2017 г.).

Что касается нефтедобывающей отрасли, то наблюдается отставание в воспроизводстве сырьевой базы нефтедобычи, которое сопровождается снижением коэффициента извлечения нефти (с 49% до 30% и ниже).

Сложившаяся структура топливно-энергетического баланса страны с доминирующей, а в ряде случаев почти монопольной, долей природного газа особенно в балансах котельно-печного топлива европейских районов России является серьезной стратегической угрозой ЭБ России. Опасность здесь состоит в том, что такая фактически моноструктура делает экономику европейской части России слишком зависимой от надежности поставок газа, добываемого и транспортируемого в основном из одного газодобывающего района и по одной системе трубопроводов.

Во всех отраслях ТЭК увеличивается доля оборудования, выработавшего свой ресурс (нормативный срок службы). Оно характеризуется высокой аварийностью, значительными затратами и продолжительностью ремонтов, низким техническим уровнем.

К настоящему моменту около 70 % *магистральных нефтепроводов* имеют возраст более 35 лет, при этом, несмотря на ввод новых нефтепроводов, качественного изменения не произошло: доля изношенного оборудования остается по-прежнему большой. В *газотранспортной системе* большинство трубопроводов были построены в 70-80-е годы прошлого столетия, т.е. находятся в эксплуатации более 30 лет. Крайне острой становится проблема износа производственных фондов *в электроэнергетике*. Суммарная мощность устаревшего оборудования на электростанциях страны составляет около 38 % от установленной мощности, износ электросетевого оборудования увеличился к 2020 году до 52%.

В силу невозможности проведения натурных экспериментов на работающих системах энергетики ТЭК особое значение приобретают исследования, связанные с моделированием этих систем, разработкой специализированных программно-инструментальных средств, рациональной организацией вычислительного эксперимента для поиска путей бездефицитного обеспечения потребителей энергоресурсами при функционировании в нормальных условиях и условиях нештатных ситуаций.

Современные условия развития информационных технологий, появление высокопроизводительных вычислительных средств, а также интеллектуализация систем энергетики и необходимость их функционирования в условиях цифровой экономики предъявляют, с одной стороны, особые требования к используемым модельно-вычислительным средствам. С другой – предоставляют возможности повысить адекватность и корректность моделирования реальных систем, учесть в моделях инерционность процессов, динамику развития аварийных ситуаций в моделях оптимизации систем энергетики ТЭК, нелинейность с точки зрения адекватности представления процессов в системах энергетики для повышения точности принимаемых решений.

Постановка задачи и алгоритм вычислительного эксперимента с использованием экономико-математической модели ТЭК. Данная работа является составной частью исследований энергетической безопасности, проводимых в отделе энергетической безопасности ИСЭМ СО РАН. Аналогичные исследования, разработки и модели для таких исследований ориентированы в основном на решение задач перспективного планирования работы энергетики в нормальных условиях функционирования с горизонтом до 15-20 лет. Подобные работы, проводимые в других коллективах, носят локальный или региональный характер с исследованием отдельных аспектов проблемы [7-17]. Комплексные же исследования, позволяющие оценить возможности взаимосвязанной работы всех энергетических отраслей и определить последствия для потребителей энергоресурсов при возникновении чрезвычайных ситуаций в работе одной отрасли или нескольких отраслей одновременно, ранее не выполнялись.

Исследования же, выполняемые в отделе энергетической безопасности ИСЭМ СО РАН, отличаются нацеленностью на решение задач оценки поведения систем энергетики в условиях реализации угроз энергетической безопасности, оптимизации режимов взаимосвязанной работы систем энергетики в условиях нештатных ситуаций для надежного энергоснабжения потребителей. По результатам проведенных исследований предлагается формировать определенный перечень мероприятий, позволяющих обеспечить уровень энергетической безопасности на соответствующем уровне.

Для проведения исследований по оценке влияния угроз энергетической безопасности на надежность энергоснабжения потребителей в условиях нештатных (критических) ситуаций в ИСЭМ СО РАН предлагается использовать двухуровневую технологию, интегрирующую этапы качественного анализа (с использованием инструментальных средств семантического моделирования) и количественного анализа (с использованием линейных экономико-математических моделей и традиционных программных комплексов) (рис.1) [18]. Применение методов когнитивного моделирования на уровне качественного анализа рассматривалось, в частности, в [19].

Для проведения комплексного эксперимента по анализу основной угрозы энергетической безопасности «Недостаток инвестиций в отрасли энергетики» предполагается совместное использование когнитивных моделей систем энергетики (газовой, угольной, электроэнергетики) и модели оптимизации вариантов развития ТЭК с учетом факторов энергетической безопасности.

Для первого этапа качественного уровня сформирована когнитивная модель угрозы «Недостаток инвестиций» для газовой отрасли (рис. 2).

На втором (количественном уровне) предлагается использовать экономико-математическую модель (ЭММ) для оптимизации вариантов развития ТЭК с учетом энергетической безопасности, описанную в [1, 4]. Модель объединяет блоки, моделирующие отраслевые подсистемы энергетического комплекса (газовой, угольной,

нефтеперерабатывающей (в части мазутоснабжения) отраслями, электро- и теплоэнергетикой).



Рис. 1. Схема взаимодействия задач и модельно-инструментальных средств

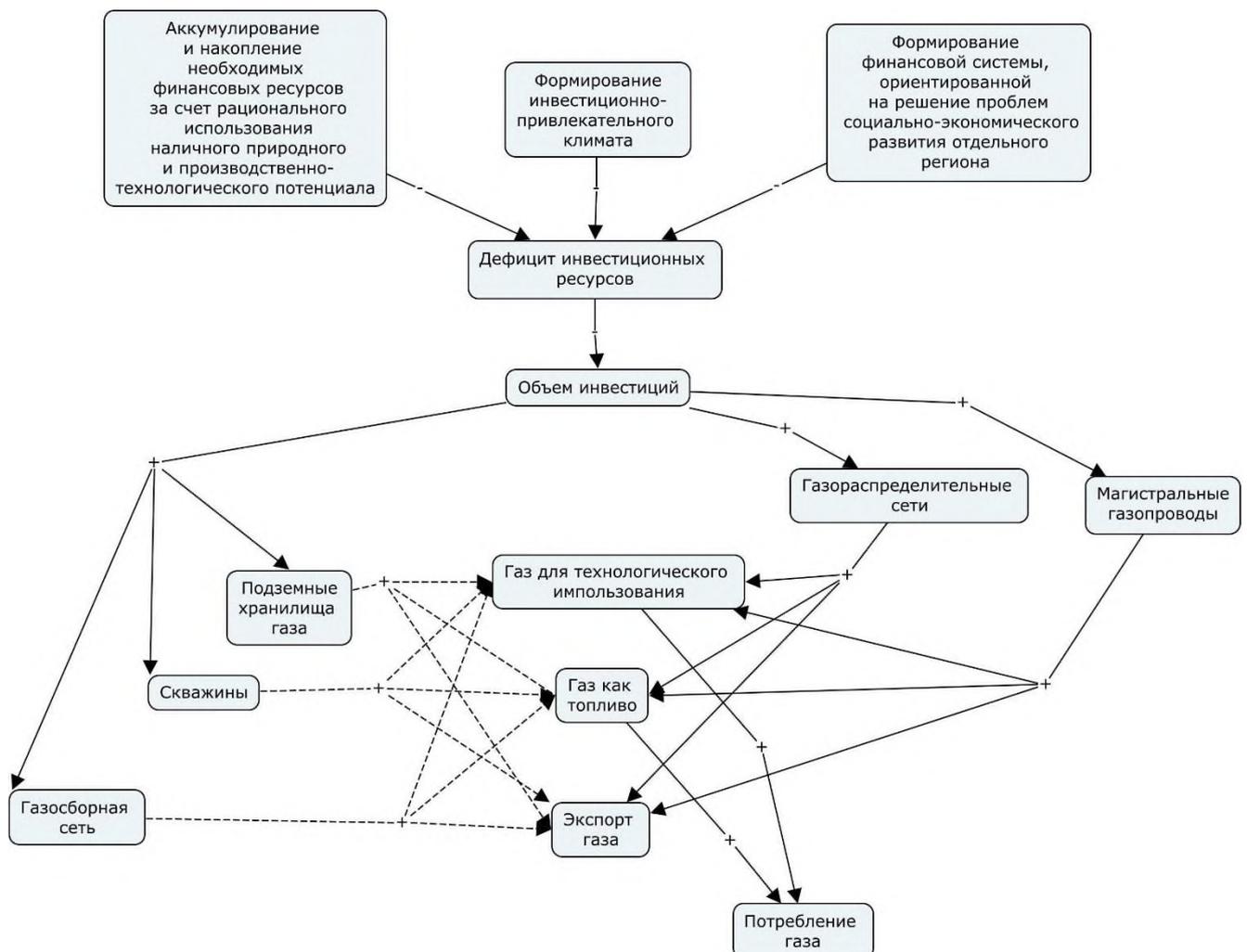


Рис. 2. Когнитивная карта угрозы «Недостаток инвестиций» для газовой отрасли

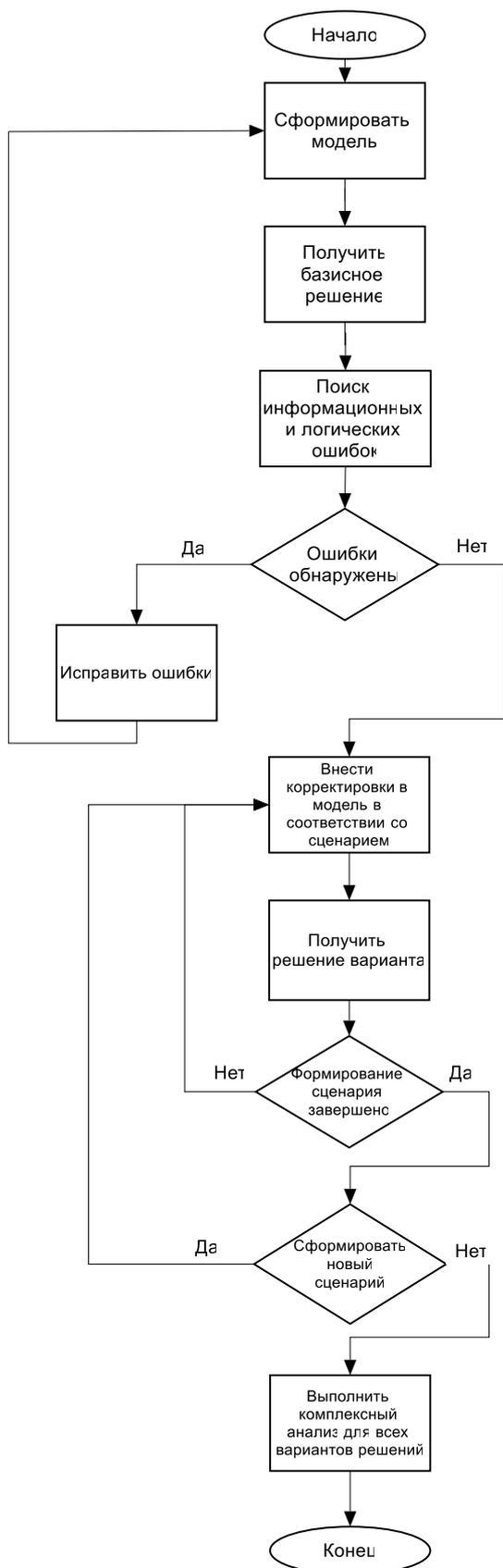


Рис. 3. Алгоритм вычислительного эксперимента с использованием ЭММ ТЭК.

Предложено существующий финансовый блок модели дополнить инвестиционными показателями на реконструкцию, модернизацию действующих мощностей, вывод устаревшего оборудования, ввод новых мощностей на объектах энергетических отраслей. Учет этих составляющих будет представлен в модели дополнительными уравнениями, описывающими удельные капиталовложения на единицу новых мощностей по всем технологическим этапам. Для выполнения вычислительного эксперимента с использованием ЭММ предлагается следующий алгоритм (рис. 3).

На основе когнитивных моделей отраслей энергетики формируется блок корректирующих коэффициентов для модели количественного уровня, который включает коэффициенты корректировки переменных, верхних ограничений и правых частей матрицы условий.

Предполагается проведение следующих этапов эксперимента:

1. Расчет инвестиций по всем энергетическим отраслям без внесения возмущений.
2. Расчет при заданных ограничениях на инвестиции (10%, 20% и т.д. на капвложения):
 - по отдельным отраслям;
 - по отдельным технологическим этапам (добыча-производство, транспорт).

В результате экспериментальных расчетов выявляется динамика складывающихся дефицитов у отдельных категорий потребителей по территории страны и по видам энергоресурсов.

Проведение оптимизационных расчетов проводится с использованием модифицированного программного комплекса «ИНТЭК-А».

Описание ПК «ИНТЭК-А». ПК «ИНТЭК-А» – это комплекс вычислительных программ для поддержки исследований направлений развития топливно-энергетического комплекса с учетом требований энергетической безопасности. ПК ориентирован на решение оптимизационных задач большой размерности методами линейного программирования, включая автоматизацию процессов обработки данных, выполнение расчетов в задачах моделирования и оптимизации развития систем энергетики и визуализацию результатов. Из-за перехода предыдущей версии ПК («ИНТЭК-М») [20, 21] в категорию унаследованного программного обеспечения было принято решение о реинжиниринге, результатом которого стала новая версия ПК «ИНТЭК-А». Особенности новой версии являются применение агентно-сервисного подхода для разработки архитектуры и ее реализации (рис. 4), интеграция в ПК инструмента когнитивного моделирования, а также использование современных технологий при разработке.

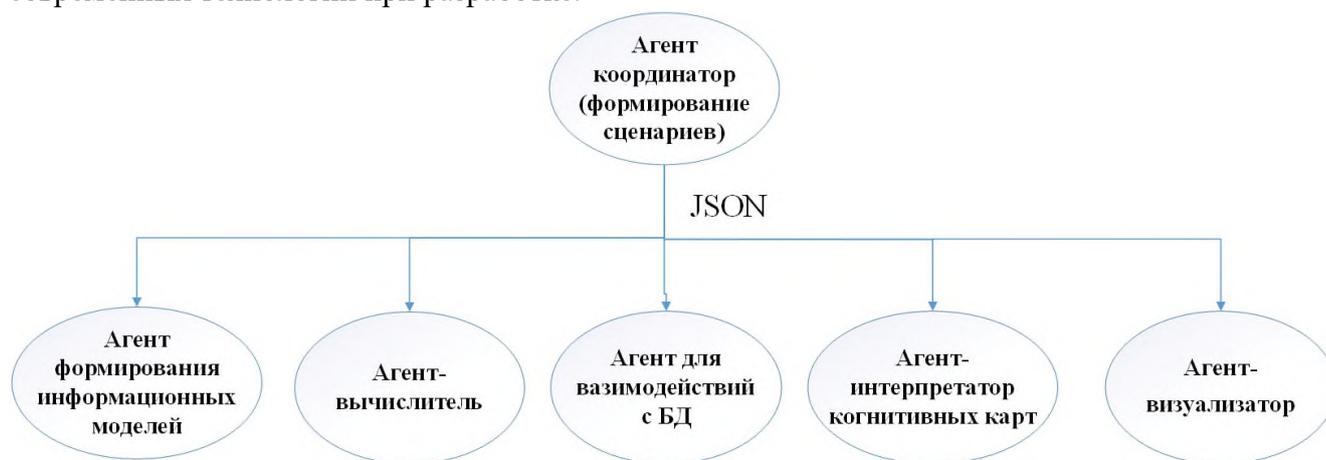


Рис. 4. Схема взаимодействия агентов в ПК «ИНТЭК-А»

Состав агентов:

- Главный агент ПК «ИНТЭК-А» – это **агент-координатор** (агент формирования сценариев). Его задача – задавать различные ситуации и формировать отдельные сценарии путем создания и наполнения технологических словарей, вызывать других агентов, обеспечивать контроль действий пользователя. Словари используются для отображения моделей на естественном языке. Агент частично поддерживает первый этап подготовки исходных данных.
- **Агент формирования информационных моделей** и внесения корректировок, необходим для удобной работы с информационными моделями. Этот агент включает возможности создания новых моделей посредством использования графического пользовательского интерфейса.
- **Агент-вычислитель** – в ядре агента расположена библиотека для решения общей задачи линейного программирования. Назначение агента – это поиск оптимальных значений переменных модели.
- **Агент для взаимодействий с базой данных** – обеспечивает взаимодействие с многофункциональной СУБД PostgreSQL, способной обрабатывать сложные запросы и поддерживать базы данных большого объема; СУБД бесплатная и содержит ряд полезных опций.
- **Агент – интерпретатор когнитивных карт** интегрирует экономико-математические и когнитивные модели. Агент позволит взаимодействовать с экономико-математическими моделями ТЭК через когнитивные карты и формировать

когнитивные карты по полученным балансовым оценкам. В [22] описан подход к решению проблемы управления знаниями, взятый за основу для разработки агента.

- **Агент визуализации вычислений** отвечает за визуализацию расчетов. Основной задачей этого агента является построение различных табличных отчетов и графиков, содержащих интересные исследователя показатели результатов вычислительного эксперимента, такие, как: балансы топливно-энергетических ресурсов по каждому району, группе районов и стране целом; межрайонные потоки различных видов топлива; оценки эффективности энергетических ресурсов и технологических способов.

ПК «ИНТЭК-А» предоставляет пользователю следующие функциональные возможности: формирование технологических словарей, информационных моделей ТЭК, сценария исследований; многокритериальные правки информационной модели ТЭК; выполнение оптимизационных расчетов; визуализация результатов оптимизации в виде балансовых таблиц или когнитивных карт. Примеры интерфейсов некоторых новых функциональных возможностей ПК «ИНТЭК-А» приведены на рис. 5-7.

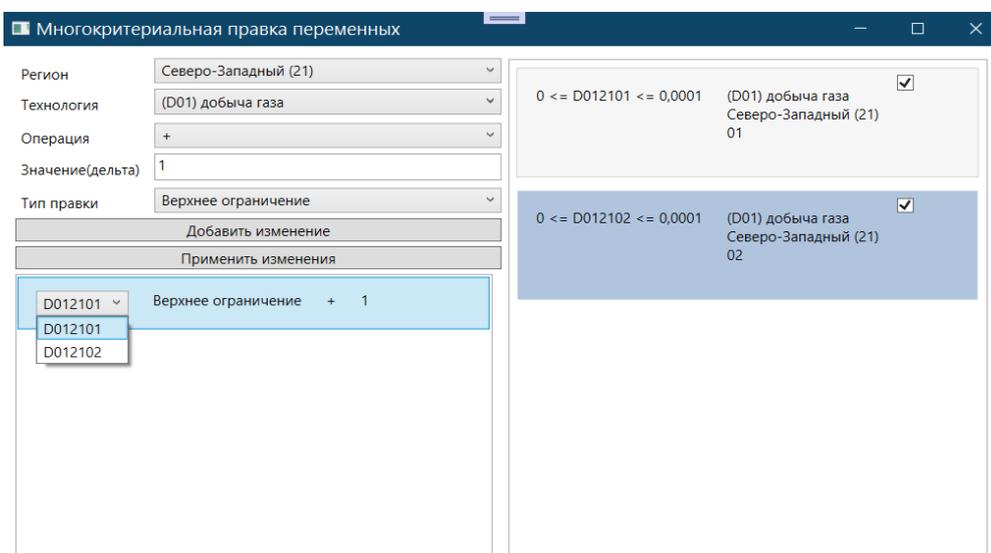


Рис. 5. Многокритериальные правки параметров переменных и линейных неравенств или уравнений (пример интерфейса)

Балансовая таблицы модели текущего шага:			Балансовая таблицы модели предыдущего шага:		
Район	э/энергия, млрд. кВт*ч	теплоэнергия, млн. Гкал	Район	э/энергия, млрд. кВт*ч	теплоэнергия, млн. Гкал
Северо-Западный (21)			Северо-Западный (21)		
КЭС действ.	0	0	КЭС действ.	15,7	0
КЭС новые	0	0	КЭС новые	0	0
ТЭЦ действ.	31,51	80	ТЭЦ действ.	30,72	78
ТЭЦ новые	0	0	ТЭЦ новые	0	0
АЭС действ.	80,6	0	АЭС действ.	38,68	0
ГЭС действ.	13,29	0	ГЭС действ.	12,8	0
ГЭС новые.	0,19	0	ГЭС новые.	0	0
Котельные	0	82	Котельные	0	68,1
Прочие источники	0	10	Прочие источники	0	9
Всего (тэ, ээ)	125,59	172	Всего (тэ, ээ)	97,9	155,1
Потребление	100,7	172	Потребление	92,9	155,1
Дефицит	20,09	0	Дефицит	0	0
Экспорт	4,8	0	Экспорт	5	0
Вывоз	0	0	Вывоз	0	0
Импорт	0	0	Импорт	0	0

Рис. 6. Сравнение балансовых оценок текущего шага с балансовыми оценками предыдущего шага

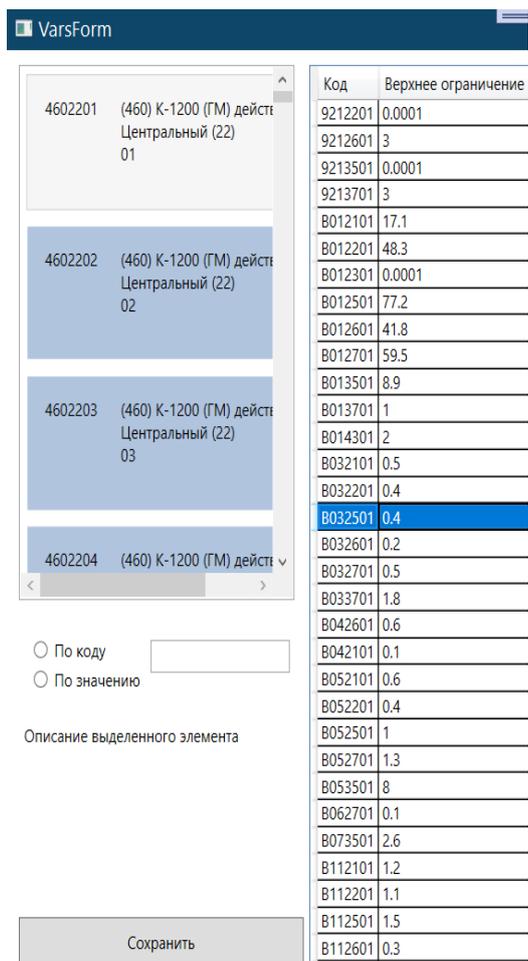


Рис. 7. Отображение верхних ограничений переменных и линейных неравенств или уравнений в виде таблиц, с возможностью редактирования через эти таблицы (формирование паттерна информационной модели)

Заключение. В статье представлены обоснование необходимости и постановка задачи выполнения вычислительных экспериментов для сценария реализации одной из угроз ЭБ – «Недостаток инвестиций в отрасли энергетики». Представлены общая схема взаимосвязи этапов качественного и количественного анализа и одна из когнитивных карт – когнитивная карта угрозы «Недостаток инвестиций» для газовой отрасли. Предложен алгоритм выполнения вычислительного эксперимента с использованием многоагентного программного комплекса ПК ИНТЭК-А, разработанного на основе реинжиниринга предыдущей версии ПК ИНТЭК-М. Рассмотрен состав агентов и функциональные возможности ПК, принципиальным отличием которого от предыдущих версий является интеграция в состав ПК инструментального средства когнитивного моделирования, что позволяет автоматизировать интеграцию семантических (когнитивных) и математических моделей. Визуализация расчетов в виде таблиц и когнитивных карт облегчает их интерпретацию.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания FWEU-2021-0001 № AAAA-A21-12101209007-7 программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП "Высокотемпературный контур" (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038), при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 19-07-00351, 20-08-00367.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев В.В., Воропай Н.И., Мастепанов А.М., Шафраник Ю.К. Энергетическая безопасность России. Новосибирск: «Наука». Сиб. издательская фирма РАН. 1999. 439 с.
2. Пяткова Н.И., Рабчук В.И., Сендеров С.М. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения. Новосибирск: Наука. 2011. 211 с.
3. Сендеров С.М., Рабчук В.И., Пяткова Н.И., Воробьев С.В. Обеспечение энергетической безопасности России: выбор приоритетов. Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние. Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Новосибирск: Наука. 2017. 116 с.

4. Pyatkova N., Krupenev D. Methodical aspects of the energy industries interconnected operation modeling at the energy security research under modern conditions E3S Web of Conferences 209, 06001 (2020) DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020906016>.
5. Итоги работы Минэнерго России и основные результаты функционирования ТЭК в 2018 году. Задачи на среднесрочную перспективу. Режим доступа: https://minenergo.gov.ru/prezentaciya_kollegiya_2019.pdf (дата обращения: 15.09.2021).
6. Итоги работы Минэнерго России и основные результаты функционирования ТЭК в 2012-2017 гг. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/11279/82618> (дата обращения: 15.09.2021).
7. Вавина Е. 20 лет электроэнергетики в России – от РАО «ЕЭС России» до либерализации рынка. Российская экономика 1999-2019. Спецпроект «Ведомостей» и «Эксперт РА». 09.12.2019 Ведомости. Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2019/12/10/818261-20-elektroenergetiki> (дата обращения: 15.09.2021).
8. Козлов М.В., Малашенко Ю. Е., Назарова И. А., Новикова Н.М. Управление топливно-энергетической системой при крупномасштабных повреждениях. Сетевая модель и программная реализация. Изв. РАН. Теория и системы управления. 2017. № 6. С. 50-73.
9. Малашенко Ю.Е., Назарова И.А., Новикова Н.М. Управление топливно-энергетической системой при крупномасштабных повреждениях. Постановки задач оптимизации. Изв. РАН. Теория и системы управления. 2018. № 2. С. 39-51.
10. Малашенко Ю. Е., Назарова И. А., Новикова Н.М. Метод анализа функциональной уязвимости потоковых сетевых систем. Информатика и ее применения. 2017. Т. 11. Вып. 4. С. 47-54.
11. Малашенко Ю. Е., Назарова И. А., Новикова Н.М. Диаграммы уязвимости потоковых сетевых систем. Информатика и ее применения. 2018. Т. 12. Вып. 1. С. 11-17.
12. Гребенюк Г.Г., Никишов С.М. Блокирование энерго- и ресурсоснабжения целевых объектов в сетевых инфраструктурах // Control sciences. 2016. № 4. С. 52-57.
13. Seebregts, Ad J., Goldstein, Gary A., Smekens, Koen. Energy/Environmental Modeling with the MARKAL Family of Models. Proc. Int. Conf. on Operations Research (OR 2001), Energy and Environment Session, September 3-5, 2001. Duisburg, Germany. Режим доступа: <ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/report/2001/rx01039.pdf> (дата обращения: 01.09.2021).
14. MARKAL IEA-ETSAP: The Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP). 2011. Режим доступа: <http://www.iea-etsap.org/web/Markal.asp> (дата обращения: 22.08.2021).
15. MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact) International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) [Laxenburg, Austria]. Режим доступа: <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/Energy/MESSAGE.en.html> (дата обращения: 15.09.2021).
16. Федорова Е. В., Зорина Т.Г. Моделирование межрегионального энергообмена с помощью программы MESSAGE. Ядерная энергетика. 2004. № 4. С. 3-11.
17. The National Energy Modeling System: An Overview 2009. Режим доступа: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/overview/index.html> (дата обращения: 15.09.2021).
18. Массель А. Г. Методологический подход к организации интеллектуальной поддержки исследований проблемы энергетической безопасности // Информационные технологии. 2010. № 9. С. 32-36.

19. Пяткова Н.И., Массель А.Г. Когнитивное моделирование в исследованиях энергетической безопасности: переход к динамическим когнитивным картам // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 4(20). С.24-33.
 20. Аршинский В.Л., Массель А.Г., Фартышев Д.А. Мультиагентный программный комплекс для исследований проблемы энергетической безопасности // Труды XIV Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Том 3. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2009. С. 283-289.
 21. Фартышев Д.А. Разработка многоагентного ПК ИНТЭК-М для исследований проблемы энергетической безопасности // Программные продукты и системы. № 3. 2010. С. 126-129.
 22. Массель Л.В., Массель А.Г., Пестерев Д.В. Технология управления знаниями с использованием онтологий, когнитивных моделей и продукционных экспертных систем. Известия ЮФУ. Технические науки. № 4. 2019. С. 140-152.
-

UDK 004.8:620.9

**COMPUTATIONAL EXPERIMENT TECHNOLOGY
IN RESEARCH OF POWER INDUSTRIES WHEN IMPLEMENTING
THREATS TO ENERGY SECURITY**

Alexey G. Massel

Ph.D., senior researcher of Department "Artificial Intelligence Systems in Energy"
e-mail: amassel@isem.irk.ru

Timur H. Mamedov

Postgraduate student of the department "Artificial Intelligence Systems in Energy"
e-mail: mamedowtymur@yandex.ru

Natalia I. Pyatkova

Ph.D., senior researcher laboratory "Reliability of fuel and energy supply"
e-mail: nata@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS,
664033 Irkutsk, Lermontov str., 130

Abstract. The paper presents an algorithm of computational experiment on the example of the implementation of one of the threats to energy security "Lack of investment in the energy sector" using cognitive and economic-mathematical models. The features of the inclusion of the investment component in the model of optimization of options for the development of the fuel and energy complex, taking into account energy security, are considered. A cognitive model for analyzing the threat "Lack of investment in the energy sector" is presented. The description of PC INTEC-A, which provides the ability to integrate cognitive and mathematical models, is given.

Keywords: computational experiment, energy security, threats to energy security, economic and mathematical model, cognitive modeling.

REFERENCES

1. Bushuev V.V., Voropai N.I., Mastepanov A.M., Shafranik Yu.K. Jenergeticheskaja bezopasnost' Rossii [Energy security of Russia]. Novosibirsk: Nauka. Sib. izdatel'skaja firma RAN= Novosibirsk: Science. Sib. publishing company RAS. 1999. 439p. (in Russian)

2. Pyatkova N.I., Rabchuk V.I., Senderov S.M. Jenergeticheskaja bezopasnost' Rossii: problemy i puti reshenija [Energy security of Russia: problems and solutions]. Novosibirsk: Nauka = Novosibirsk: Science. 2011. 211p. (in Russian)
3. Senderov S.M., Rabchuk V.I., Pyatkova N.I., Vorobiev S.V. Obespechenie jenergeticheskoy bezopasnosti Rossii: vybor prioritetov [Ensuring the energy security of Russia: the choice of priorities]. Ros. akad. Nauk. Sib. Otdelenie. Institut sistem jenergetiki im. L.A. Melent'eva. Novosibirsk: Nauka = Novosibirsk: Science. 2017. 116 p. (in Russian)
4. Pyatkova N., Krupenev D. Methodical aspects of the energy industries interconnected operation modeling at the energy security research under modern conditions E3S Web of Conferences 209, 06001 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020906016>.
5. Itogi raboty Minjenergo Rossii i osnovnye rezul'taty funkcionirovaniya TJeK v 2018 godu Zadachi na srednesrochnuju perspektivu [Results of the work of the Ministry of Energy of Russia and the main results of the functioning of the fuel and energy complex in 2018. Medium-term tasks.]. Available at: https://minenergo.gov.ru/prezentaciya_kollegiya_2019.pdf (accessed 15.09.2021) (in Russian)
6. Itogi raboty Minjenergo Rossii i osnovnye rezul'taty funkcionirovaniya TJEK v 2012–2017 gg [Results of the work of the Ministry of Energy of Russia and the main results of the functioning of the fuel and energy complex in 2012–2017]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/11279/82618> (accessed 15.09.2021) (in Russian)
7. Vavina E. 20 let jelektrojenergetiki v Rossii – ot RAO «EJeS Rossii» do liberalizacii rynka. Rossijskaja jekonomika 1999–2019. Specproekt «Vedomostej» i «Jekspert RA» [20 years of the power industry in Russia - from RAO UES of Russia to market liberalization. Russian economy 1999–2019. Special project "Vedomosti" and "Expert RA"]. 09.12.2019 *Statements* = *Vedomosti*. Available at: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2019/12/10/818261-20-elektroenergetiki> (accessed 15.09.2021) (in Russian)
8. Kozlov M.V., Malashenko Yu. E., Nazarova I.A., Novikova N.M. Upravlenie toplivno-jenergeticheskoy sistemoy pri krupnomasshtabnyh povrezhdenijah. Setevaja model' i programmaja realizacija [Fuel and energy system management in case of large-scale damage. Network model and software implementation.]. *Teorija i sistemy upravlenija*= *Theory and control systems*. *Izv. RAN*= *News RAS*. 2017. № 6. Pp. 50-73. (in Russian)
9. Malashenko Yu. E., Nazarova I.A., Novikova N.M. Upravlenie toplivno-jenergeticheskoy sistemoy pri krupnomasshtabnyh povrezhdenijah. Postanovki zadach optimizacii [Fuel and energy system management in case of large-scale damage. Optimization problem statement]. *Izv. RAN. Teorija i sistemy upravlenija* = *News RAS. Theory and control systems*. 2018. № 2. Pp. 39-51. (in Russian)
10. Malashenko Yu. E., Nazarova I.A., Novikova N.M. Metod analiza funkcional'noj ujazvimosti potokovyh setevykh sistem [A method for analyzing the functional vulnerability of streaming network systems]. *Informatika i ee primenenija* = *Informatics and its applications*. 2017. Vol.11. Issue 4. 2017. Pp. 47-54. (in Russian)
11. Malashenko Yu. E., Nazarova I.A., Novikova N.M. Diagrammy ujazvimosti potokovyh setevykh sistem [Vulnerability diagrams of streaming network systems]. *Informatika i ee primenenija*= *Informatics and its applications*. 2018. Vol. 12. Issue 1. Pp. 11-17. (in Russian)
12. Grebenyuk G.G., Nikishov S.M. Blokirovanie jenergo- i resursosnabzhenija celevykh obektov v setevykh infrastrukturah [Blocking of energy and resource supply of target objects in network infrastructures] // *Control sciences*. 2016. № 4. Pp. 52-57. (in Russian)
13. Seebregts Ad J., Goldstein Gary A., Smekens Koen Energy/Environmental Modeling with

- the MARKAL Family of Models [Electronic resource] Proc. Int. Conf. on Operations Research (OR 2001), Energy and Environment Session, September 3-5, 2001. Duisburg, Germany. Available at: <ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/report/2001/rx01039.pdf> (accessed 01.09.2021).
14. MARKAL IEA-ETSAP: The Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP). 2011. Available at: <http://www.iea-etsap.org/web/Markal.asp> (accessed 22.08.2021).
 15. MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact) International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) [Laxenburg, Austria]. Available at: <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/Energy/MESSAGE.en.html> (accessed 15.09.2021).
 16. Fedorova E. V., Zorina T.G. Modelirovanie mezhhregional'nogo jenergoobmena s pomoshh'ju programmy MESSAGE [Modeling of interregional energy exchange using the MESSAGE program]. Jadernaja jenergetika= Nuclear energy. 2004. №. 4. Pp. 3-11 (in Russian)
 17. The National Energy Modeling System: An Overview 2009. Available at: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/overview/index.html> (accessed 15.09.2021).
 18. Massel A. G. Metodologicheskij podhod k organizacii intellektual'noj podderzhki issledovanij problemy jenergeticheskoy bezopasnosti [Methodological approach to the organization of intellectual support for research on the problem of energy security] // Informacionnye tehnologii. = Information Technology. 2010. № 9. Pp. 32-36. (in Russian)
 19. Pyatkova N.I., Massel A.G. Kognitivnoe modelirovanie v issledovanijah jenergeticheskoy bezopasnosti: perehod k dinamicheskim kognitivnym kartam [Cognitive Modeling in Energy Security Research: Moving to Dynamic Cognitive Maps] // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii= Information and Mathematical Technologies in Science and Management. 2020. № 4 (20). Pp. 24-33 (in Russian)
 20. Arshinskij V.L., Massel' A.G., Fartyshev D.A. Mul'tiagentnyj programmnyj kompleks dlja issledovanij problemy jenergeticheskoy bezopasnosti [A multi-agent software package for researching the problem of energy security] // Trudy XIV Bajkal'skoj Vserossijskoj konferencii «Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii»= Proceedings of the XIV Baikal All-Russian Conference "Information and Mathematical Technologies in Science and Management". Volume 3. Irkutsk: MESI SB RAS. 2009. Pp. 283-289. (in Russian)
 21. Fartyshev D.A. Razrabotka mnogoagentnogo PK INTEK-M dlja issledovanij problemy jenergeticheskoy bezopasnosti [Development of a multi-agent PC INTEK-M for researching the problem of energy security] // Programmnye produkty i sistemy = Software products and systems. № 3. 2010. Pp. 126-129. (in Russian)
 22. Massel L.V., Massel A.G., Pesterev D.V. Tehnologija upravljenija znanijami s ispol'zovaniem ontologij, kognitivnyh modelej i produkcionnyh jekspertnyh sistem [Knowledge management technology using ontologies, cognitive models and production expert systems]. Izvestija JuFU. Tehniceskie nauki= News SFU Technical science. №4. 2019. Pp. 140-152 (in Russian)

Статья поступила в редакцию 20.09.2021; одобрена после рецензирования 18.10.2021; принята к публикации 22.10.2021.

The article was submitted 20.09.2021; approved after reviewing 18.10.2021; accepted for publication 22.10.2021.

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ГРАНИЦ ТЕПЛОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СЛОЕВОГО ГОРЕНИЯ БИОМАССЫ В ПРИБЛИЖЕНИИ ЛОКАЛЬНОГО ХИМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ

Донской Игорь Геннадьевич

к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории термодинамики,

e-mail: donskoy.chem@mail.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Аннотация. В статье исследуется зависимость стационарной температуры слоевого горения биомассы от скорости подачи и удельного расхода воздушного дутья. Для этого стационарное уравнение теплового баланса вместе с простейшим уравнением кинетики для химической реакции решается в широком диапазоне параметров. Для численного решения вводится ряд допущений (узкая зона реакции, преимущественный отвод теплоты путем лучистой теплопроводности, равновесный состав продуктов окисления). Результаты расчетов дают граничные значения расходных и стехиометрических параметров, при которых возможно устойчивое горение.

Ключевые слова: математическое моделирование, слоевое горение, тепловая устойчивость, термодинамическое моделирование.

Цитирование: Донской И.Г. Численная оценка границ тепловой устойчивости слоевого горения биомассы в приближении локального химического равновесия // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3 (23). С. 74-88. DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.007.

Введение. Анализ стационарных состояний химических реакторов является одним из важных вопросов химической технологии. Множественность стационарных состояний и их устойчивость оказывают влияние на выбор условий проведения химических процессов, в том числе в энергетических установках. Как известно из теории устойчивости химических реакторов, взаимодействие химической реакции и теплообмена может приводить к сложному динамическому поведению. Устойчивые стационарные режимы возможны при подходящем соотношении скорости химической реакции и процессов переноса. Граница существования таких режимов определяется существованием совместного решения уравнений, описывающих химическую кинетику и тепломассообмен, а также свойствами производных от этих уравнений по искомым переменным [1].

Характеристики стационарных состояний процессов слоевого горения топлив определяет выбор режимов их сжигания (и других способов термохимической конверсии) в энергетических и технологических топочных устройствах. Как правило, процесс сгорания твердых топлив можно разделить на ряд стадий: сушка, пиролиз и горение летучих веществ, горение и газификация коксозольного остатка. Эти стадии протекают в разных областях топочного устройства в зависимости от организации процесса. Помимо химических реакций органической части топлива и тепломассопереноса, при описании слоевого сжигания необходимо рассматривать также фазовые переходы минеральной части, разрушение частиц, проседание слоя, спекание и образование прогаров, унос частиц и т.д.

Динамика горения одиночных частиц биомассы исследовалась экспериментально [2, 3] и теоретически [4, 5] для разных условий теплообмена. Основными параметрами являются размер частицы, температура нагрева и, в некоторых случаях, скорость нагрева. В слое частиц каждый следующий ряд частиц реагирует с газом, поступающим из предыдущего ряда, поэтому условия зажигания и горения существенно изменяются [6, 7].

Способы оценки границ теплового зажигания и саморазогрева слоя топлива, основанные на классической теории горения, предложены в работах [4, 8, 9]. В работе [10] дается классификация режимов горения засыпок, в статье рассматриваются процессы на разных масштабах (поры внутри частицы, частица в целом, слой частиц). Процессы медленного горения пористых систем рассматриваются в работах [11, 12]. В [13, 14] предложены методы расчета установившихся характеристик фронта фильтрационного горения твердых топлив. Модели горения пористых сред с вынужденной и естественной конвекцией окислителя предложены в работах [15, 16]. Детальная химическая кинетика процессов пиролиза органической массы и окисления продуктов и ее влияние на процессы в слое исследовались в [17, 18].

В работе [19] устойчивость слоевого горения рассматривалась для модели с сосредоточенными параметрами. При этом предполагалось, что в узкой зоне реакции, в которой происходит практически полное расходование окислителя, можно считать распределение концентраций реагентов установившимся. В этом случае, интегральные уравнения химической кинетики и теплопередачи эквивалентны уравнениям, описывающим стационарное состояние реактора идеального перемешивания. Тогда условия тепловой устойчивости фронта горения соответствуют условиям тепловой устойчивости эквивалентного реактора с эффективными граничными условиями. Приближения такого рода использовались в работах [20, 21].

Состав продуктов горения биомассы сложным образом зависит от условий протекания гетерогенных и гомогенных химических реакций. Чтобы упростить оценку состава продуктов, часто используется квазиравновесное приближение [22, 23]. Этот подход позволяет уйти от неопределенности кинетических коэффициентов и погрешности брутто-кинетических схем, хотя вносит погрешность, связанную с отклонением состава продуктов от равновесного. Подробный анализ этих приближений требует отдельного исследования. Отметим, что квазиравновесный подход применяется для определения характеристик процессов газификации в реакторах разных типов [24-27]. Строгое обоснование квазиравновесного приближения может быть дано с помощью полноценного анализа временных масштабов в исследуемых системах [28] (в настоящей работе такой анализ не проводится, приближение локального равновесия используется как гипотеза).

Лучистый перенос является одним из основных механизмов переноса при горении в пористых средах (например, в [29] предложен способ расчета теплообмена между слоями частиц в приближении излучающих экранов). В настоящей работе рассматривается процесс реагирования частиц биомассы (сушка, пиролиз и окисление) с теплоотводом от зоны горения путем теплопроводности (каркасной и лучистой) и конвективного выноса теплоты продуктами горения. Тогда границы существования устойчивого горения существуют даже при отсутствии теплопотерь через стенку (их влияние исследовалось, например, в [30, 31, 32]). При специальных условиях возможны специальные режимы горения, когда подогрев окислителя теплотой продуктов сгорания приводит к существенному росту температуры на фронте горения (т.н. сверхадиабатические режимы горения [21, 33]). В настоящей работе рассматриваются процессы, в которых рекуперация теплоты не происходит: окислитель поступает в зону горения при той же температуре, что и топливо.

1. Математическая модель. В данной работе рассматривается приближение однородного по сечению фронта горения. Для процессов с неоднородным распределением проницаемости могут проявляться разные типы неустойчивости, приводящие к образованию прогаров [34, 35]. Эти явления, однако, часто приводят к нестационарным режимам горения, для которых предложенная модель не применима. Уравнение теплопередачи запишется следующим образом:

$$c_p G \frac{dT}{dz} = \lambda \frac{d^2T}{dz^2} + \rho Q r(\xi, T). \quad (1)$$

Здесь c_p – удельная теплоемкость, ρ – плотность, G – удельный расход реагентов, T – температура, z – координата, λ – коэффициент теплопроводности, Q – тепловой эффект реакции, r – удельная скорость горения, ξ – степень превращения топлива. Используя характерную толщину зоны горения δ , можно записать уравнение (1) приближенно в следующем виде:

$$\frac{c_p G}{\delta} (T - T_0) = \frac{\lambda}{\delta^2} (T - T_0) + \rho Q r(\xi, T). \quad (2)$$

Далее, предположим, что кинетика разложения биомассы в присутствии кислорода имеет первый порядок по топливу:

$$G \frac{d\xi}{dz} = -\rho r(\xi, T). \quad (3)$$

Снова используя характерную толщину, запишем уравнение (3) в следующем виде:

$$\frac{G}{\delta} (1 - \xi) = \rho r(\xi, T). \quad (4)$$

Можно видеть, что уравнения (2) и (4) можно записать в виде, соответствующем классической модели реактора идеального перемешивания. Состав сырья задан, управляющими параметрами являются время пребывания сырья в реакционной зоне, а также температура нагрева и скорость теплообмена. В реальных аппаратах характеристики теплообмена и температура нагрева могут изменяться в разных областях реакционной зоны, однако в целях упрощения принимается постоянство (или усреднение) этих величин. Уравнения баланса теплоты и массы записываются следующим образом:

$$\sum_j^N h_j(T^0) n_j^0 = \sum_j^N h_j(T) n_j - \tau \alpha (T^0 - T), \quad (5)$$

$$n_j^0 - n_j = \tau r_j(\mathbf{n}, T). \quad (6)$$

Здесь T – температура, К; n_j – количество j -го компонента, моль (\mathbf{n} – это вектор, состоящий из количеств всех N компонентов); r_j – скорость химической реакции, связанной с j -ым компонентом; h – удельная энтальпия, Дж/моль; τ – время пребывания реагентов в реакционной зоне; α – обобщенный коэффициент теплопередачи. Индекс 0 относится к входящим потокам. Уравнения (5) и (6) обычно используются для исследования стационарных состояний проточных реакторов идеального перемешивания [20].

Скорость реакции в многокомпонентной системе является сложной функцией состава и температуры. Для упрощения расчетов мы используем приближение брутто-реакции: считаем, что в реакционной зоне протекает медленная реакция термического разложения биомассы, которая имеет первый порядок по сырью и аррениусовскую зависимость от температуры. Такое приближение часто используется для описания процессов пиролиза и газификации твердых топлив (например, см. [36]). Скорости остальных реакций считаем достаточно высокими, чтобы применять для них квазиравновесное приближение. В этом случае можно в качестве переменной, характеризующей протекание реакции, использовать степень конверсии биомассы ξ :

$$\xi = \frac{\tau K}{1 + \tau K}. \quad (7)$$

Здесь K – коэффициент скорости брутто-реакции пиролиза:

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T}\right). \quad (8)$$

Значения коэффициентов выбраны следующим образом: $K_0 = 10^7 \text{ с}^{-1}$; $E_a = 110 \text{ кДж/моль}$; универсальная газовая постоянная R_g равна 8.314 Дж/моль/К . Тогда, рассчитывая с помощью (7) и (8) значения ξ при заданных значениях времени пребывания и температуры реакции, можно определить элементный состав летучих веществ, который далее распределяется по молекулярным формам в соответствии с условиями химического равновесия:

$$\mathbf{n}^{eq} = \underset{\mathbf{n}}{\operatorname{argmin}} G(\mathbf{n}, T), \quad (9)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{n} = \mathbf{b}(\xi), \quad (10)$$

$$n_j \geq 0 \quad \forall j. \quad (11)$$

Здесь \mathbf{A} – матрица элементного состава, \mathbf{b} – вектор количества элементов, G – свободная энергия Гиббса:

$$G(\mathbf{n}) = \sum_j^N \mu_j(\mathbf{n}, T) n_j, \quad (12)$$

где μ_j – это химический потенциал j -го компонента. Тогда уравнение теплового баланса в реакторе можно переписать следующим образом:

$$\sum_j^N (h_j^{eq} n_j^{eq} - h_j^0 n_j^0) = \tau \alpha (T^0 - T). \quad (13)$$

Связь между \mathbf{n}^{eq} и \mathbf{n}^0 в общем случае не выражается явными аналитическими зависимостями, поэтому задача решается численно. Газообразные компоненты, которые учитываются в расчетах, это O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O , H_2 , CO , CH_4 (добавление других компонентов не приводит к существенному изменению решения). Кроме них, рассматриваются конденсированные компоненты: исходное топливо, углерод и влага. Значения n^0 берутся в расчете на 1 кг топлива. Термодинамические свойства веществ (μ , h) взяты из справочника [37]. Технический состав топлива: влажность 20%, содержание летучих веществ 85% (на сухую массу). Элементный состав (на сухую массу): 49% углерода, 6% водорода, 43% кислорода, 2% азота. Давление считается постоянным (равно 1 атм). Задача условной оптимизации (9-12) решается методом оптимального спуска [22]. Использование термодинамической модели позволяет учесть зависимость теплового эффекта реакций пиролиза и горения от условий теплообмена и стехиометрического фактора (в нашей предыдущей работе [19] предельная температура горения была варьруемым параметром).

В стационарном состоянии время пребывания реагентов в зоне окисления определяется скоростью движения газа и шириной зоны окисления:

$$u = \frac{\delta}{\tau}. \quad (14)$$

Здесь u – линейная скорость движения газа (скоростью движения фронта горения можно, как правило, пренебречь), δ - ширина зоны окисления. С ростом температуры плотность газа уменьшается, а значит, скорость движения возрастает:

$$u = u^0 \frac{T}{T^0}. \quad (15)$$

Комбинируя (14) и (15), получим выражение для времени пребывания реагентов в реакционной зоне:

$$\tau = \frac{\delta}{u^0} \frac{T^0}{T}$$

Это соотношение применимо, если можно пренебречь газовой выделением в реакционной зоне. В случае горения или газификации с воздушным дутьем такое приближение дает погрешность порядка 40-50%: даже когда объем продуктов превышает объем окислителя в несколько раз, разбавление азотом снижает величину эффекта.

Коэффициент теплопроводности можно записать следующим образом [38]:

$$\lambda = \lambda^0 + \frac{16}{3} \pi \sigma d_p \varepsilon T^3.$$

Тогда эффективный коэффициент теплоотдачи в (13) определяется из (2):

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta^2}.$$

Толщина реакционной зоны связана с размером частиц. В настоящей работе принимается, что δ равна $3d_p$ (в работах [39-41] на основе экспериментальных и теоретических иссле-

дований дается значение от 1 до 5 размеров частиц). Таким образом, все коэффициенты в уравнении теплового баланса определены. Удельный расход воздуха (стехиометрическое соотношение) варьируется: в простейшем случае он определяется скоростью течения воздуха, однако при неполном горении может быть меньше стехиометрического [42].

Решение уравнения (13) находится графическим методом: при выбранной скорости течения воздуха для всего диапазона температур (300-2200 К) определяются равновесные составы, химические источники теплоты и кондуктивный тепловой поток из реакционной зоны к свежему топливу. Тогда, построив на одном графике обе величины, можно определить точки пересечения – они соответствуют стационарным решениям. Расчеты показывают, что всегда существует тривиальное решение, соответствующее режиму без горения. В области высоких температур есть, как правило, два стационарных решения, одно из которых неустойчиво (знаки производных от слагаемых теплового баланса по температуре положительны). Высокотемпературное решение является устойчивым – его характеристики и будут использоваться при сопоставлении разных режимов. В расчетах помимо температуры варьируются также скорость подачи воздуха (от 10^{-3} до 10^2 м/с) и удельный расход воздуха на окисление топлива (от 0.5 до 6.5 кг/кг).

На рис. 1 показаны разные варианты взаимного расположения кривых тепловыделения и теплопотерь (удельный расход воздуха 4 кг/кг).

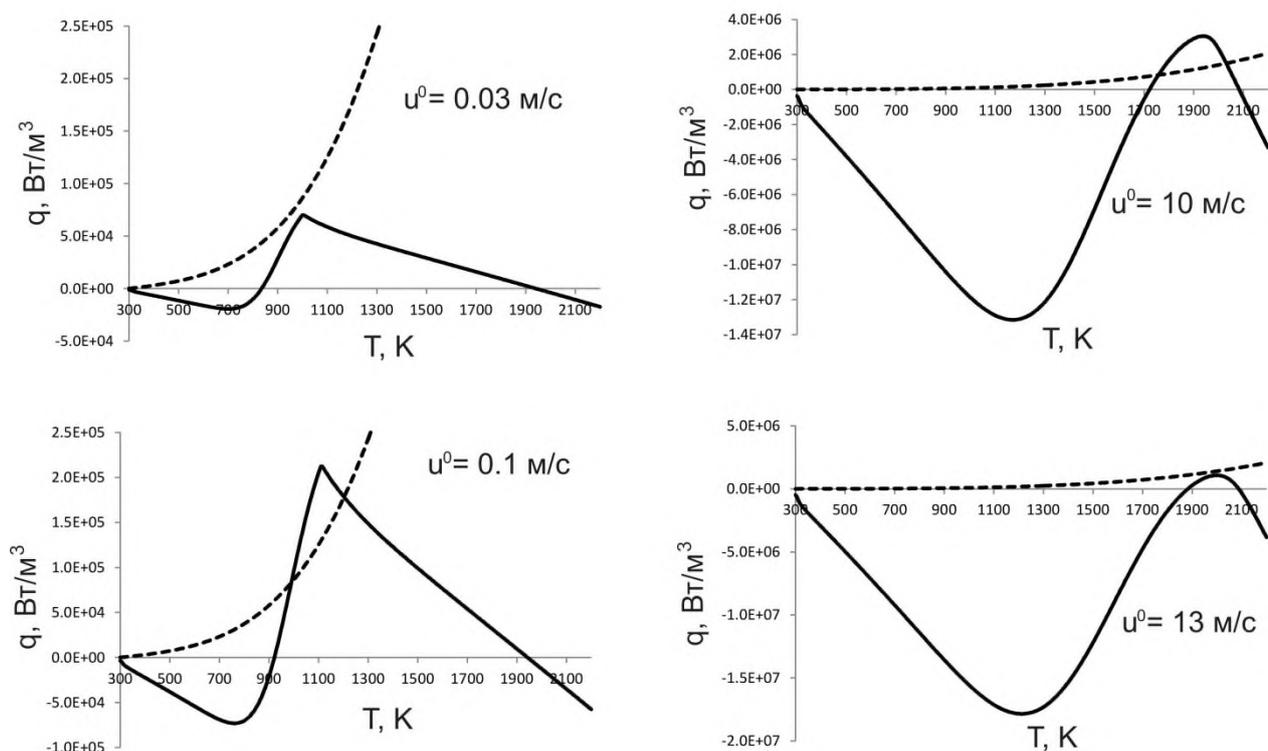


Рис. 1. Численное решение уравнения (13) для разных значений скорости воздуха u^0 .

При малых скоростях фильтрации время пребывания реагентов в зоне реакции велико, поэтому кривая теплопотерь оказывается выше кривой тепловыделения. С ростом скорости фильтрации происходит касание кривых, что соответствует нижней критической скорости фильтрации. Между критическими значениями скорости фильтрации кривые тепловыделения и теплопотерь пересекаются в двух точках, которые соответствуют стационарным состояниям. Устойчивым является состояние с большей температурой. При малых временах пребывания реагентов в зоне реакции кривая тепловыделения оказывается ниже кривой теплопотерь из-за меньшей полноты протекания реакции. Отметим, что расчеты проводились без учета теплопотерь в поперечном потоке направлении: теплота отводится из зоны реакции

только в холодную область слоя. Диффузионный подвод окислителя не учитывается: считаем, что открытая граница слоя находится достаточно далеко от фронта реакции (хотя в некоторых случаях слоевое горение создает достаточную тягу для свободно-конвективного подвода окислителя [12]).

2. Результаты расчетов. Расчетные зависимости температуры на фронте реакции от скорости течения воздуха имеют форму замкнутых кривых, верхняя часть которой соответствует устойчивой ветви решений (такие кривые названы «изолами» в работе [43]). В работе [19] на примере более простой модели было показано, что для размыкания такой кривой требуется подогрев воздуха. В настоящей работе влияние температуры воздуха не рассматривается, поэтому для всех случаев область устойчивых режимов имеет границы при больших скоростях воздуха (срыв горения из-за малого времени пребывания) и низких скоростях воздуха (срыв горения из-за больших теплотерь). Расположение кривых, соответствующих стационарным решениям (13), в координатах «температура – скорость воздуха – удельное потребление воздуха» представлено на рис. 2, из которого видно, что расчетные кривые находятся на оболочке некоторой области, имеющей форму, близкую к выпуклой. При этом устойчивые стационарные решения находятся только на одной стороне этой области, соответствующей большим температурам.

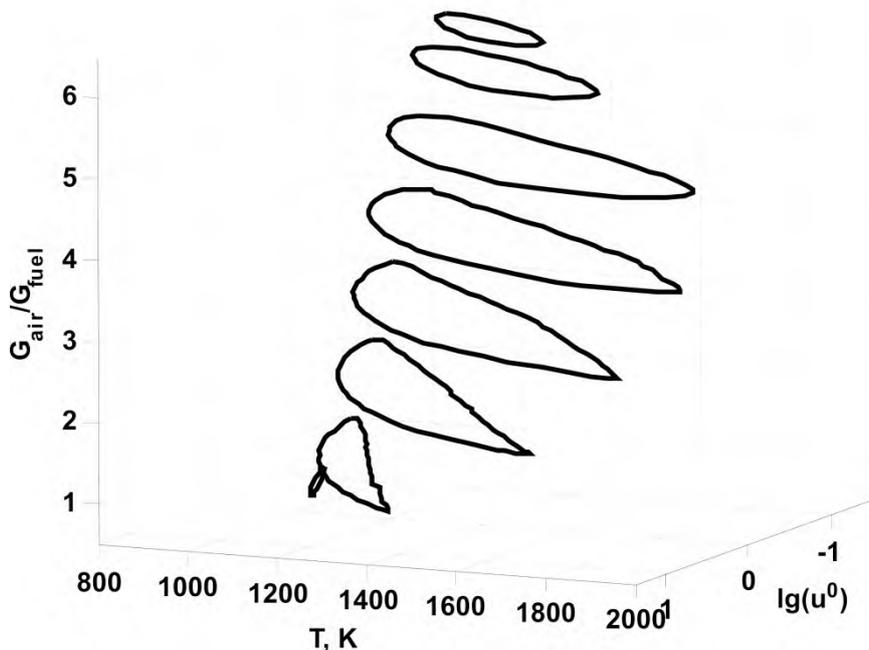


Рис. 2. Стационарные решения уравнения (13) для разных удельных расходов окислителя.

При малых значениях удельного потребления воздуха (до 0.5 кг/кг, что близко к нижней границе устойчивости) наблюдается горение с температурой до 1000 К, т.е. происходит тление. С ростом удельного расхода воздуха происходит резкое расширение диапазона допустимых скоростей фильтрации воздуха и увеличение максимальной температуры. Минимальные скорости фильтрации воздуха оказываются в диапазоне от 1 до 10 см/с, что лучше соответствует экспериментальным данным [39-41]. В предыдущей работе [19] в приближении постоянного теплового эффекта были получены крайней низкие минимальные скорости фильтрации: в настоящей работе величина теплового эффекта зависит от степени конверсии топлива (хотя все равно отличается от реальной), поэтому при низкой температуре горения эндотермические процессы, такие как сушка и пиролиз, требуют большей скорости фильтрации для поддержания стационарного режима. Максимальные скорости подачи воздуха соот-

ветствуют низкому удельному потреблению окислителя, когда полная конверсия топлива не достигается: эти режимы соответствуют выгоранию летучих веществ [44, 45].

В работах [39-41] максимальная скорость фильтрации составляет около 1 м/с. На рис. 3 видно, что удельный расход воздуха зависит от скорости фильтрации немонотонно. Каждому критическому значению скорости фильтрации могут соответствовать два значения удельного расхода воздуха: в области низких удельных расходов тепловыделение происходит в основном за счет горения летучих, в области высоких значений происходит окисление углеродного остатка. Режимы газификации, близкие к границе полной конверсии углерода, соответствует наибольшей температуре (в наших расчетах при удельном расходе воздуха 4 кг/кг), однако максимальная допустимая скорость фильтрации достигается при меньших удельных расходах воздуха (ок. 2 кг/кг). Максимальная скорость фильтрации зависит от выбранных эффективных кинетических параметров, т.е. для более точной оценки может потребоваться их корректировка [19]. Поскольку имеющиеся данные не позволяют выбрать единый набор кинетических коэффициентов для реакционных брутто-схем [46, 47], можно сделать вывод о скорее качественном соответствии расчетов наблюдаемым явлениям.

Приближенность модели также приводит к тому, что связь между скоростью подачи воздуха и его удельным расходом в реакциях окисления не может быть установлена, поэтому оба параметра рассматриваются как независимые. В реальных процессах конверсии биомассы эти параметры могут быть связаны между собой, причем эта связь не определяется простыми стехиометрическими соотношениями. Как правило, имеется широкий набор возможных конечных состояний, достижимость которых определяется кинетическими факторами. В этом случае можно использовать отбор режимов, например, по эмпирическим критериям: в некоторых случаях процессы газификации демонстрируют довольно устойчивое поведение, преимущественно оказываясь вблизи области параметров, соответствующих границе образования механического недожога [48]. В нестационарных условиях могут наблюдаться процессы пирогазификации [49].

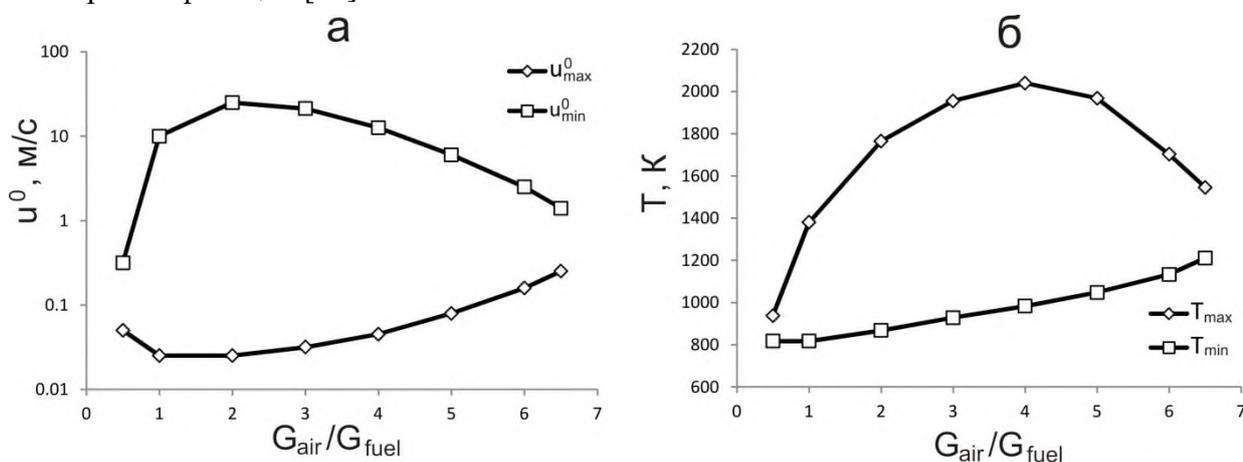


Рис. 3. Зависимость предельных значений скорости воздуха (а) и температуры горения (б) от удельного расхода окислителя.

Другим недостатком модели является пренебрежение процессами внутри топливных частиц. При резких градиентах температуры, которые наблюдаются при слоевом горении, частицы реагируют неоднородно по объему и по поверхности. В таких условиях скорость реакции определяется скоростью процессов переноса в частицах. Для учета этих эффектов требуются более детальные модели [7].

Выводы. Предложенная модель, полученная в результате сведения задачи слоевого горения к реактору идеального перемешивания, позволяет качественно воспроизвести условия затухания при низких скоростях течения воздуха. Квазиравновесное приближение позволяет

упростить оценку слагаемого в тепловом балансе, отвечающего за тепловыделение. Расчеты показывают, что минимальная скорость течения воздуха, обеспечивающая стационарное горение, составляет от 2.5 до 25 см/с в зависимости от удельного потребления окислителя в реакциях окисления. Максимальная температура достигается при удельном потреблении окислителя ниже стехиометрического. Максимальная допустимая скорость подачи воздуха достигается при еще меньшем удельном потреблении окислителя, т.е. соответствует горению летучих веществ, а не полной конверсии топлива (поскольку стадия газификации является существенно эндотермической).

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №19-08-00744).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balakotaiah V., Luss D. Global analysis of the multiplicity features of multi-reaction lumped-parameter systems // *Chemical Engineering Science*. 1984. V. 39. № 5. Pp. 865-881. DOI: 10.1016/0009-2509(84)85056-3.
2. Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y., Bugaeva K.A., Taburchinov R.I. The Conditions and Characteristics of Wood Particles Ignition in the Stream of the High Temperature Gases // *Combustion Science and Technology*. 2018. V. 190. № 4. Pp. 663-686. DOI: 10.1080/00102202.2017.1404997.
3. Panahi A., Vorobiev N., Schiemann M., Tarakcioglu M., Delichatsios M., Levendis Y.A. Combustion details of raw and torrefied biomass fuel particles with individually-observed size, shape and mass // *Combustion and Flame*. 2019. V. 207. Pp. 327-341. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.06.009.
4. El-Sayed S.A. Ignition of a Pyrolysis Wooden Particle Based on the Thermal Explosion Theory // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2018. V. 42. Pp. 317-327. DOI: 10.1007/s40997-017-0099-8.
5. Peters B. Measurements and application of a discrete particle model (DPM) to simulate combustion of a packed bed of individual particles // *Combustion and Flame*. 2002. V. 131. Pp. 132-146. DOI: 10.1016/S0010-2180(02)00393-0.
6. Sommariva S., Granan R., Maffei T., Pierucci S., Ranzi E. A kinetic approach to the mathematical model of fixed bed gasifiers // *Computers & Chemical Engineering*. 2011. V. 35. № 5. Pp. 928-935. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2011.01.036.
7. Донской И.Г. Математическое моделирование термического разложения древесных частиц в продуваемом слое // *Вычислительные технологии*. 2018. Т. 23. № 6. С. 14-24. DOI: 10.25743/ICT.2018.23.6.003.
8. Restuccia F., Masek O., Hadden R.M., Rein G. Quantifying self-heating ignition of biochar as a function of feedstock and the pyrolysis reactor temperature // *Fuel*. 2019. V. 236. Pp. 201-213. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.08.141.
9. Karim M.R., Naser J. Numerical modelling of solid biomass combustion: difficulties in initiating the fixed bed combustion // *Energy Procedia*. 2017. V. 110. Pp. 390-395. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.158.
10. Peters B. Classification of combustion regimes in a packed bed of particles based on the relevant time and length scales // *Combustion and Flame*. 1999. V. 116. № 1-2. Pp. 297-301. DOI: 10.1016/S0010-2180(98)00048-0.
11. Ohlemiller T.J. Modeling of smoldering combustion propagation // *Progress in Energy and Combustion Science*. 1985. V. 14. Pp. 277-310. DOI: 10.1016/0360-1285(85)90004-8.

12. Rebaque V., Ertesvag I.S., Mikalsen R.F., Steen-Hansen A. Experimental study of smouldering in wood pellets with and without air draft // *Fuel*. 2020. V. 264. Paper № 116806. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116806.
13. Амелин И.И., Салганский Е.А., Волкова Н.Н., Жолудев А.Ф., Алексеев А.П., Полианчик Е.В., Манелис Г.Б. Область существования стационарной волны фильтрационного горения в шихте с малым содержанием углерода // *Известия АН. Серия химическая*. 2011. № 6. С. 1125-1132.
14. Салганский Е.А., Полианчик Е.В., Манелис Г.Б. Моделирование фильтрационного горения твердого пиролизующегося топлива // *Физика горения и взрыва*. 2013. Т. 49. № 1. С. 45-61.
15. Lutsenko N.A., Levin V.A. Effect of Gravity Field and Pressure Difference on Heterogeneous Combustion in Porous Media // *Combustion Science and Technology*. 2014. V. 186. № 10-11. Pp. 1410-1421. DOI: 10.1080/00102202.2014.934611.
16. Lutsenko N.A. Numerical model of two-dimensional heterogeneous combustion in porous media under natural convection or forced filtration // *Combustion Theory and Modelling*. 2018. V. 22. № 2. Pp. 359-377. DOI: 10.1080/13647830.2017.1406617.
17. Ranzi E., Faravelli T., Manenti F. Pyrolysis, Gasification, and Combustion of Solid Fuels // *Advances in Chemical Engineering*. 2016. V. 49. Pp. 1-94. DOI: 10.1016/bs.ache.2016.09.001.
18. Horton S.R., Mohr R.J., Zhang Y., Petrocelli F.P., Klein M.T. Molecular-level kinetic modeling of biomass gasification // *Energy & Fuels*. 2016. V. 30. Pp. 3906-3916. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b01988.
19. Донской И.Г. Оценка пределов устойчивого слоевого горения в приближении идеального перемешивания зоны окисления // *Вестник технологического университета*. 2020. Т. 23. № 12. С. 135-140.
20. Snegirev A.Yu. Perfectly stirred reactor model to evaluate extinction of diffusion flame // *Combustion and Flame*. 2015. V. 162. № 10. Pp. 3622-3631. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.06.019.
21. Алдушин А.П. Макрокинетический анализ "сверхадиабатического" реактора идеального смешения // *ДАН*. 2011. Т. 436. № 2. С. 203-206.
22. Каганович Б.М., Кейко А.В., Шаманский В.А., Ширкалин И.А., Зароднюк М.С. Технология термодинамического моделирования. Редукция моделей движения к моделям покоя. Новосибирск: Наука. 2010. 236 с.
23. Попков Ю.С. Позитивные динамические системы с энтропийным оператором // *Автоматика и телемеханика*. 2003. № 3. С. 104-113.
24. Donskoy I.G., Shamansky V.A., Kozlov A.N., Svishchev D.A. Coal gasification process simulations using combined kinetic-thermodynamic models in one-dimensional approximation // *Combustion Theory and Modelling*. 2017. V. 21. № 3. Pp. 529-559. DOI: 10.1080/13647830.2016.1259505.
25. Kangas P., Koukkari P., Hupa M. Modeling Biomass Conversion during Char Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction by Applying Constrained Local Thermodynamic Equilibrium // *Energy Fuels*. 2014. V. 28. № 10. Pp. 6361-6370. DOI: 10.1021/ef501343d.
26. Mendiburu A.Z., Carvalho J.A. Jr., Zanzi R., Coronado C.R., Silveira J.L. Thermochemical equilibrium modeling of a biomass downdraft gasifier: Constrained and unconstrained non-stoichiometric models // *Energy*. 2014. V. 71. Pp. 624-637. DOI: 10.1016/j.energy.2014.05.010.

27. Gomez-Barea A., Leckner B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2010. V. 36. Pp. 444-509. DOI: 10.1016/j.pecs.2009.12.002.
28. Gorban A.N., Karlin I.V. Method of invariant manifolds for chemical kinetics // *Chemical Engineering Science*. 2003. V. 58. Pp. 4751-4768. DOI: 10.1016/j.ces.2002.12.001.
29. Чуханов З.Ф. Тепловой режим горения и газификации слоя твердого топлива // *ДАН СССР*. 1944. Т. 44. № 7. С. 297-301.
30. Колесникова Ю.Ю., Кислов В.М., Салганский Е.А. Влияние теплотерь на характеристики фильтрационного горения твердого органического топлива // *Химическая физика*. 2016. Т. 35. № 9. С. 53-58.
31. Kurdyumov V.N., Gubernov V.V. Dynamics of combustion waves in narrow samples of solid energetic material: Impact of radiative heat losses on chaotic behavior and dynamical extinction phenomenon // *Combustion and Flame*. 2020. V. 219. Pp. 349-358. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.06.014.
32. Zavala E.Q., Chapiro G. Classification of the traveling wave solutions for filtration combustion considering thermal losses // *Combustion and Flame*. 2020. V. 219. Pp. 416-424. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.06.017.
33. Манелис Г.Б., Глазов С.В., Салганский Е.А., Ламперт Д.Б. Автоволновые процессы при фильтрационном горении в противоточных системах // *Успехи химии*. 2012. Т. 81. № 9. С. 855-873.
34. Алдушин А.П., Ивлева Т.П. Моделирование гидродинамической неустойчивости фильтрационного режима распространения фронта горения в пористой среде // *ФГВ*. 2015. Т. 51. № 1. С. 125-134.
35. Nakamura M., Zhang H., Millrath K., Themelis N.J. Modeling of Waste-to-Energy Combustion With Continuous Variation of the Solid Waste Fuel // *Proceedings of the 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE'03)*. November 15-21. 2003. Washington DC, USA. Paper № IMECE2003-55342. Pp. 69-78. DOI: 10.1115/IMECE2003-55342.
36. Anca-Couce A. Reaction mechanisms and multi-scale modelling of lignocellulosic biomass pyrolysis // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2016. V. 53. Pp. 41-79. DOI: 10.1016/j.pecs.2015.10.002.
37. McBride B.J., Zehe M.J., Gordon S. NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species (NASA\TP-2002-211556). Cleveland: Glenn Research Center. 2002. 296 p.
38. Попов Ю.А. Лучистая теплопроводность в слое с большой концентрацией частиц // *ИФЖ*. 1978. Т. 34. № 4. С. 703-705.
39. Porteiro J., Pratino D., Miguez J.L., Granada E., Moran J., Collazo J. Study of the reaction front thickness in a counter-current fixed-bed combustor of a pelletised biomass // *Combustion and Flame*. 2012. V. 159. Pp. 1296-1302. DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.10.007.
40. Porteiro J., Pratino D., Collazo J., Granada E., Moran J., Miguez J.L. Experimental analysis of the ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor // *Fuel*. 2010. V. 89. Pp. 26-35. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.01.024.
41. Fatehi M., Kaviany M. Adiabatic reverse combustion in a packed bed // *Combustion and Flame*. 1994. V. 99. Pp. 1-17. DOI: 10.1016/0010-2180(94)90078-7.
42. Глазов С.В., Кислов В.М., Салганский Е.А. Скорость горения твердых топлив в сверхадиабатическом режиме // *Журнал прикладной химии*. 2018. Т. 91. № 10. С. 1396.
43. Hlavacek V., Van Rompay P. On the birth and death of isolas // *Chemical Engineering Science*. 1981. V. 36. № 10. Pp. 1730-1731. DOI: 10.1016/0009-2509(81)80019-X.

44. Gupta V., Torero J.L., Hidalgo J.P. Burning dynamics and in-depth flame spread of wood cribs in large compartment fires // *Combustion and Flame*. 2021. V. 228. Pp. 42-56. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.01.031.
45. Tanui J.K., Kioni P.N., Mirre T., Nowitzki M., Todorova D.A. Application of CFD-DEM method in modeling of wood combustion in a fixed bed // *Bulgarian Chemical Communications*. 2020. V. 52. Pp. 396-403.
46. Di Blasi C. Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars // *Progress in energy and combustion science*. 2009. V. 35. Pp. 121-140. DOI: 10.1016/j.pecs.2008.08.001.
47. Anca-Couce A., Tsekos C., Retschitzegger S., Zimbardi F., Funke A., Banks S., Kraia T., Marques P., Scharler R., de Jong W., Kienzi N. Biomass pyrolysis TGA assessment with an international round robin // *Fuel*. 2020. V. 276. Paper № 118002. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118002.
48. Svishchev D.A., Kozlov A.N., Donskoy I.G., Ryzhkov A.F. A semi-empirical approach to the thermodynamic analysis of downdraft gasification // *Fuel*. 2016. V. 168. Pp. 91-106. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.11.066.
49. Jaganathan V.M., Varunkumar S. A novel self-sustained single step process for synthesizing activated char from ligno-cellulosic biomass // *Fuel Processing Technology*. 2020. V. 208. Paper № 106516. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106516.

UDK 662.611; 544.45

NUMERICAL ESTIMATION OF THERMAL STABILITY BOUNDARIES OF FIXED BED BIOMASS COMBUSTION USING LOCAL CHEMICAL EQUILIBRIUM APPROXIMATION

Igor G. Donskoy

Cand. Sci., Senior Researcher in Laboratory of Thermodynamics,

e-mail: donskoy.chem@mail.ru

Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
664033, Russia, Irkutsk, Lermontova st., 130

Abstract. The article investigates the dependence of the stationary combustion temperature of layer combustion of biomass on the feed rate and specific consumption of air blast. For this, the stationary heat balance equation, together with the simplest kinetic equation for a chemical reaction, is solved over a wide range of parameters. For a numerical solution, a number of assumptions are introduced (a narrow reaction zone, preferential heat removal by radiant heat conduction, equilibrium composition of oxidation products). The calculation results give the boundary values of the consumption and stoichiometric parameters at which stable combustion is possible.

Keywords: mathematical modelling, fixed bed combustion, thermal stability, thermodynamic modelling.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 19-08-00744).

REFERENCES

1. Balakotaiah V., Luss D. Global analysis of the multiplicity features of multi-reaction lumped-parameter systems // *Chemical Engineering Science*. 1984. V. 39. № 5. Pp. 865-881. DOI: 10.1016/0009-2509(84)85056-3.

2. Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y., Bugaeva K.A., Taburchinov R.I. The Conditions and Characteristics of Wood Particles Ignition in the Stream of the High Temperature Gases // *Combustion Science and Technology*. 2018. V. 190. № 4. Pp. 663-686. DOI: 10.1080/00102202.2017.1404997.
3. Panahi A., Vorobiev N., Schiemann M., Tarakcioglu M., Delichatsios M., Levendis Y.A. Combustion details of raw and torrefied biomass fuel particles with individually-observed size, shape and mass // *Combustion and Flame*. 2019. V. 207. Pp. 327-341. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.06.009.
4. El-Sayed S.A. Ignition of a Pyrolysis Wooden Particle Based on the Thermal Explosion Theory // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2018. V. 42. Pp. 317-327. DOI: 10.1007/s40997-017-0099-8.
5. Peters B. Measurements and application of a discrete particle model (DPM) to simulate combustion of a packed bed of individual particles // *Combustion and Flame*. 2002. V. 131. Pp. 132-146. DOI: 10.1016/S0010-2180(02)00393-0.
6. Sommariva S., Granan R., Maffei T., Pierucci S., Ranzi E. A kinetic approach to the mathematical model of fixed bed gasifiers // *Computers & Chemical Engineering*. 2011. V. 35. № 5. Pp. 928-935. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2011.01.036.
7. Donskoy I.G. Matematicheskoye modelirovaniye termicheskogo razlozheniya drevesnykh chastits v produvayemom sloye [Mathematical modelling of woody particles pyrolysis in a fixed bed] // *Vychislitel'nyye tekhnologii = Computational technologies*. 2018. V. 23. № 6. Pp. 14-24. DOI: 10.25743/ICT.2018.23.6.003 (in Russian)
8. Restuccia F., Masek O., Hadden R.M., Rein G. Quantifying self-heating ignition of biochar as a function of feedstock and the pyrolysis reactor temperature // *Fuel*. 2019. V. 236. Pp. 201-213. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.08.141.
9. Karim M.R., Naser J. Numerical modelling of solid biomass combustion: difficulties in initiating the fixed bed combustion // *Energy Procedia*. 2017. V. 110. Pp. 390-395. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.158.
10. Peters B. Classification of combustion regimes in a packed bed of particles based on the relevant time and length scales // *Combustion and Flame*. 1999. V. 116. № 1-2. Pp. 297-301. DOI: 10.1016/S0010-2180(98)00048-0.
11. Ohlemiller T.J. Modeling of smoldering combustion propagation // *Progress in Energy and Combustion Science*. 1985. V. 14. Pp. 277-310. DOI: 10.1016/0360-1285(85)90004-8
12. Rebaque V., Ertesvag I.S., Mikalsen R.F., Steen-Hansen A. Experimental study of smouldering in wood pellets with and without air draft // *Fuel*. 2020. V. 264. Paper № 116806. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116806.
13. Amelin I.I., Salganskiy Ye.A., Volkova N.N., Zholudev A.F., Alekseyev A.P., Polianchik Ye.V., Manelis G.B. Oblast' sushchestvovaniya statsionarnoy volny fil'tratsionnogo gorennya v shikhte s malym sodержaniyem ugleroda [Parametric domain of the stationary filtration combustion wave in the charge with a low carbon content] // *Izvestiya AN. Seriya khimicheskaya = Izvestiya AN. Chemical series*. 2011. V. 60. Pp. 1150–1157. DOI: 10.1007/s11172-011-0180-1 (in Russian)
14. Salganskiy Ye.A., Polianchik Ye.V., Manelis G.B. Modelirovaniye fil'tratsionnogo gorennya tverdogo pirolizuyushchegosya topliva [Modeling filtration combustion of a pyrolyzing solid fuel] // *Fizika gorennya i vzryva = Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2013. V. 49. Pp. 38-52. DOI: 10.1134/S001050821301005X (in Russian)

15. Lutsenko N.A., Levin V.A. Effect of Gravity Field and Pressure Difference on Heterogeneous Combustion in Porous Media // *Combustion Science and Technology*. 2014. V. 186. № 10-11. Pp. 1410-1421. DOI: 10.1080/00102202.2014.934611.
16. Lutsenko N.A. Numerical model of two-dimensional heterogeneous combustion in porous media under natural convection or forced filtration // *Combustion Theory and Modelling*. 2018. V. 22. № 2. Pp. 359-377. DOI: 10.1080/13647830.2017.1406617.
17. Ranzi E., Faravelli T., Manenti F. Pyrolysis, Gasification, and Combustion of Solid Fuels // *Advances in Chemical Engineering*. 2016. V. 49. Pp. 1-94. DOI: 10.1016/bs.ache.2016.09.001.
18. Horton S.R., Mohr R.J., Zhang Y., Petrocelli F.P., Klein M.T. Molecular-level kinetic modeling of biomass gasification // *Energy & Fuels*. 2016. V. 30. Pp. 3906-3916. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b01988.
19. Donskoy I.G. Otsenka predelov ustoychivogo sloyevogo goreniya v priblizhenii ideal'nogo peremeshivaniya zony okisleniya [Estimation of stability boundaries of fixed bed combustion using perfect stirred reactor approximation] // *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*. 2020. V. 23. No 12. Pp. 135-140. (in Russian)
20. Snegirev A.Yu. Perfectly stirred reactor model to evaluate extinction of diffusion flame // *Combustion and Flame*. 2015. V. 162. № 10. Pp. 3622-3631. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.06.019.
21. Aldushin A.P. Makrokineticheskiy analiz "sverkhadiabatcheskogo" reaktora ideal'nogo smesheniya [Macrokinetic analysis of a superadiabatic well-stirred tank reactor] // *DAN = Doklady Physical Chemistry*. 2011. V. 436. Pp. 1-4. DOI: 10.1134/S0012501611010015 (in Russian)
22. Kaganovich B.M., Keyko A.V., Shamanskiy V.A., Shirkalin I.A., Zarodnyuk M.S. Tekhnologiya termodinamicheskogo modelirovaniya. Reduktsiya modeley dvizheniya k modelyam pokoya [Thermodynamic modeling technology. Reduction of motion models to rest models]. Novosibirsk: Nauka= Science. 2010. 236 p. (in Russian)
23. Popkov YU.S. Pozitivnyye dinamicheskiye sistemy s entropiynym operatorom [Positive Dynamic Systems with the Entropy Operator] // *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*. 2003. V. 64. Pp. 439-447. DOI: 10.1023/A:1023265609028 (in Russian)
24. Donskoy I.G., Shamansky V.A., Kozlov A.N., Svishchev D.A. Coal gasification process simulations using combined kinetic-thermodynamic models in one-dimensional approximation // *Combustion Theory and Modelling*. 2017. V. 21. № 3. Pp. 529-559. DOI: 10.1080/13647830.2016.1259505.
25. Kangas P., Koukkari P., Hupa M. Modeling Biomass Conversion during Char Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction by Applying Constrained Local Thermodynamic Equilibrium // *Energy Fuels*. 2014. V. 28. № 10. Pp. 6361-6370. DOI: 10.1021/ef501343d.
26. Mendiburu A.Z., Carvalho J.A. Jr., Zanzi R., Coronado C.R., Silveira J.L. Thermochemical equilibrium modeling of a biomass downdraft gasifier: Constrained and unconstrained non-stoichiometric models // *Energy*. 2014. V. 71. Pp. 624-637. DOI: 10.1016/j.energy.2014.05.010.
27. Gomez-Barea A., Leckner B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2010. V. 36. Pp. 444-509. DOI: 10.1016/j.pecs.2009.12.002.

28. Gorban A.N., Karlin I.V. Method of invariant manifolds for chemical kinetics // *Chemical Engineering Science*. 2003. V. 58. Pp. 4751-4768. DOI: 10.1016/j.ces.2002.12.001.
29. Chukhanov Z.F. Teplovoj rezhim gorenija i gasifikatsii sloja tverdogo topliva [Thermal regime of combustion and gasification of a layer of solid fuel] // *DAN SSSR = Doklady USSR*. 1944. V. 44. № 7. Pp. 297-301. (in Russian)
30. Kolesnikova YU.YU., Kislov V.M., Salganskiy Ye.A. Vliyaniye teplopoter' na kharakteristiki fil'tratsionnogo gorenija tverdogo organicheskogo topliva [Influence of the heat loss intensity on the characteristics of the filtration combustion of solid organic fuels] // *Khimicheskaya fizika = Chemical Physics*. 2016. V. 10. Pp. 791-795. DOI: 10.1134/S1990793116050043 (in Russian)
31. Kurdyumov V.N., Gubernov V.V. Dynamics of combustion waves in narrow samples of solid energetic material: Impact of radiative heat losses on chaotic behavior and dynamical extinction phenomenon // *Combustion and Flame*. 2020. V. 219. Pp. 349-358. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.06.014.
32. Zavala E.Q., Chapiro G. Classification of the traveling wave solutions for filtration combustion considering thermal losses // *Combustion and Flame*. 2020. V. 219. Pp. 416-424. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.06.017.
33. Manelis G.B., Glazov S.V., Salgansky E.A., Lempert D.B. Avtovolnovyye protsessy pri fil'tratsionnom gorenii v protivotochnykh sistemakh [Autowave processes in the filtration combustion in counterflow systems] // *Uspekhi khimii = Russ. Chem. Rev.* 2012. V. 81. № 9. Pp. 855-873. DOI: 10.1070/RC2012v081n09ABEH004279 (in Russian)
34. Aldushin A.P., Ivleva T.P. Modelirovaniye gidrodinamicheskoy neustoychivosti fil'tratsionnogo rezhima rasprostraneniya fronta gorenija v poristoy srede [Simulation of the hydrodynamic instability of a filtration combustion wave in a porous medium] // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2015. V. 51. № 1. Pp. 107-115. DOI: 10.1134/S0010508215010116 (in Russian)
35. Nakamura M., Zhang H., Millrath K., Themelis N.J. Modeling of Waste-to-Energy Combustion With Continuous Variation of the Solid Waste Fuel // *Proceedings of the 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE'03)*. November 15-21, 2003. Washington DC, USA. Paper № IMECE2003-55342. Pp. 69-78. DOI: 10.1115/IMECE2003-55342.
36. Anca-Couce A. Reaction mechanisms and multi-scale modelling of lignocellulosic biomass pyrolysis // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2016. V. 53. Pp. 41-79. DOI: 10.1016/j.pecs.2015.10.002.
37. McBride B.J., Zehe M.J., Gordon S. NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species (NASA\TP-2002-211556). Cleveland: Glenn Research Center. 2002. 296 p.
38. Popov Yu.A. Luchistaja teploprovodnost' v sloe s bol'shoj kontsentratsiej chastits [Radiant thermal conductivity in a layer with a high concentration of particles] // *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 1978. V. 34. № 4. Pp. 703-705 (in Russian)
39. Porteiro J., Pratino D., Miguez J.L., Granada E., Moran J., Collazo J. Study of the reaction front thickness in a counter-current fixed-bed combustor of a pelletised biomass // *Combustion and Flame*. 2012. V. 159. Pp. 1296-1302. DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.10.007.
40. Porteiro J., Pratino D., Collazo J., Granada E., Moran J., Miguez J.L. Experimental analysis of the ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor // *Fuel*. 2010. V. 89. Pp. 26-35. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.01.024.

41. Fatehi M., Kaviany M. Adiabatic reverse combustion in a packed bed // *Combustion and Flame*. 1994. V. 99. Pp. 1-17. DOI: 10.1016/0010-2180(94)90078-7.
42. Glazov S.V., Kislov V.M., Salganskiy Ye.A. Skorost' goreniya tverdykh topliv v sverkhadiabatcheskom rezhime [Combustion rate of solid fuels in the superadiabatic mode] // *Zhurnal prikladnoy khimii = Russian Journal of Applied Chemistry*. V. 91. № 10. Pp. 1581-1587. DOI: 10.1134/S1070427218100038.
43. Hlavacek V., Van Rompay P. On the birth and death of isolas // *Chemical Engineering Science*. 1981. V. 36. №. 10. Pp. 1730-1731. DOI: 10.1016/0009-2509(81)80019-X.
44. Gupta V., Torero J.L., Hidalgo J.P. Burning dynamics and in-depth flame spread of wood cribs in large compartment fires // *Combustion and Flame*. 2021. V. 228. Pp. 42-56. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.01.031.
45. Tanui J.K., Kioni P.N., Mirre T., Nowitzki M., Todorova D.A. Application of CFD-DEM method in modeling of wood combustion in a fixed bed // *Bulgarian Chemical Communications*. 2020. V. 52. Pp. 396-403.
46. Di Blasi C. Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars // *Progress in energy and combustion science*. 2009. V. 35. Pp. 121-140. DOI: 10.1016/j.pecs.2008.08.001.
47. Anca-Couce A., Tsekos C., Retschitzegger S., Zimbardi F., Funke A., Banks S., Kraia T., Marques P., Scharler R., de Jong W., Kienzi N. Biomass pyrolysis TGA assessment with an international round robin // *Fuel*. 2020. V. 276. Paper № 118002. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118002.
48. Svishchev D.A., Kozlov A.N., Donskoy I.G., Ryzhkov A.F. A semi-empirical approach to the thermodynamic analysis of downdraft gasification // *Fuel*. 2016. V. 168. Pp. 91-106. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.11.066.
49. Jaganathan V.M., Varunkumar S. A novel self-sustained single step process for synthesizing activated char from ligno-cellulosic biomass // *Fuel Processing Technology*. 2020. V. 208. Paper № 106516. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106516.

Статья поступила в редакцию 16.08.2021; одобрена после рецензирования 27.09.2021; принята к публикации 30.09.2021.

The article was submitted 16.08.2021; approved after reviewing 27.09.2021; accepted for publication 30.09.2021.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В ЗАДАЧАХ КОМПЛЕКСНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ КРУПНЫХ ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Илькевич Николай Иванович

д.т.н., гл.н.с., e-mail: ilkev@isem.irk.ru

Дзюбина Татьяна Владимировна

к.т.н., с.н.с., e-mail: tvleo@isem.irk.ru

Калинина Жанна Вадимовна

к.т.н., н.с., e-mail: zhannochka_k@mail.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Аннотация. Актуальность обусловлена, с одной стороны, необходимостью активной газификации крупных территориальных образований (строящихся новых жилых агломераций, коттеджных и дачных поселков, а также крупных промышленных комплексов). С другой стороны, продолжается увеличение общей протяженности газораспределительных систем и усложнение конфигурации схем газопроводов. Перечисленные факторы влияют на надежность работы газораспределительных систем и предъявляют высокие требования со стороны потребителей энергии к безаварийной их работе. **Цель.** Основная исходная надежностная информация, используемая для анализа надежности газопроводов, – это интенсивности отказов его элементов: отдельных участков линейной части, газоперекачивающих агрегатов и т.д., и интенсивности восстановления этих элементов. Эти показатели характеризуют такие свойства надежности как, безотказность и ремонтпригодность. Цель исследований заключается в оценке влияния показателей безотказности и ремонтпригодности оборудования на интегральные показатели надежности газораспределительной системы (ГС). К ним относятся математическое ожидание, дисперсия и среднеквадратическое отклонение (с.к.о.) пропускной способности ГС, а также коэффициент надежности газопровода. **Методы:** эквивалентирования, аналитический метод на уровне случайных Марковских процессов – схема «гибели и размножения», теоремы сложения и умножения вероятностей, композиция рядов распределения; математическая модель анализа надежности проектируемого магистрального газопровода (МГ). **Результаты.** На основе математической модели оценки надежности проектируемого магистрального газопровода и разработанной вычислительной программы были выполнены расчеты по определению интегральных показателей надежности условной газораспределительной системы. Исследования показали, что при изменении исходных показателей надежности (интенсивностей отказов и восстановлений) элементов ГС на одинаковую величину их влияние на изменение интегральных показателей надежности ГС имеет разную силу. **Выводы.** На основе предложенной математической модели анализа надежности ГС показано влияние показателей интенсивности отказов и интенсивности восстановлений элементов, характеризующих безотказность и ремонтпригодность газотранспортных систем, на ее интегральные показатели надежности, в частности, на коэффициент надежности.

Ключевые слова: газораспределительные системы, математическая модель, оценка надежности, интегральные показатели надежности, интенсивности отказов и восстановлений.

Цитирование: Илькевич Н.И., Дзюбина Т.В., Калинина Ж.В. Развитие методов анализа и обеспечения надежности газораспределительных систем в задачах комплексного энергоснабжения крупных территориальных образований // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3 (23). С. 89-100. DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.008.

Введение. Анализ структуры потребления природного газа в РФ за последние несколько лет [1] показывает рост использования газа в жилом секторе за счет активного строительства новых жилых агломераций, коттеджных и дачных поселков (преимущественно в ком-

мунально-бытовой сфере и у населения), а также в крупных промышленных комплексах. Одновременно с этим здесь же растет спрос на электрическую и тепловую энергию.

Для удовлетворения этого спроса в настоящее время реализуется общемировая тенденция развития распределенной генерации энергии [2], представляющая собой применение небольших установок – распределенных источников генерации электрической и тепловой энергии. В силу ряда преимуществ по сравнению с другими видами топлива и ископаемыми энергоносителями природный газ в ближайшей и отдаленной перспективе станет основным видом топлива, используемым в централизованной и распределенной генерации электрической и тепловой энергии [3].

Таким образом, активная газификация крупных территориальных образований для нужд их комплексного энергоснабжения приводит к необходимости развития систем централизованного газоснабжения и газовых распределительных сетей, росту охватываемой ими территории.

С другой стороны, продолжается увеличение общей протяженности газораспределительных систем (ГС) и усложнение конфигурации схем газопроводов. Системы изготавливаются из новых материалов, используются современные технологии для тепло- и гидроизоляции, минимизируются процессы коррозии и отложений на внутренней поверхности труб, внедряются новое высокоманевренное компрессорно-силовое оборудование и качественная запорно-регулирующая арматура и т.д.

Все перечисленные факторы влияют на надежность работы газораспределительных систем и предъявляют высокие требования со стороны потребителей энергии к безаварийной их работе.

1. Проблематика надежности. Под *надежностью* понимается свойство газоснабжающих систем (ГСС) выполнять заданные функции в заданном объеме при определенных условиях функционирования, т.е. бесперебойно обеспечивать потребителей газом и не допускать ситуаций, опасных для людей и окружающей среды [4].

Под газовыми распределительными сетями (ГРС) понимается система, состоящая из параллельно-последовательно соединенных газопроводов и газоперекачивающих агрегатов компрессорных сооружений для снабжения природным газом крупных территориальных образований.

Газораспределительная система является частью газотранспортной системы (предприятия), однако достаточно сложной и содержащей большое число разнородных элементов, таких как, газораспределительные станции, компрессорные станции, линейные участки (ЛУ) трубопроводов, линейные компрессорные станции (КС) для перекачки газа, перемычки при многониточном газопроводе и др. оборудование.

Основными элементами, имеющими наибольший удельный вес по влиянию, как на стоимость, так и на общую надежность ГС, являются ЛУ и КС.

Методы расчета надежности можно классифицировать по используемому математическому аппарату на методы *аналитические* [5] и методы *статистического моделирования* [6]. Кроме того, все методы расчета надежности можно поделить на две части по воспроизведению свойств объекта, а именно: методы, рассматривающие отдельно *случайные состояния* объекта, и методы, рассматривающие *случайный процесс* функционирования объекта.

Полная классификация методов по двум указанным признакам позволяет разделить их на четыре группы, которые охватывают все существующие методы, причем в газоснабжении в какой-то степени получили развитие все методы.

В России достаточно плотно задачами исследования надежности МГ стали заниматься в середине 1970 годов [7-10] в том числе и в ИСЭМ СО РАН [11, 12].

По данному вопросу имеется большое количество работ. Так, например, в работах используются аналитические методы теории марковских цепей с непрерывным временем как на уровне случайных событий [7, 8], так и на уровне случайных процессов [9, 11]. Имеются методики оценки надежности с гидравлической увязкой [10].

Наиболее общим средством изучения систем с вероятностным поведением является *метод статистических испытаний*. В работе [9] была предложена методика на основе метода Монте-Карло с использованием двух моделей газопровода: вероятностной и гидравлической, на уровне случайных событий, в [13] предлагается использовать для решения задач надежности газопроводов метод статистических испытаний, но уже на уровне случайных процессов.

В наиболее полном виде методики и математические модели расчета надежности систем газоснабжения, в том числе и магистральных газопроводов (МГ) и систем распределения газа, созданные в России в 1980–1990 гг., представлены в справочном издании [14].

За рубежом имеются достаточно большие газоснабжающие системы, и в последнее время стали появляться работы, посвященные надежности газопроводов, в частности [15 – 18], в последних из них используется метод статистических испытаний. Можно также выделить некоторые стандартные программы, которые нашли применение при оценке надежности газоснабжения потребителей, например, программный комплекс (ПК) моделирования надежности и безопасности Relex Reliability Studio 2007 [19] или ПК STATISTICA, разработанные в США [20].

В ИСЭМ СО РАН продолжают исследования основных проблем надежности ГСС и МГ в частности [21, 22]. Анализ надежности МГ осуществляется аналитическим методом на уровне случайных процессов – на основе аналитического метода «гибели – размножения» из теории массового обслуживания [23, 24]. Основная исходная надежностная информация, используемая в модели анализа надежности газопроводов – это *интенсивности отказов* его элементов: отдельных участков линейной части, газоперекачивающих агрегатов и т.д., $\lambda = 1/T_p$, и *интенсивности восстановления* этих элементов, $\mu = 1/T_g$, где T_p – среднее время исправной работы элемента между отказами и T_g – среднее время восстановления элемента. Эти показатели характеризуют такие свойства надежности, как безотказность и ремонтпригодность. Надо отметить, что подобный подход использовался и другими авторами [14, 25]. Внимание, прежде всего, уделялось такому свойству надежности как безотказность. Хотя известно, что средствами повышения надежности работы элементов системы являются их резервирование (введение избыточности) и обеспечение надлежащих ремонтов вышедшего в аварийное состояние оборудования.

В заключение можно отметить, что для оценки надежности газопроводов разработаны весьма эффективные методы с различной степенью упрощений и допущений. Однако, в этом множестве исследований не нашли достаточной проработки вопросы влияния показателей интенсивности отказов и интенсивности восстановлений на интегральные показатели надежности газораспределительных систем.

Актуальность данной работы заключается в постановке задачи исследования влияния показателей безотказности и ремонтпригодности оборудования на интегральные показатели надежности газораспределительной системы, которая оценивается с помощью аналитического метода – схемы «гибели – размножения».

2. Показатели безотказности и ремонтпригодности [4]. Показателями надежности работы оборудования газораспределительной системы являются количественные характеристики одного или нескольких его свойств.

Так, например, одними из основных *показателей безотказности* являются вероятности безотказной работы и отказа, интенсивность отказов.

Вероятность безотказной работы (p) – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не возникнет, вероятность отказа (q) – это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ возникает; $p + q = 1$.

Интенсивность отказов (λ) есть предел отношения условной вероятности отказа объекта на интервале времени или наработки непосредственно после данного момента времени при условии, что до этого момента отказ объекта не возник, к продолжительности этого интервала при его неограниченном уменьшении.

Приближенно интенсивность отказов есть условная вероятность отказа за малую единицу времени непосредственно после времени, определяемая в предположении, что до этого момента отказа не было.

Показателями ремонтпригодности являются: вероятность восстановления, интенсивность восстановления и среднее время восстановления.

Вероятность восстановления есть вероятность того, что время восстановления оборудования не превысит заданного.

Интенсивность восстановления (μ) есть предел отношения условной вероятности восстановления объекта на интервале времени непосредственно после данного момента при условии, что до этого момента восстановление еще не произошло, к продолжительности этого интервала при его неограниченном уменьшении.

Среднее время восстановления есть математическое ожидание времени восстановления оборудования.

Упрощенно можно записать следующие соотношения между вероятностями безотказной работы (p) и отказа (q), интенсивностями отказов (λ) и восстановлений (μ) элементов

$$q = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}; \quad p = \frac{\mu}{\lambda + \mu}.$$

3. Математическая модель анализа надежности газораспределительной системы [21]. Носит оценочный характер. Объектом исследования является сложный элемент, состоящий из параллельно и последовательно соединенных звеньев – ЛУ трубопроводов и КС.

При создании модели были введены следующие допущения:

1. Газораспределительная система рассматривается как отдельный элемент системы газоснабжения, вне связи с сырьевым источником газа и потребителем газа.

2. Задана принципиальная схема газораспределительной системы: число ниток труб в общем случае разного диаметра между газораспределительными станциями МГ и потребителями газа крупного территориального образования. Некоторые газопроводы могут иметь КС для компенсации потерь давления при подаче газа удаленным потребителям. Для этих газопроводов, которые могут состоять из нескольких трубопроводов, задается: число линейных участков; число КС; число установленных газоперекачивающих агрегатов (ГПА); число резервных ГПА. Резервные агрегаты предусмотрены только на компрессорных станциях. Линейная часть газораспределительной системы не дублируется.

3. Рассматриваются только стационарные состояния ГС, переходные режимы не рассматриваются.

4. Среди свойств надежности газораспределительной системы учитываются его безотказность и ремонтпригодность (заданы интенсивности отказов и восстановлений ниток и газоперекачивающих агрегатов). Причем потоки отказов и восстановлений оборудования (ГПА и ниток трубопроводов) являются простейшими потоками.

5. Учитываются только аварийные отключения оборудования, текущие ремонты и ремонты в виде профилактики. Отключения оборудования в планово-предупредительный ремонт в данной постановке не рассматриваются.

В общем виде задача оценки надежности формулируется следующим образом: исходя из схемы соединения элементов газораспределительной системы, определенного способа резервирования, а также надежности линейных участков трубопроводов и газоперекачивающих агрегатов, характеризующих аварийность и ремонтпригодность, определяются интегральные показатели надежности ГС, а именно: ряд распределения вероятностей работоспособного состояния газопровода, математическое ожидание, дисперсия и среднее квадратическое отклонение (с.к.о.) пропускной способности МГ, коэффициент надежности газопровода (K_n), средний процент потерь пропускной способности ГС, связанных с отказами основного оборудования.

Для анализа надежности ГС используется схема «гибели – размножения». Это аналитический метод, который рассматривает объект на уровне случайного процесса и предполагает определение переходных вероятностей из одного состояния в другое, составление и решение системы алгебраических уравнений марковского процесса.

Схема «гибели – размножения» хорошо себя зарекомендовала при анализе надежности систем однородных элементов [23]. В данной работе ГС рассматривается в виде совокупности как однородных, так и неоднородных систем, поэтому для приведения его во втором случае к однородному виду могут быть использованы методы эквивалентирования [26], когда исходная система неоднородных элементов заменяется системой из однородных элементов. В качестве условий эквивалентирования рассматриваются равенства: числа исходных и эквивалентных элементов (ниток), суммарных пропускных способностей и их математических ожиданий в аварийном простое в однородной и неоднородной системах.

Схема «гибели – размножения» используется для восстанавливаемых после ремонта элементов и предполагает наличие резервов.

Линейная часть (ЛЧ) ГС состоит из n одинаковых (эквивалентных) ниток, резерв в общем случае не рассматривается. Время безотказной работы каждой нитки распределено по показательному закону с интенсивностью отказа λ .

КС ГС может состоять из $(n' + r)$ одинаковых ГПА соответствующего типа. Время безотказной работы каждого ГПА распределено по показательному закону, причем n' агрегатов может находиться в рабочем состоянии и иметь интенсивность отказа, равную λ' , r агрегатов может находиться в резерве и в этом состоянии не отказывать.

Схема «гибели – размножения» предусматривает, что каждый отказавший рабочий агрегат заменяется из резерва (из числа r), а каждый восстановленный агрегат поступает в резерв.

Каждый отказавший элемент (нитка или агрегат) ремонтируется одной ремонтной бригадой. Общее количество ремонтных бригад равно R для ЛЧ и R' для КС. Время ремонта распределено по показательному закону с интенсивностью восстановления μ для ЛЧ и μ' для КС. Если все ремонтные бригады заняты, то отказавший элемент становится в очередь и ожидает начала своего ремонта.

Работа таких систем может описываться процессом «гибели – размножения». Обозначим через P_k вероятность того, что в системе в момент t неисправны k элементов из n или n' , при этом вероятность P_k в общем случае определяется по формуле:

$$P_k = \frac{\lambda_0 \cdot \lambda_1 \cdot \dots \cdot \lambda_{k-1}}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \dots \cdot \mu_k} \cdot P_0,$$

где

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_0}{\mu_1} + \frac{\lambda_0 \cdot \lambda_1}{\mu_1 \cdot \mu_2} + \dots + \frac{\lambda_0 \cdot \lambda_1 \cdot \dots \cdot \lambda_{k-1}}{\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \dots \cdot \mu_k}}.$$

Для ЛЧ МГ параметры процесса λ_{k-1} и μ_k определяются формулами:

$$\lambda_{k-1} = (n - k + 1) \cdot \lambda \text{ при } 0 < k \leq n,$$

$$\mu_k = \begin{cases} k \cdot \mu, & \text{если } k \leq R \\ R \cdot \mu, & \text{если } k > R. \end{cases}$$

Для КС ГС параметры процесса λ_{k-1} и μ_k определяются формулами:

$$\lambda_{k-1} = \begin{cases} n' \cdot \lambda, & 0 \leq k - 1 \leq r \\ (n' + r - k + 1) \cdot \lambda, & r \leq k - 1 \leq n' + r \end{cases}$$

$$\mu_k = \begin{cases} k \cdot \mu', & \text{если } k \leq R' \\ R' \cdot \mu', & \text{если } k > R'. \end{cases}$$

Таким образом, для звеньев ГС определяются ряды распределения работоспособного состояния ЛУ и КС. Первый член таких рядов представляет вероятность того, что все элементы (трубопроводы или ГПА) находятся в рабочем состоянии, и пропускная способность составляет суммарную пропускную способность всех этих элементов; второй член ряда – это вероятность того, что отказал один элемент и пропускная способность объекта уменьшится на пропускную способность отказавшего элемента и т.д.; последний член ряда покажет вероятность того, что отказали все элементы и пропускная способность равна нулю. Сумма всех этих вероятностей равна единице.

Затем осуществляется композиция (перемножение) рядов распределения элементов. Композиция осуществляется как для параллельно соединенных элементов, так и для последовательно соединенных сложных элементов. При этом в первом случае получаемые произведения вероятностей будут соответствовать сумме пропускных способностей входящих элементов, во втором случае – дискретной пропускной способности, связанной с ее наименьшим значением одного из рядов распределения.

В результате этих вычислений определяется конечный ряд распределения вероятностей работоспособного состояния газораспределительной системы в целом $P(Q)$, Q – пропускная способность трубопроводов. По нему определяются следующие интегральные показатели надежности.

Математическое ожидание пропускной способности ГС за рассматриваемый расчетный интервал времени

$$M[Q] = \sum_{i=1}^I Q_i \cdot p_i(Q_i),$$

где $p_i(Q_i)$ – вероятность работоспособного состояния ГС Q_i , $i = \overline{1, I}$; I – количество членов в результирующем ряду распределения $P(Q)$.

Дисперсия и с.к.о. пропускной способности МГ

$$D[Q] = \sum_{i=1}^I (Q_i - M[Q])^2 \cdot p_i(Q),$$

$$\sigma[Q] = \sqrt{D[Q]}.$$

Коэффициент надежности газопровода K_H

$$K_H = \frac{M[Q]}{Q_H},$$

где Q_H – номинальное значение пропускной способности ГС.

Средний процент потерь пропускной способности МГ, связанных с отказами основного оборудования

$$K_{II} = (1 - K_H) \cdot 100\%$$

4. Пример расчета показателей надежности газораспределительной системы

Для иллюстрации изложенного подхода к определению интегральных показателей надежности была рассмотрена условная газотранспортная система, состоящая из двух параллельно работающих ветвей, эквивалентная схема ГС приведена на рис. 1.

Линейные участки первой ветви ГС состоят из двух параллельно работающих трубопроводов без резерва и одной КС. Компрессорная станция содержит 5 параллельно работающих ГПА (4 рабочих и 1 резервный), ЛУ и КС являются последовательно включенными звеньями. Вторая ветвь состоит из одноконтурного газопровода без КС.

На интегральные показатели надежности оказывает влияние число ремонтных бригад, здесь их влияние не рассматривалось. Для каждого линейного участка и компрессорной станции было предусмотрено по одной ремонтной бригаде.

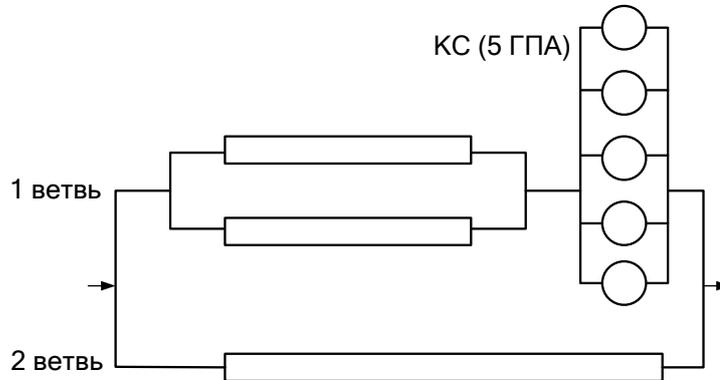


Рис. 1. Эквивалентная схема условной газораспределительной системы

Исходные условные надежностные и технико-технологические параметры ЛЧ и ГПА сведены в таблице 1.

Данная газораспределительная система подает газ от ГРС МГ до потребителей промышленности и энергетики крупного территориального образования. Её пропускная способность равна $Q_H = 0.4$ млрд. $m^3/год$, длина – 250 км.

Таблица 1. Исходные данные

Показатели / Indicators	Трубы		ГПА
	1 ветвь	2 ветвь	
Интенсивность отказов. ЛЧ (1/год км)	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,63 \cdot 10^{-3}$	3,65
ГПА (1/год агр)			
Интенсивность восстановлений (1/год)	108,04	171,44	90,88

На основе математической модели анализа надежности ГС были вычислены ряды распределения вероятностей работоспособного состояния условной газораспределительной системы. Математическое ожидание ее пропускной способности равно $M(Q) = 0,392$ млрд. м³/год, коэффициент надежности $K_n = 0,392/0,4 = 0,98$.

Были выполнены предварительные расчеты по оценке влияния интенсивностей отказов и восстановлений на изменение интегральных показателей надежности ГС. Исследования показали, что если увеличить интенсивности отказов трубопроводов и газоперекачивающих агрегатов на 10% от основного варианта при неизменных интенсивностях восстановлений этих элементов, то коэффициент надежности составит $K_n = 0,972$; при уменьшении интенсивностей восстановлений трубопроводов и ГПА на 10% при неизменных интенсивностях отказов этих элементов коэффициент надежности будет равен $K_n = 0,984$.

Таким образом, очевидно, что при изменении исходных показателей надежности элементов ГС на одинаковую величину их влияние на изменение интегральных показателей надежности ГС имеет разную силу. Такие исследования могут быть полезны в изучении влияния исходных показателей надежности разного оборудования на интегральные показатели надежности сложных устройств.

Выводы. 1. Все возрастающая роль природного газа в обеспечении комплексного энергоснабжения крупных территориальных образований обуславливает актуальность исследований по совершенствованию методов анализа надежности газораспределительных систем. 2. На основе предложенной математической модели анализа надежности ГС возможны исследования влияния показателей интенсивности отказов и интенсивности восстановлений элементов, характеризующих безотказность и ремонтпригодность газотранспортных систем на ее интегральные показатели надежности.

Благодарность. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (FWEU-2021-0002 № АААА-А21-121012090012-1) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годовые отчеты ОАО «Газпром». Режим доступа: <https://www.gazprom.ru/investors/disclosure/reports/2020> (дата обращения: 01.07.2021).
2. Ньюшлосс Д., Ряпин И. Ю. Тенденции развития распределенной генерации. Энергосбережение. 2012. № 7. С. 18-26.
3. Сурнин Н. В. Многоуровневое моделирование интегрированных энергетических систем для комплексного энергоснабжения крупных территориальных образований // Системные исследования в энергетике. Сборник трудов молодых ученых ИСЭМ СО РАН. Иркутск. 2016. вып. 46. С. 38-4.
4. Надежность систем энергетики. Сборник рекомендуемых терминов М.: ИАЦ «Энергия». 2007. 192 с.
5. Вентцель С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа. 2001. 575 с.
6. Бусленко Н. П., Шнейдер Ю. А. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) и его реализация на ЭВМ. М.: Наука. 1969. 331 с.
7. Афанасьев А.А., Кифер Ю.И., Подберезкин А.М., Райкин А.Л. Методы анализа надежности газотранспортных и газодобывающих предприятий // Методические вопросы исследования надежности БСЭ. Иркутск. 1975. Вып. 5. С. 73-79.
8. Александров А.В. Надежность систем дальнего газоснабжения. М.: Недра. 1976.
9. Ставровский Е.Р., Сухарев М.Г., Карасевич А.М. Методы расчета надежности магистральных газопроводов. Новосибирск: Наука. 1982. 126 с.

10. Вольский Э.Л., Гарляускас А.И., Герчков С.В. Надежность и оптимальное резервирование газовых промыслов и магистральных газопроводов. М.: Недра. 1980. 279 с.
11. Илькевич Н.И. Оптимизация надежности газотранспортных систем как элемента Единой газоснабжающей системы // Методические вопросы исследования надежности БСЭ. Вып. 1. Иркутск. 1974. С. 50 - 67.
12. Илькевич Н.И., Рабчук В.И., Хрусталева Н.М. Исследование надежности характеристик газотранспортных систем, используемых в задаче оптимального проектирования структуры Единой газоснабжающей системы с учетом надежности // Методические вопросы исследования надежности БСЭ. Каунас. 1982. Вып. 26. С. 164-175.
13. Акоев Е.П. Статистическое моделирование газопроводов // Транспорт и хранение газа. М.. 1978. Вып. 11. С. 17 - 21.
14. Надежность систем энергетики и их оборудования: Справ. в 4 т.. М.: Недра. 1994.
15. Convention on the transboundary effects of industrial accidents. Convention on the protection and use of transboundary watercourses and international lakes/ Safety Guidelines And Good Practices For Pipelines: Printed at United Nations. Geneva. 2008. 20 p.
16. Xia_Wu, Changjun_Li, Yufa_He, Wenlong_Jia Operation Optimization of Natural Gas Transmission Pipelines Based on Stochastic Optimization Algorithms: A Review //Mathematical Problems in Engineering Volume 2018. P.18.
17. Witek M. Steel Pipeline Failure Probability Evaluation Based on In-line Inspection Results //Pipeline Technology Journal. 3/2018. Pp. 16-21.
18. Witek M. Gas transmission failure probability estimation and defect repairs activities based on in-line inspection data //Engineering Failure Analysis. Volume 70. 2016. Pp. 255-272.
19. Обзор программных комплексов по расчету надежности сложных технических систем. Режим доступа: <https://kit-e.ru/technologies/obzor-programmnyh-kompleksov-po-raschetu-nadezhnosti-slozhnyh-tehnicheskikh-sistem/> (дата обращения: 01.07.2021).
20. Портал знаний StatSoft. Режим доступа: <http://www.statistica.ru/> (дата обращения: 01.07.2021).
21. Илькевич Н. И., Дзюбина Т. В., Калинина Ж. В. Многоуровневое моделирование развития систем газоснабжения. Новосибирск: Наука. 2014. 217 с.
22. Дьяков А.Ф., Стенников В.А., Сендеров С.М. и др. Надежность систем энергетики: Проблемы, модели и методы их решения. Новосибирск: Наука. 2014. 284 с.
23. Новиков О.А., Петухов С.И. Прикладные вопросы теории массового обслуживания. М.: Советское радио. 1969. 400 с.
24. Dr. János Sztrik Basic Queueing Theory. University of Debrecen, Faculty of Informatics. 2012. 193 p.
25. Erik A. van Doorn Shell Polynomials and Dual Birth-Death Processes, Department of Applied Mathematics. University of Twente. 2016. V. 12. 15 p.
26. Дубицкий М.А., Руденко Ю.Н., Чельцов М.Б. Выбор и использование резервов генерирующей мощности в электроэнергетических системах. Ангарск: АГТА. 2015. 365 с.

UDK 621.311.1

**DEVELOPMENT OF METHODS FOR ANALYZING AND ENSURING THE
RELIABILITY OF GAS DISTRIBUTION SYSTEMS IN THE TASKS OF INTEGRATED
POWER SUPPLY OF LARGE TERRITORIAL FORMATIONS**

Nikolay I. Ilkevich

Doctor of engineering sciences, e-mail: ilkev@isem.irk.ru

Tatyana V. Dzyubina

PhD., Senior Researcher, e-mail: tvleo@isem.irk.ru

Zhanna V. Kalinina

PhD., Researcher, e-mail: zhannochka_k@mail.ru

Melentiev Energy Systems Institute

of Siberian branch of Russian Academy of Science (ESI SB RAS),

664033 Irkutsk, Russia, Lermontov street 130.

Abstract. The **Relevance of the research** is due to the need for active gasification of large territorial entities (new residential agglomerations under construction, cottage and dacha settlements, as well as large industrial complexes). On the other hand, the increase in the total length of gas distribution systems and the complexity of the configuration of gas pipeline schemes continues. These factors affect the reliability of the gas distribution systems and place high demands on the part of energy consumers for trouble-free operation. **Purpose.** The main initial reliability information used for analyzing the reliability of gas pipelines is the failure rates of its elements: individual sections of the linear part, gas pumping units, etc., and the recovery rates of these elements. These indicators characterize such properties of reliability as reliability and maintainability. The purpose of the research is to assess the impact of reliability and maintainability of equipment on the integral reliability indicators of the gas distribution system (GDS). These include the expectation, variance and standard deviation of the throughput of the GDS, as well as the reliability coefficient of the pipeline. **Methods:** equivalent methods, analytical method at the level of random Markov processes - the scheme of "death and reproduction", the theorem of addition and multiplication of probabilities, the composition of distribution series; mathematical model of reliability analysis of the designed main gas pipeline. **Results.** On the basis of a mathematical model for assessing the reliability of the designed main gas pipeline and the developed computational program, calculations were performed to determine the integral indicators of the reliability of the conventional gas distribution system. So, studies have shown that when the initial reliability indicators (failure rates and recoveries) of the GDS elements are changed by the same amount, their effect on the change in the integral reliability indicators of the GDS has a different effect. **Conclusion.** On the basis of the proposed mathematical model for analyzing the reliability of the GDS, the influence of the failure rate indicators and the recovery rate of elements characterizing the reliability and maintainability of gas transmission systems on its integral reliability indicators, in particular, on the reliability coefficient, is shown.

Keywords: gas distribution systems, mathematical model, reliability assessment, integral indicators of reliability, failure rates and recoveries.

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment Project (FWEU-2021-000 № AAAA-A21-121012090012-1) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030.

REFERENCES

1. Godovyie otchety OAO «Gazprom» [Annual reports of OAO Gazprom]. Available at: <https://www.gazprom.ru/investors/disclosure/reports/2020> (accessed 01.07.2021) (in Russian)
2. Nyushloss D., Ryapin I. YU. Tendentsii razvitiya raspredelennoy generatsii [Trends in the development of distributed generation]. Energoberezheniye = Energy saving. 2012. № 7. Pp. 18-26 (in Russian)

3. Surnin N. V. *Mnogourovnevoye modelirovaniye integrirovannykh energeticheskikh sistem dlya kompleksnogo energosnabzheniya krupnykh territorial'nykh obrazovaniy* [Multilevel modeling of integrated energy systems for integrated power supply of large territorial entities]. *Sistemnyye issledovaniya v energetike. Sbornik trudov molodykh uchenykh ISEM SO RAN = System research in energy. Collection of works of young scientists ISEM SB RAS.* Irkutsk. 2016. Vol. 46. P. 38-44 (in Russian)
4. *Nadezhnost' sistem energetiki. Sbornik rekomenduyemykh terminov* [Reliability of energy systems. Collection of recommended terms]. IATS «Energiya»=IAC "Energy". 2007. 192 p.
5. Venttsel' S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability Theory]. *Vysshaya shkola = Higher school.* 2001. 575 p (in Russian)
6. Buslenko N. P., Shneyder YU. A. *Metod statisticheskikh ispytaniy (metod Monte-Karlo) i yego realizatsiya na EVM* [Method of statistical tests (Monte Carlo method) and its implementation on a computer]. *Nauka = Science.* 1969. 331 p. (in Russian)
7. Afanas'yev A.A., Kifer Yu.I., Podberezkin A.M., Raykin A.L. *Metody analiza nadezhnosti gazotransportnykh i gazodobyvayushchikh predpriyatiy // Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti BSE* [Methods for analyzing the reliability of gas transmission and gas production enterprises // Methodological issues of research on the reliability of TSB]. Irkutsk. 1975. Vol. 5. Pp. 73-79 (in Russian)
8. Aleksandrov A.V. *Nadezhnost' sistem dal'nego gazosnabzheniya* [Reliability of long-distance gas supply systems]. *Nedra,* 1976 (in Russian)
9. Stavrovskiy Ye.R., Sukharev M.G., Karasevich A.M. *Metody rascheta nadezhnosti magistral'nykh gazoprovodov* [Methods for calculating the reliability of main gas pipelines]. *Novosibirsk: Nauka = Science.* 1982. 126 p. (in Russian)
10. Vol'skiy E.L., Garlyauskas A.I., Gerchkov S.V. *Nadezhnost' i optimal'noye rezervirovaniye gazovykh promyslov i magistral'nykh gazoprovodov* [Reliability and optimal redundancy of gas fields and main gas pipelines]. *Nedra.* 1980. 279 p. (in Russian)
11. Il'kevich N.I. *Optimizatsiya nadezhnosti gazotransportnykh sistem kak elementa Yedinoy gazosnabzhayushchey sistemy // Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti BSE* [Optimization of the reliability of gas transmission systems as an element of the Unified gas supply system // Methodological issues of the study of the reliability of the TSB]. Vol. 1. Irkutsk. 1974. Pp. 50-67 (in Russian)
12. Il'kevich N.I., Rabchuk V.I., Khrustaleva N.M. *Issledovaniye nadezhnostnykh kharakteristik gazotransportnykh sistem, ispol'zuyemykh v zadache optimal'nogo proyektirovaniya struktury Yedinoy gazosnabzhayushchey sistemy s uchetom nadezhnosti // Metodicheskiye voprosy issledovaniya nadezhnosti BSE* [Investigation of the reliability characteristics of gas transmission systems used in the problem of optimal design of the structure of the Unified gas supply system taking into account reliability // Methodological issues of research on the reliability of the TSB]. *Kaunas.* 1982. Vol. 26. Pp. 164-175 (in Russian)
13. Akoyev Ye.P. *Statisticheskoye modelirovaniye gazoprovodov* [Statistical modeling of gas pipelines]. *Transport i khraneniye gaza = Gas transport and storage.* 1978. Vol. 11. Pp. 17-21 (in Russian)
14. *Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya: Sprav. v 4 t.* [Reliability of energy systems and their equipment: Ref. in 4 volumes] *M.: Nedra.* 1994. 288 p. (in Russian)
15. *Convention on the transboundary effects of industrial accidents. Convention on the protection and use of transboundary watercourses and international lakes/ Safety Guidelines And Good Practices For Pipelines: Printed at United Nations.* Geneva. 2008. 20 p.

16. Xia Wu, Changjun Li, Yufa He, Wenlong Jia Operation Optimization of Natural Gas Transmission Pipelines Based on Stochastic Optimization Algorithms: A Review //Mathematical Problems in Engineering Volume 2018. P.18.
17. Witek M. Steel Pipeline Failure Probability Evaluation Based on In-line Inspection Results // Pipeline Technology Journal. 3/2018. Pp. 16-21.
18. Witek M. Gas transmission failure probability estimation and defect repairs activities based on in-line inspection data // Engineering Failure Analysis. Volume 70. 2016. Pp. 255-272.
19. Obzor programmnykh kompleksov po raschetu nadezhnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Review of software systems for calculating the reliability of complex technical systems]. Available at: <https://kit-e.ru/technologies/obzor-programmnyh-kompleksov-po-raschetu-nadezhnosti-slozhnyh-tehnicheskikh-sistem/> (accessed 01.07.2021) (in Russian)
20. StatSoft Knowledge Portal. Available at: <http://www.statistica.ru/> (accessed 01.07.2021) (in Russian)
21. Il'kevich N. I., Dzyubina T.V., Kalinina Zh. V. Mnogourovnevoye modelirovaniye razvitiya sistem gazosnabzheniya [Multilevel modeling of the development of gas supply systems]. Novosibirsk: Nauka = Science. 2014. 217 p. (in Russian)
22. D'yakov A.F., Stennikov V.A., Senderov S.M. i dr; otv. red. N.I. Voropay. Nadezhnost' sistem energetiki: Problemy, modeli i metody ikh resheniya [Reliability of energy systems: Problems, models and methods for their solution]. Novosibirsk: Nauka = Science. 2014. 284 p. (in Russian)
23. Novikov O.A., Petukhov S.I. Prikladnyye voprosy teorii massovogo obsluzhivaniya [Applied questions of queuing theory.] M.: Sovetskoye radio = Soviet radio. 1969. 400 p. (in Russian)
24. Dr. János Sztrik Basic Queueing Theory. University of Debrecen, Faculty of Informatics. 2012. 193 p.
25. Erik A. van Doorn Shell Polynomials and Dual Birth-Death Processes, Department of Applied Mathematics. University of Twente. 2016. V. 12. 15 p.
26. Dubitskiy M.A., Rudenko Yu.N. Chel'tsov M.B. Vybor i ispol'zovaniye rezervov generiruyushchey moshchnosti v elektroenergeticheskikh sistemakh [Selection and use of generating capacity reserves in electric power systems]. 2-oye izd. pererab. i dop. Angarsk: AGTA. 2015. 365 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 09.07.2021; одобрена после рецензирования 15.09.2021; принята к публикации 30.09.2021.

The article was submitted 09.07.2021; approved after reviewing 15.09.2021; accepted for publication 30.09.2021.

МЕТОД И МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РАЗВИТИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ НА СПРОС И ЦЕНУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РЕГИОНЕ

Гальперова Елена Васильевна

к.т.н., доцент, старший научный сотрудник, e-mail: galper@isem.irk.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН

664033, г. Иркутск, Россия, ул. Лермонтова, 130.

Аннотация. Актуальность статьи обусловлена переходом энергетики на путь интеллектуального развития. Одной из характеристик этого перехода является расширение перспектив децентрализованного производства электроэнергии. В новых условиях у потребителя появляется возможность изменять свое энергопотребление в зависимости от стоимости энергоресурсов, иметь собственные установки по производству и/или хранению электроэнергии. В статье кратко представлены особенности использования и технологии распределенной генерации (РГ) энергии в отдельных секторах экономики (промышленности, жилом и коммерческом секторах, на транспорте). Приведены некоторые способы определения перспективных значений мощностей РГ у потребителей. Предложен подход к моделированию и оценке влияния масштабов распределенной генерации на долгосрочное развитие региональных систем энергоснабжения. Отличительной чертой подхода является использование ранее разработанной оптимизационной стохастической модели объединенной энергосистемы макрорегиона в качестве основы для разработки ее региональной модификации и источника прогнозной информации об условиях развития региональной энергосистемы. Несмотря на то, что предложенный подход дает лишь приблизительную оценку, это позволяет очертить перспективный диапазон изменения стоимости и спроса на электроэнергию в регионе при разных вариантах развития РГ.

Ключевые слова: прогнозирование, распределенная генерация, потребители, энергоносители, спрос, ТЭК, электроэнергетика, Монте-Карло, оптимизация, неопределенность.

Цитирование: Гальперова Е. В. Метод и модели для оценки влияния развития распределенной генерации на спрос и цену электроэнергии в регионе // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3 (23). С. 101-116. DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.009.

Введение. В существующей практике исследования перспективных направлений развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России [1-4] определение структуры производства энергоносителей и объемов расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в комплексе осуществляется на основе удовлетворения заранее определенной потребности в энергоносителях экономики, внешней по отношению к ТЭК. При этом прогнозирование потребности в ТЭР, осуществляется, в первую очередь, для страны в целом. Энергопотребление территорий определяется, как правило, на основе региональной структуры энергопотребления последнего доступного отчетного года, скорректированного с учетом принятых к осуществлению инвестиционных проектов. Подобный подход был правомерным, поскольку взаимоотношения потребителя и производителя были основаны на однонаправленном потоке энергоресурсов от производства к потреблению. При переходе энергетики на путь интеллектуального развития¹ основной тенденцией становится децентрализация производства энергии, важным звеном в которой является потребитель. В новых условиях у него появляются возможности изменять свое энергопотребление при изменении стоимости энергоресурсов, а также иметь собственные установки по производству и/или хранению электроэнергии. Потребитель-производитель (просьюмер),

¹ проект «Цифровая энергетика», Стратегия «Цифровая трансформация электроэнергетики России» <https://minenergo.gov.ru/node/17936>

меняет схему и величину потоков электроэнергии в энергосистемах и может повлиять на результаты оптимизации ТЭК. В этой связи все большую актуальность приобретают исследования на уровне регионов, где происходит согласование интересов производителей и потребителей энергии, оценка условий, возможностей и масштабов распределенной генерации. Изменение условий развития региональных систем энергоснабжения требует новых подходов к прогнозным исследованиям перспективных направлений энергетики.

1. Распределенная генерация. Пока не существует единого общепризнанного определения понятия распределенная генерация энергии. Разные специалисты относят к ней производство энергии в децентрализованных энергосистемах (не подключенным к магистральным энергосетям), использование энергоисточников мощностью до 25 МВт и/или 20 Гкал/ч, системы когенерации (совместного производства электроэнергии и тепла), системы с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и др. [5-7].

В [8] указано, что «распределенная генерация есть выработка электроэнергии/тепла по месту ее потребления. Отсутствие сети исключает потери (затраты) на передачу электроэнергии/тепла. При этом подразумевается наличие множества потребителей, которые производят электрическую/тепловую энергию для собственных нужд, направляя ее излишки в общую сеть».

В мире малая распределенная энергетика вот уже несколько десятилетий является ведущим трендом. По оценкам экспертов данная тенденция сохранится в ближайшее десятилетие. В [9] предполагается, что в мире мощность РГ вырастет с 132,4 ГВт в 2017 г. до 528,4 ГВт в 2026 г. По результатам исследований Международного энергетического агентства, распределенная энергетика может обеспечить до 75% новых подключений в ходе глобальной электрификации до 2030 г. [10]. В [11] отмечается, что «развитие распределенной генерации, в том числе собственной генерации предприятий, становится экономически целесообразным из-за развития современных технологий, обеспечивающих сопоставимые стоимостные показатели централизованной и распределенной генерации, а также ввиду общего тренда на вовлечение в топливно-энергетический баланс экологически чистых способов производства электроэнергии». Корпоративная микрогенерация активно развивается, в том числе, благодаря государственным субсидиям на установку собственных мощностей у предприятий и населения. Например, в Германии запущен механизм частичной компенсации стоимости оборудования с бесплатным подключением к сетям.

Точных данных по доле распределенной генерации и динамике ее изменения в российской энергетике практически нет. В [10] суммарная мощность объектов распределенной генерации в России по состоянию на 2017 г. оценивалась величиной около 23-24 ГВт или 9-9,5%. Представленные там же исследования показывают, что в сценарии полного использования потенциала распределенной энергетике с ее помощью возможно закрыть всю прогнозную потребность в генерирующих мощностях в ЕЭС России к 2035 г. в размере 54-66 ГВт.

2. Особенности использования и технологии распределенной генерации в разных секторах экономики.

Промышленность. Распределенная генерация востребована на предприятиях добывающей промышленности (например, нефтяной и газовой), машиностроения, обрабатывающей промышленности, лесопромышленного комплекса, а также на производствах непрерывного цикла, где остановка процесса чревата серьезными технологическими и экономическими последствиями (например, стекольной) [11].

Основными технологиями РГ в промышленности являются [12]:

- ТЭЦ для средних и крупных предприятий;
- модульные автоматизированные мини-ТЭЦ для небольших предприятий;

- установки использования возобновляемых источников энергии, производящих только электрическую энергию (геотермальные установки, малые ГЭС и др.).

Применение тех или иных технологий на промышленных предприятиях определяется:

- особенностям нагрузки и интегрирования в производственные технологические процессы конкретного потребителя;
- наличием побочных продуктов производства, которые можно использовать в качестве энергоносителя и/или недорогих видов топлива;
- соотношением цен на электрическую энергию и топливо;
- размером платы за присоединение к электрическим сетям и тарифа на передачу электрической энергии;
- иных условий, учитывающих специфику каждого отдельного потребителя.

Транспорт. Согласно [13,14] установки РГ используются для обеспечения тяги поездов и нужд нетяговых железнодорожных потребителей. Особую сферу применения установок РГ образуют системы гарантированного электроснабжения устройств сигнализации, централизации и автоблокировки, обеспечивающие повышение безопасности движения поездов. Установки РГ могут объединяться в микроэнергосистемы, построенные, как правило, на базе НВИЭ и предназначенные для электроснабжения территориально обособленных объектов железнодорожного транспорта.

Для аэропортов требуется высочайший уровень надежности электроснабжения. Они являются идеальным приложением для технологии тригенерации – одновременного производства электроэнергии, тепла и холода. Собственную генерацию уже имеют аэропорты Мюнхена, Дюссельдорфа, Рима, Милана, Лос-Анджелеса, Калгари и др. [15].

Согласно [16] парк электромобилей в мире в 2020 году составил 10 миллионов единиц (1% от общего количества автомобилей), что на 43% больше, чем в 2019 году. В контексте развития РГ речь идет о технологии сетевого хранения электроэнергии в аккумуляторах электромобилей и гибридных электромобилей, подключенных к общей сети, иначе называемой концепцией динамической зарядки – Vehicle-to-grid (V2G) [17]. Предполагается, что у владельцев автомобилей с технологией V2G будет возможность продавать электроэнергию в энергосистему в часы, когда машина не используется, заряжать автомобиль в часы, когда электроэнергия дешевле, подключать автомобили к собственному дому и использовать их в качестве бесперебойного питания для дома или офиса. Таким образом, V2G-технология может создать дополнительный источник энергии. **Владельцы автопарков смогут поставлять электроэнергию в сеть, а накопленная энергия может быть использована в случае отключения электроэнергии, повышая надежность энергоснабжения.** Уже сегодня V2G-технология широко развивается правительством США и компанией Google [18].

Непроизводственная сфера. В настоящее время распределенная энергогенерация востребована в удаленных населенных пунктах, объектах, не имеющих доступа к централизованному энергоснабжению, а также в медицинских организациях, банках, санаториях, горнолыжных курортах, небоскребах, крупных торговых, деловых и выставочных центрах, отелях, ЦОДах² и других объектах, где очень значимо бесперебойное непрерывное надежное энергообеспечение.

На выбор тех или иных технологий РГ оказывает влияние большое количество факторов:

- типы поселений – мегаполисы, малые города, сельская местность;

² центры обработки данных

- здания по типу использования – жилое, коммерческое, средняя площадь крыши на единицу площади и пр.;
- здания по году постройки – новое или существующее;
- возможности энергоснабжения территории – наличие газопроводов, централизованного электроснабжения, тарифы на электроэнергию, стоимость топлива и пр.;
- климатические особенности территории – солнечная инсоляция, средняя скорость ветра, количество градусо-дней отопительного периода и пр.

В жилом секторе, как правило, используются только солнечные фотоэлектрические панели, небольшие ветрогенераторы и топливные элементы. В коммерческом этот набор значительно шире (табл.1) [19].

Таблица 1. Технологии распределенной генерации, применяемые в секторах непромышленной сферы

Виды ресурсов	Жилой сектор	Коммерческий сектор
Возобновляемые	Солнечные фотоэлектрические (PV) Ветрогенераторы	Солнечные фотоэлектрические (PV) Ветрогенераторы Гидроэлектростанции Древесина Твердые бытовые отходы
Невозобновляемые	Топливные элементы на природном газе	Топливные элементы на природном газе Поршневые двигатели на природном газе Турбины на природном газе Микротурбины на природном газе Дизельные поршневые двигатели Каменный уголь

3. Обзор литературы. Исследования разных аспектов развития распределенной генерации стало актуальной проблемой в последние годы. В [20-25] рассмотрены основные преимущества, общесистемные эффекты и проблемы технологического присоединения распределенных источников энергии в распределительные сети. В [26-28] описаны вопросы функционирования электрических сетей с РГ, в том числе, проблемы релейной защиты, почасовой загрузки, качества электроэнергии устройств распределенной генерации [29-32]. В [33-35] представлены исследования режимной надежности систем электроснабжения с распределенной генерацией и учетом каскадных отказов, модели для определения предельных режимов в электрических сетях, а также методы для оценки параметров режима энергорайонов с объектами распределенной генерации. Во многих работах уделяется внимание оценке надежности систем энергоснабжения [36, 37], в том числе оценке возможности обеспечения надежного электроснабжения потребителей за счет строительства объектов распределенной генерации [38-41]. Кроме того, распределенная генерация энергии рассматривается как один из факторов повышения энергетической безопасности и устойчивого развития регионов [42-44]. Несмотря на значительное количество публикаций, освещающих разные аспекты применения распределенной генерации, не удалось найти

работ, связанных с оценкой ее влияния на спрос на электроэнергию, цену и структуру ее производства в регионе.

4. Предлагаемый методический подход. В ИСЭМ СО РАН разработан и постоянно совершенствуется поэтапный методический подход к повышению обоснованности долгосрочных прогнозов развития ТЭК страны. Этот подход предполагает существование разных по значимости и сложности задач и способов их решения на разных временных стадиях прогнозного периода [2, 45]. Для исследований создан методический инструментарий, который представляет собой стенд (набор) разного вида моделей (оптимизационных, имитационных, балансовых, регрессионных и т.д.) с разной степенью агрегирования продуктов, объектов и территории [1, 46]. Модели не связаны между собой автоматическими процедурами, это позволяет решать как отдельные задачи, для которых и разрабатывались эти модели, так и составлять из них расчетные комплексы. В этом случае результаты решения одних моделей используются как исходная информация для других. При возникновении новых задач стенд дополняется новыми моделями либо модификациями уже существующих.

Одной из новых задач, возникающих с переходом энергетики на траекторию интеллектуального развития, является прогнозная оценка возможного влияния масштабов распределенной генерации на перспективный спрос на электроэнергию, структуру и стоимость ее производства в регионе. Решение подобной задачи требует учета специфики развития региональной энергетики и экономики, подробного рассмотрения территории, особенностей потребителей, графиков их электрических нагрузок и т.д. Все это множество параметров характеризуется большой неопределенностью будущих значений и обуславливает целесообразность использования метода Монте-Карло. Подход, основанный на сочетании методов оптимизации и Монте-Карло, уже применяется в одной из моделей стенда – модели МИСС-ЭЛ [47]. Эта модель предназначена для определения рациональной структуры новых электростанций (с оценкой и учетом инвестиционных рисков) и вероятной стоимости производства электроэнергии в макрорегионах (федеральных округах и/или объединенных энергосистемах) на перспективу до 15 лет.

Методические принципы и результаты исследований на модели МИСС-ЭЛ предлагается использовать как источник прогнозной информации об условиях развития систем электроснабжения и как основу для разработки нового инструментария. В отличие от модели МИСС-ЭЛ новая модель региональной энергосистемы – МИСС-РЭС должна более детально описывать территорию, условия и возможности развития РГ. Установки РГ, как правило, являются составной частью потребителей, поэтому необходимо рассматривать разнообразие возможностей поведения и способов собственной генерации у разных групп потребителей в регионе. Для этого разрабатывается специальная модель региональной системы энергопотребления в которой потребители (j) описываются как можно подробнее: объемы (W_j) и графики потребления электроэнергии, наличие и перспективы установки мощностей РГ (N_j), технико-экономические параметры установок, величина (ΔW_j) возможного производства электроэнергии установками РГ и т.д. Схема предлагаемого подхода и основных взаимосвязей моделей представлена на рисунке.

В модели МИСС-РЭС величина и структура централизованного производства электроэнергии, полученные при исследовании рассматриваемого варианта развития макрорегиона (результаты решения на модели МИСС-ЭЛ), детализируются по территории рассматриваемой РЭС (по районам, городам и т.д.), а РГ представляется в виде дополнительного источника производства электроэнергии (виртуальная электростанция). Функционал такой модели состоит из: затрат на производство электроэнергии централизованными источниками (информация, поступающая из модели МИСС-ЭЛ), затрат

на производство электроэнергии установками РГ (информация из модели регионального энергопотребления) и тарифа на передачу электроэнергии от централизованных и распределенных источников:

$$F = \sum_r \sum_e c_{er} N_{er} h_{er} + \sum_r \sum_j c_{jr} N_{jr} h_{jr} + \sum_e \sum_j T_{ej} W_{ej} \rightarrow \min$$

где c_{er} – приведенные затраты на выработку электроэнергии на станции типа e (цент/кВтч) на территории r , N_{er} – установленная мощность на электростанции типа e (кВт) на территории r , h_{er} – число часов использования установленной мощности на электростанции типа e (час) на территории r , c_{jr} – приведенные затраты на выработку электроэнергии установкой РГ типа j (цент/кВтч) на территории r , N_{jr} – установленная мощность установки РГ типа j (кВт) на территории r , h_{jr} – число часов использования установленной мощности установки РГ типа j (час), T_{ej} – тариф на передачу электроэнергии от электростанции типа e и установки РГ типа j (цент/кВтч), W_{ej} – объем передачи электроэнергии от электростанции типа e и установки РГ типа j (кВтч).

Основными ограничениями в модели МИСС-РЭС являются:

- возможный потенциал развития установок РГ типа j $0 \leq N_j \leq \overline{N}_j$,
- возможный ввод новых электростанций типа e $\underline{N}_e \leq N_e \leq \overline{N}_e$,
- прогнозный уровень электропотребления $\underline{W} \leq W \leq \overline{W}$, где

$$W = \sum_e N_e h_e + \sum_j N_j h_j$$

Значения цен на энергоносители, технико-экономических параметров установок и ограничений представляются диапазонами их перспективных значений с возможностью задания вида распределения вероятности в этих диапазонах (нормальное, равномерное, показательное и т.д.). Ранее выполненные исследования [46] показали значительную дифференциацию стоимости производства электроэнергии по регионам и ее зависимость от качества используемой информации (от вида распределения вероятности в интервалах принимаемых значений исходных данных) (рис. 1).

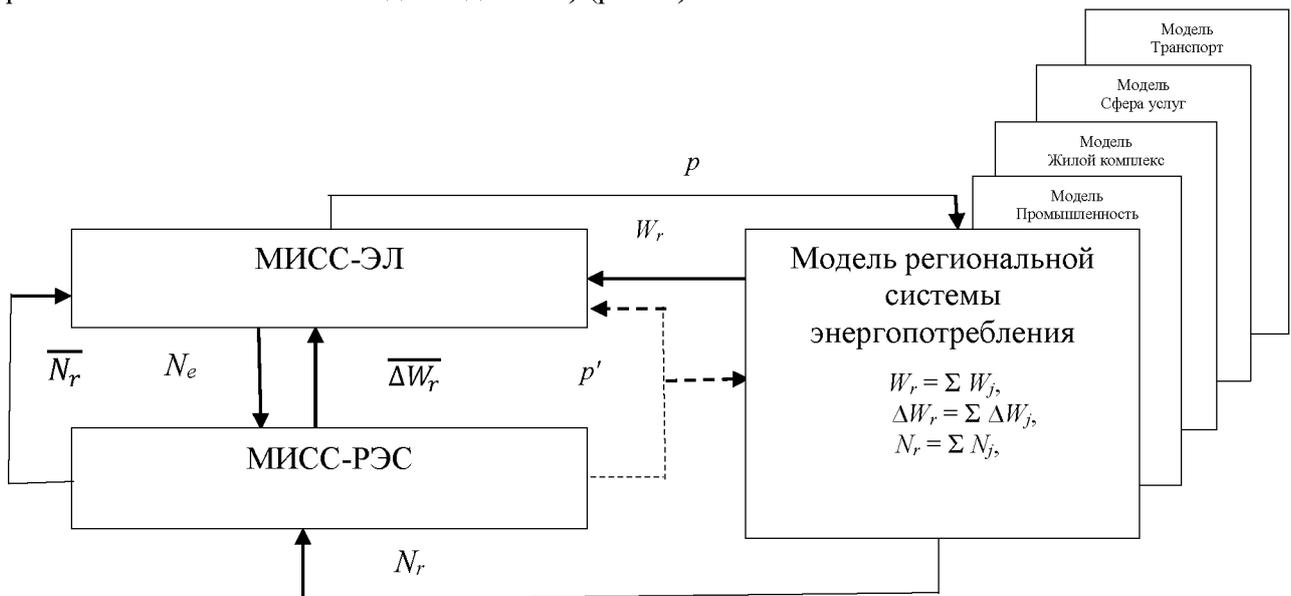


Рис. 1. Принципиальная схема предлагаемого подхода к оценке влияния развития РГ на перспективы региональной системы энергоснабжения (источник: разработка автора)

Наиболее сложным в решении рассматриваемой задачи является разработка модели региональной системы энергопотребления. Модель должна состоять из подмоделей разных секторов экономики, в каждой из которых определяются уровни потребления электроэнергии, возможные величины снижения потребности, прогнозируемые масштабы применения установок РГ.

В общем случае объемы потребления электроэнергии (кВтч) в промышленности могут быть рассчитаны по формуле:

$$W_{\text{пр}} = \sum_i V_{i \text{ нп}} e_{i \text{ нп}} - \beta \left(\sum_i V_{i \text{ нп}} e_{i \text{ нп}} \right) + \left(\sum_j V_{j \text{ нп}} e_{j \text{ нп}} \right) \beta \gamma \alpha$$

где $V_{i \text{ нп}}$ и $V_{j \text{ нп}}$ – объемы производства продукции предприятий отраслей непрерывного i и прочего j производства соответственно; $e_{i \text{ нп}}$ и $e_{j \text{ нп}}$ – энергоемкость производства продукции предприятий отраслей непрерывного i и прочего j производства соответственно; β – коэффициент возможного снижения электропотребления за счет энергосбережения; γ – коэффициент возможного снижения электропотребления за счет управления режимами работы оборудования; α – коэффициент возможного снижения электропотребления за счет обмена на финансовые стимулы.

Объемы потребления электроэнергии (кВтч) в жилом и коммерческом секторах региона рассчитываются по формулам:

$$W_{\text{ж}} = \beta \gamma \alpha S_{\text{ж}} e_{\text{осв ж}} + \gamma \alpha \text{Ч} \sum_l k_l e_{l \text{ прибор ж}}$$

$$W_{\text{к}} = \beta \gamma \alpha S_{\text{к}} e_{\text{осв к}} + \beta \gamma \alpha S_{\text{к}} e_{\text{приб к}}$$

где $S_{\text{ж}}$ и $S_{\text{к}}$ – площадь жилья и площадь коммерческих зданий соответственно; $e_{\text{осв ж}}$, $e_{\text{осв к}}$ – удельный расход электроэнергии на освещение в жилых и коммерческих зданиях соответственно; Ч – численность населения; k_l – обеспеченность населения прибором вида l ; $e_{l \text{ прибор ж}}$ – удельный расход электроэнергии прибором типа l ; $e_{\text{приб к}}$ – средний удельный расход электроэнергии приборами и механизмами в коммерческом секторе.

Объемы потребления электроэнергии (кВтч) на транспорте определяются как

$$W_{\text{т}} = \delta \text{Ч} k_a e_a d_a + K_o e_o d_o$$

где δ – доля электромобилей в общей численности личных автомобилей, k_a – обеспеченность населения региона автомобилями, e_a – среднее потребление электроэнергии на 1 км пробега электромобиля, d_a – средний годовой пробег электромобиля, K_o – количество единиц общественного электротранспорта в регионе, e_o – среднее потребление электроэнергии на 1 км пробега общественного электротранспорта, d_o – средняя величина пробега общественного электротранспорта в регионе.

Для расчета возможных объемов производства электроэнергии установками РГ анализируется: в каком секторе экономики (жилом, коммерческом, промышленном) существуют (планируются) установки, их возможные мощности генерации, в какой части графика электрической нагрузки они могут принимать участие. Удельные капитальные и эксплуатационные затраты определяются для каждого сектора отдельно с учетом их зависимости от масштаба развития РГ.

В промышленности выбор установок определяется доступным на территории топливом, соотношением прогнозных электрических и тепловых нагрузок предприятия, его технологическими особенностями (например, потребностью в отборе пара) и другими условиями. Критерием выбора той или иной технологии принимается минимальный дисконтированный срок окупаемости:

$$T_{\text{ок}} = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \geq K_0$$

где $T_{\text{ок}}$ – дисконтированный срок окупаемости инвестиций, n – срок реализации проекта, K_0 – первоначальные капитальные вложения в установку, CF_t – денежный поток в течение времени t , r – коэффициент дисконтирования.

В коммерческом секторе оцениваются затраты на основе внутренней нормы доходности (ВНД, IRR), используя 30-летний анализ денежных потоков (ЧДД), чтобы определить период окупаемости для различных технологий РГ.

$$\text{ЧДД} = -K_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+\text{ВНД})^t} = 0$$

В жилом секторе оцениваются затраты на установку РГ (после вычета всех стимулов и компенсаций) и количество лет, когда чистый совокупный денежный поток становится положительным относительно покупки электроэнергии в энергосистеме

$$\text{ЧДД} > C_3 W$$

где C_3 – стоимость электроэнергии в энергосистеме, W – объем потребления электроэнергии.

На транспорте используются мировые тенденции распространения личных автомобилей и общественного электрического транспорта с учетом российских особенностей.

Исследование предполагает следующую последовательность:

1. Модель МИСС-ЭЛ настраивается на рассматриваемый сценарий развития экономики и ТЭК. Использование метода Монте-Карло позволяет определить множество сбалансированных решений при разном сочетании характеристик будущих условий. Из этого множества формируется вариант структуры производства электроэнергии (N_e) в ОЭС с минимальной ее стоимостью (p) в принятых условиях. Полученные результаты являются исходной информацией для модели МИСС-РЭС.

2. В модели МИСС-РЭС вводимые новые мощности детализируются по территории рассматриваемого региона и дополняются мощностями РГ разных категорий потребителей (N_{jr}). Последнее определяется в модели региональной системы энергопотребления во взаимосвязи с полученной на МИСС-ЭЛ стоимостью производства электроэнергии (p).

3. Расчеты на модели МИСС-РЭС уточняют стоимость производства электроэнергии (p') в рассматриваемом регионе с учетом его особенностей, позволяют определить потенциал замещения мощностями РГ (\bar{N}_j – верхнюю границу мощностей РГ) централизованно вводимые мощности (N_e) и максимальный объем производства электроэнергии ($\overline{\Delta W}$) на мощностях РГ.

4. На основе многовариантных расчетов (разных сценариев развития РГ³) строятся зависимости цен и спроса на электроэнергию от масштабов развития РГ в регионе.

Результаты расчетов на модели МИСС-РЭС в виде снижения спроса на электроэнергию на величину ($\overline{\Delta W}$) в рассматриваемом регионе могут быть использованы для уточнения и оценки возможного изменения структуры и стоимости производства электроэнергии в исследованиях на модели МИСС-ЭЛ.

Заключение. Развитие распределенной энергетики является ведущим мировым трендом, способствующим переходу от традиционной однонаправленной организации энергосистем к новым интегрированным и гибридным их видам, сочетающим крупные централизованные и распределенные источники энергии. В связи с этим, одной из

³ Сценарии проникновения (распространения) разного вида технологий РГ основываются на анализе мировых тенденций [48,49]

новых задач, возникающих при долгосрочных исследованиях эффективных вариантов развития электроэнергетики и ТЭК, является оценка влияния масштабов распространения РГ на структуру производства, стоимость и спрос на электроэнергию в регионе.

Предлагаемый для решения этой задачи методический подход и инструментарий, базирующийся на сочетании методов оптимизации и Монте-Карло, позволяет проводить многовариантные расчеты с учетом качества имеющейся информации и оценить изменение стоимости электроэнергии и ее спрос при разных вариантах развития РГ в регионе.

Безусловно, подобная оценка является приблизительной, однако она может дать представление о том, в какой степени РГ может повлиять на развитие региональных систем энергоснабжения, что будет способствовать повышению обоснованности прогнозов развития электроэнергетики и ТЭК.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0003 рег. № АААА-А21-121012090014-5) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. и частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-010-00204.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперова Е.В., Кононов Д.Ю. Методы и модели прогнозных взаимосвязей энергетики и экономики. Новосибирск: Наука. 2009. 178 с.
2. Кононов Ю.Д. Пути повышения обоснованности долгосрочных прогнозов развития ТЭК. Новосибирск: Наука. 2015. 147 с.
3. Системные исследования в энергетике: методология и результаты / Под ред. А.А. Макарова и Н.И. Воропая. М.: ИНЭИ РАН. 2018. 309 с.
4. Макаров А.А. Полвека системных исследований развития энергетики СССР и России – а что далее? // Теплоэнергетика. №12. 2020. С. 5-14.
5. Hansen C.J., Bower J. An economic evaluation of small-scale distributed electricity generation technologies. Oxford Institute for Energy Studies & Dept. of Geography, Oxford University. 2004. 59 p.
6. Bauen A., Hawkes A. Decentralised generation – technologies and market perspectives. IEA. Paris. 2004. 18 p.
7. Decentralised generation technologies: potentials, success factors and impacts in the liberalized EU energy markets. Final report, DECENT. October 2002. 234 p.
8. Батенин В.М., Бушуев В.В., Воропай Н.И. Инновационная электроэнергетика-21 М.: ИЦ «Энергия». 2017. 584 с.
9. Navigant Research. Global DER Deployment Forecast Database. 4Q. 2017.
10. Распределенная энергетика в России: потенциал развития. Энергетический центр Московской школы управления СКОЛКОВО. 89 с. Режим доступа: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf (дата обращения: 03.02.2021).
11. Корпоративное напряжение. Распределенная генерация. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/4877604> (дата обращения: 30.08.2021).
12. Возможности инвестирования в промышленную распределённую генерацию в России. Подготовлено для Европейского банка реконструкции и развития компанией ÅF-Consult Ltd. Итоговый отчет 8POLSUF 14.06.2013 г. Режим доступа: https://www.npace.ru/media/presentations_documents/8POLSUF_summary_report_13082013_final_rus_corr.pdf (дата обращения: 30.08.2021).

13. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Арсентьев М.О. Использование технологий распределенной генерации на железнодорожном транспорте // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 3(19) 2008, С. 81-87.
14. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Черепанов А.В., Нгуен Ван Хуан. Моделирование и управление в технических системах // Системы, Методы, Технологии. 2020 № 3 (47) с. 43–49. DOI:10.18324/2077-5415-2020-3-43-49.
15. Собственная генерация для аэропортов. Режим доступа: <https://vvp-e.ru> (дата обращения: 31.08.2021).
16. Global EV Outlook 2021. IEA. Available at: www.iea.org (дата обращения: 5.10.2021).
17. Vehicle-to-grid (V2G): Технология сетевого хранения электроэнергии в аккумуляторах электромобилей. Режим доступа: <http://renewnews.ru/market/energy-storage/v2g/> (дата обращения: 6.10.2021).
18. Vehicle to Grid (V2G) Technology. Available at: <https://innovationatwork.ieee.org/vehicle-to-grid-v2g-technology/> (дата обращения: 6.10.2021).
19. Modeling Distributed Generation in the Buildings Sectors. 2017. Independent Statistics & Analysis. U.S. Department of Energy. Washington, DC 20585. Available at: www.eia.gov (дата обращения: 5.10.2021).
20. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография / Ю.Е. Гуревич, П.В. Илюшин. Н.Новгород: НИУ РАНХиГС. 2018. 280 с.
21. Илюшин П.В. Перспективы применения и проблемные вопросы интеграции распределенных источников энергии в электрические сети: монография. М.: НТФ «Энергопрогресс». 2020. 116 с. DOI: 10.34831/EP.2020.260.8.001.
22. Mehigan L., Deane J.P., Gallachoir B.P.O., Bertsch V. A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems // Energy 163 (2018) 822-836.
23. Mateo C., Frías P., Tapia-Ahumada K. A comprehensive techno-economic assessment of the impact of natural gas-fueled distributed generation in European electricity distribution networks // Energy 192 (2020) 116523.
24. Matosa S.P.S., Vargas M.C., Fracalossi L.G.V., Encarnaçao L.F., Batista O.E. Protection philosophy for distribution grids with high penetration of distributed generation// Electric Power Systems Research 196 (2021) 107203.
25. Ali Ehsan, Qiang Yang. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques // Applied Energy 210 (2018) 44-59.
26. Косарев Б.А., Кошук Г.А., Федоров В.К., Лысенко О.А. Оптимизация функционирования электротехнической системы с распределенной генерацией //Актуальные вопросы энергетики. 2019. № 1. С. 99-103.
27. Горшкова Н.А., Гуревич Ю.Е., Илюшин П.В. Перспективные направления в автоматизации объектов распределенной генерации при их интеграции в распределительные сети // Релейная защита и автоматизация. 2013. № 1 (10). С. 48-55.
28. Chenjie Маа, Johannes Dasenbrocka, J.-Christian Töbermanna, Martin Braun. A novel indicator for evaluation of the impact of distributed generations on the energy losses of low voltage distribution grids // Applied Energy 242 (2019) 674-683.
29. Шарыгин М.В., Куликов А.Л., Вуколов В.Ю., Петров А.А. Адаптивная релейная защита электрических сетей с источниками распределенной генерации // Изв. РАН. Энергетика. 2020. № 3. С. 60-68 DOI: 10.31857/S000233102003005X.
30. Кирпиков А.В., Кирпикова И.Л., Обоскалов В.П. Стратегии загрузки устройств распределенной генерации в течение суток // Промышленная энергетика. 2014. № 4. С. 12-15.

31. Солнцев Е.Б., Мамонов А.М., Фитасов А.Н., Петрицкий С.А., Севостьянов А.А. Анализ качества электроэнергии (колебаний напряжения) при распределенной генерации // Энергобезопасность и энергосбережение. 2019. № 3. С. 37-40.
32. Гулиев Г.Б., Рахманов Н.Р. Регулятор нечеткой логики для управления реактивной мощностью и напряжением в сетях распределенной генерации // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. № 2. С. 47-52.
33. Фам Ч.Ш., Воропай Н.И. Исследование режимной надежности систем электроснабжения с распределенной генерацией и учетом каскадных отказов // Электричество. 2013. № 12. С. 14-20.
34. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Черепанов А.В. Математические модели для определения предельных режимов в электрических сетях с установками распределенной генерации // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. № 4 (80). С. 17-36.
35. Куликов А.Л., Илюшин П.В., Пелевин П.С. Применение дискриминаторных методов для оценки параметров режима энергорайонов с объектами распределенной генерации // Электричество. 2019. № 7. С. 22-35.
36. Папков Б.В., Осокин В.Л. Особенности оценки структурной надежности систем с объектами распределенной генерации // Известия РАН. Энергетика. 2020. № 2. С. 75-84 DOI: 10.31857/S0002331020020090.
37. Некрасов С.А. Повышение надежности и доступности энергоснабжения российских городов на основе распределенной генерации // НРЭ № 9 (2012 г.) С.15-25.
38. Илюшин П.В., Кучеров Ю.Н. Подходы к оценке возможности обеспечения надежного электроснабжения потребителей за счет строительства объектов распределенной генерации // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2014. № 5. С. 2-7.
39. Чечушков Д.А., Паниковская Т.Ю., Бунькова Е.А. Метод оптимального размещения источников распределенной генерации для повышения надежности электроснабжения // Промышленная энергетика. 2014. № 9. С. 17-21.
40. Варганова А.В., Байрамгулова Ю.М., Гончарова И.Н., Кроткова О.А. Техно-экономическое обоснование места установки источников распределенной генерации // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3 (44). С. 68-72.
41. Surender Singh Tanwara, D.K. Khatod. Techno-economic and environmental approach for optimal placement and sizing of renewable DGs in distribution system // Applied Energy 127 (2017) 52-67.
42. Моисеев Л.Л., Сливной В.Н. Распределенная генерация энергии - фактор повышения энергетической безопасности региона // Ползуновский вестник. 2004. № 1. С. 226-229.
43. Майоров С. Распределенная автономная генерация как основа энергобезопасности // Энергонадзор. 2016. № 5 (81). с. 8.
44. Филиппов С.П., Дильман М.Д., Илюшин П.В. Распределенная генерация и устойчивое развитие регионов // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 4-17.
45. Гальперова Е.В. Методология исследования долгосрочной динамики спроса на энергоносители для повышения обоснованности перспектив развития ТЭК: состав задач, методы и модели // Известия РАН. Энергетика. 2021. № 1. С. 101-108. DOI: 10.31857/S0002331021010064.
46. Гальперова Е.В. Использование стенда моделей для долгосрочного прогнозирования рыночного спроса на энергоносители // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 4-2. С. 17-27.

47. Кононов Ю.Д., Кононов Д.Ю. Экономическая составляющая энергетической безопасности и методические подходы к ее оценке // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2019. Т.5. №6. С. 1086-1096. DOI: 10.24891/ni.15.6.1086.
48. Distributed Generation and Combined Heat & Power System Characteristics and Costs in the Buildings Sector. Режим доступа: <https://www.eia.gov> (дата обращения: 29.09.2021).
49. Modeling Distributed Generation in the Buildings Sectors. Режим доступа: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/2020/buildings/> (дата обращения: 29.09.2021).

UDK 338.27:51-74

METHOD AND MODELS FOR ESTIMATING THE INFLUENCE OF DISTRIBUTED GENERATION DEVELOPMENT ON ELECTRICITY DEMAND AND PRICE IN A REGION

Elena V. Galperova

Ph.D., Associate Professor, Senior Researcher, e-mail: galper@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS

664033, Russia, Irkutsk, Lermontov st., 130.

Abstract. The relevance of the article is due to the transition of energy to the path of intellectual development. One of the characteristics of this transition is the broadening of the prospects for decentralized electricity generation. Under the new conditions, a consumer has the opportunity to change his energy consumption depending on the cost of energy resources, to have his own installations for the production and / or storage of electricity. The article briefly presents the features of the use and technology of distributed generation (DG) energy in certain sectors of the economy (industry, residential and commercial sectors, transport). Some methods of determining the prospective values of the power of the RG at consumers are given. An approach to modeling and assessing the impact of the scale of distributed generation on the long-term development of regional power supply systems is proposed. A distinctive feature of the approach is the use of the previously developed stochastic optimization model of the unified power system of the macroregion as a basis for the development of its regional modification and a source of forecast information on the conditions for the development of the regional power system. Of course, the proposed approach gives only a rough estimate, but it allows us to outline a promising range of changes in the cost and demand for electricity in the region under different options for the development of the RG.

Keywords: forecasting, distributed generation, consumers, energy carriers, demand, fuel and energy complex, electricity, Monte Carlo, optimization, uncertainty.

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0003) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 (reg. number AAAA-A21-121012090014-5), some results were obtained with partial funded by RFBR project number 20-010-00204.

REFERENCES

1. Metody i modeli prognoznyh vzaimosvyazey energetiki i ekonomiki / Yu.D. Kononov, E.V. Galperova, D.Yu. Kononov i dr. [Methods and models for projections of energy-economy interactions] – Novosibirsk: Nauka = Science. 2009. 178 p. (in Russian)
2. Kononov Yu.D. Puti povysheniya obosnovannosti dolgosrochnykh prognozov razvitiya TEK [Approaches to improve the validity of long-term projections of the energy sector]. Novosibirsk: Nauka = Science. 2015. 147 p. (in Russian)
3. Sistemnye issledovaniya v energetike: metodologiya i rezul'taty /Pod red. A.A. Makarova i N.I. Voropaya [Energy systems analysis: methodology and research findings]. M.: INEI RAN. 2018. 309 p. (in Russian)

4. Makarov A.A. Polveka sistemnyh issledovaniy razvitiya energetiki SSSR i Rossii – a chto dalee? (obzor) [Half a century of systems studies into developing the power industry in the Soviet Union and Russia: what next? (review)] // *Teploenergetika = Thermal Engineering*. №12. 2020. Pp. 5-14. (in Russian)
5. Hansen C.J., Bower J. An economic evaluation of small-scale distributed electricity generation technologies. Oxford Institute for Energy Studies & Dept. of Geography, Oxford University, 2004. 59 p.
6. Bauen A., Hawkes A. Decentralised generation – technologies and market perspectives. IEA, Paris. 2004. 18 p.
7. Decentralised generation technologies: potentials, success factors and impacts in the liberalized EU energy markets. Final report, DECENT. October 2002. 234 p.
8. Innovacionnaya elektroenergetika-21/pod red. V.M. Batenina, V.V. Bushueva, N.I. Voropaya – M.: IC «Energiya», [The innovation-driven electric power sector-21] 2017. 584 p. (in Russian)
9. Navigant Research. Global DER Deployment Forecast Database, 4Q 2017.
10. Raspredeleonnaya energetika v Rossii: potencial razvitiya. Energeticheskij centr Moskovskoj shkoly upravleniya SKOLKOVO, 89 p. [Distributed energy in Russia: Potential for development]. Available at: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf (accessed: 03.02.2021) (in Russian)
11. Korporativnoe napryazhenie. Raspredeleonnaya generaciya. [Corporate tension. Distributed generation.] [Online]. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/4877604> (accessed 30.08.2021) (in Russian)
12. Vozmozhnosti investirovaniya v promyshlennuyu raspredeyonnuyu generaciyu v Rossii. Podgotovleno dlya Evropejskogo banka rekonstrukcii i razvitiya kompaniej ÅF-Consult Ltd. Itogovyj otchet 8POLSUF 14.06.2013 [Investment opportunities in industrial distributed generation in Russia. Prepared for the European Bank for Reconstruction and Development by ÅF-Consult Ltd. Final report]. Available at: https://www.np-ace.ru/media/presentations_documents/8POLSUF_summary_report_13082013_final_rus_corr.pdf (accessed 30.08.2021) (in Russian)
13. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Arsent'ev M.O. Ispol'zovanie tekhnologij rasprede-lennoj generacii na zheleznodorozhnom transporte [The use of distributed generation technologies in railway transport] // *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie = Modern technologies. System analysis. Modeling*. № 3(19) 2008. Pp. 81-87 (in Russian)
14. Bulatov YU.N., Kryukov A.V., Cherepanov A.V., Nguen Van Huan. Modelirovanie i upravlenie v tekhnicheskikh sistemah [Modeling and control in technical systems] // *Sistemy, Metody, Tekhnologii = Systems, Methods, Technologies*. 2020. № 3 (47). Pp. 43-49. DOI:10.18324/2077-5415-2020-3-43-49 (in Russian)
15. Sobstvennaya generaciya dlya aeroportov [Own generation for airports]. Available at: <https://vvp-e.ru> (accessed 31.08.2021) (in Russian)
16. Global EV Outlook 2021. IEA. Available at: www.iea.org (accessed 5.10.2021).
17. Vehicle-to-grid (V2G): Tekhnologiya setevogo hraneniya elektroenergii v akkumulyatorah elektromobilej [Vehicle-to-grid (V2G): Networked storage technology for electric vehicle batteries] Available at: <http://renewnews.ru/market/energy-storage/v2g/> (accessed 6.10.2021) (in Russian)
18. Vehicle to Grid (V2G) Technology. Available at: <https://innovationatwork.ieee.org/vehicle-to-grid-v2g-technology/> (accessed 6.10.2021).

19. Modeling Distributed Generation in the Buildings Sectors. 2017. Independent Statistics & Analysis. U.S. Department of Energy. Washington, DC 20585. Available at: www.eia.gov. (accessed 5.10.2021).
20. Osobennosti raschetov rezhimov v energorajonah s raspredelennoj generaciej: monografiya / Yu.E. Gurevich, P.V. Ilyushin [Special aspects of calculations of operation modes in the energy service area with distributed generation: a research monograph]. N.Novgorod: NIU RANHiGS, 2018. 280 p. (in Russian)
21. Ilyushin P.V. Perspektivy primeneniya i problemnye voprosy integracii raspredelennyh istochnikov energii v elektricheskie seti: monografiya [Prospects of application and outstanding issues of Integration of distributed energy sources into power grids: a research monograph]. M.: NTF «Energoprogress». 2020. 116 p. DOI: 10.34831/EP.2020.260.8.001 (in Russian)
22. Mehigan L., Deane J.P., Gallachoir B.P.O., Bertsch V. A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems // *Energy* 163 (2018) 822-836.
23. Mateo C., Frías P., Tapia-Ahumada K. A comprehensive techno-economic assessment of the impact of natural gas-fueled distributed generation in European electricity distribution networks // *Energy* 192 (2020) 116523.
24. Matosa S.P.S., Vargas M.C., Fracalossi L.G.V., Encarnação L.F., Batista O.E. Protection philosophy for distribution grids with high penetration of distributed generation // *Electric Power Systems Research* 196 (2021) 107203.
25. Ali Ehsan, Qiang Yang. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques // *Applied Energy* 210 (2018) 44-59.
26. Kosarev B.A., Koshchuk G.A., Fedorov V.K., Lysenko O.A. Optimizaciya funkcionirovaniya elektrotekhnicheskoy sistemy s raspredelennoj generaciej [Optimization of the operation of the electrical engineering system with distributed generation] // *Aktual'nye voprosy energetiki = Topical issues of energy*. 2019. № 1. Pp. 99-103 (in Russian)
27. Gorshkova N.A., Gurevich Yu.E., Ilyushin P.V. Perspektivnye napravleniya v avtomatizacii ob"ektov raspredelennoj generacii pri ih integracii v raspredelitel'nye seti [Promising directions in the automation of distributed generation facilities during their integration into distribution networks] // *Relejnaya zashchita i avtomatizaciya = Relay protection and automation*. 2013. № 1 (10). pp. 48-55 (in Russian)
28. Chenjie Maa, Johannes Dasenbrocka, J.-Christian Töbermanna, Martin Braun. A novel indicator for evaluation of the impact of distributed generations on the energy losses of low voltage distribution grids // *Applied Energy* 242 (2019) 674-683.
29. Sharygin M.V., Kulikov A.L., Vukolov V.Yu., Petrov A.A. Adaptivnaya relejnaya zashchita elektricheskikh setej s istochnikami raspredelennoj generacii [Adaptive power system protection for power grids with distributed generation sources] // *Izv. RAN. Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series*. 2020. № 3. Pp. 60-68. DOI: 10.31857/S000233102003005X (in Russian)
30. Kirpikov A.V., Kirpikova I.L., Oboskalov V.P. Strategii zagruzki ustrojstv raspredelennoj generacii v techenie sutok [Loading strategies for distributed generation devices during the day] // *Promyshlennaya energetika = Industrial energy*. 2014. № 4. Pp. 12-15 (in Russian)
31. Solncev E.B., Mamonov A.M., Fitasov A.N., Petrickij S.A., Sevost'yanov A.A. Analiz kachestva elektroenergii (kolebanij napryazheniya) pri raspredelennoj generacii [Analysis of electric power quality (voltage fluctuations) in distributed generation] // *Energobezopasnost' i energosberezhenie = Energy security and energy saving*. 2019. № 3. Pp. 37-40 (in Russian)

32. Guliev G.B., Rahmanov N.R. Regulyator nechetkoj logiki dlya upravleniya reaktivnoj moshchnost'yu i napryazheniem v setyah raspredelennoj generacii [Fuzzy logic controller for reactive power and voltage control in distributed generation networks] // *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'* = *Electro. Electrical engineering, power engineering, electrical industry*. 2014. № 2. Pp. 47-52 (in Russian)
33. Fam Ch.Sh., Voropaj N.I. Issledovanie rezhimnoj nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya s raspredelennoj generaciej i uchetom kaskadnyh otkazov [The study of the operation mode reliability of electric power supply systems with distributed generation and cascading failures factored in] // *Elektrichestvo* = *Electricity*. 2013. № 12. Pp. 14-20 (in Russian)
34. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Matematicheskie modeli dlya opredeleniya predel'nyh rezhimov v elektricheskikh setyah s ustanovkami raspredelennoj generacii [Mathematical models for determining the limit operation modes in power grids with distributed generation installations] // *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University*. 2020. № 4 (80). Pp. 17-36 (in Russian)
35. Kulikov A.L., Ilyushin P.V., Pelevin P.S. Primenenie diskriminatornyh metodov dlya ocenki parametrov rezhima energorajonov s ob"ektami raspredelennoj generacii [Application of discriminatory methods for estimating operation mode parameters of energy service areas with distributed generation facilities] // *Elektrichestvo* = *Electricity*. 2019. № 7. Pp. 22-35 (in Russian)
36. Papkov B.V., Osokin V.L. Osobennosti ocenki strukturnoj nadezhnosti sistem s ob"ektami raspredelennoj generacii [Special aspects of the assessment of structural reliability of systems with distributed generation facilities] // *Izvestiya RAN. Energetika* = *Bulletin of RAS. Energy Series*. 2020. № 2. Pp. 75-84 DOI: 10.31857/S0002331020020090 (in Russian)
37. Nekrasov S.A. Povyshenie nadezhnosti i dostupnosti energosnabzheniya rossijskih gorodov na osnove raspredelennoj generacii [Improving the reliability and availability of power supply of Russian cities on the basis of distributed generation] // *NRE*. 2012. № 9. Pp. 15-25 (in Russian)
38. Ilyushin P.V., Kucherov Yu.N. Podhody k ocenke vozmozhnosti obespecheniya nadezhnogo elektrosnabzheniya potrebitelej za schet stroitel'stva ob"ektov raspredelennoj generacii [Approaches to assessment of the possibility of ensuring reliable electric power supply to consumers by means of construction of distributed generation facilities] // *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'* = *Electro. Electrical engineering, power engineering, electrical industry*. 2014. № 5. Pp. 2-7 (in Russian)
39. Chechushkov D.A., Panikovskaya T.Yu., Bun'kova E.A. Metod optimal'nogo razmeshcheniya istochnikov raspredelennoj generacii dlya povysheniya nadezhnosti elektrosnabzheniya [Method of optimal placement of distributed generation sources to improve the reliability of electricity supply] // *Promyshlennaya energetika* = *Industrial energy*. 2014. № 9. pp. 17-21 (in Russian)
40. Varganova A.V., Bajramgulova Yu.M., Goncharova I.N., Krotkova O.A. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie mesta ustanovki istochnikov raspredelennoj generacii [Feasibility study of the installation site of distributed generation sources] // *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* = *Electrical systems and complexes*. 2019. № 3 (44). Pp. 68-72 (in Russian)

41. Surender Singh Tanwara, D.K. Khatod. Techno-economic and environmental approach for optimal placement and sizing of renewable DGs in distribution system // *Applied Energy* 127 (2017) 52-67.
42. Moiseev L.L., Slivnoj V.N. Raspredeleonnaya generaciya energii - faktor povysheniya energeticheskoy bezopasnosti regiona [Distributed energy generation: a factor in increasing energy security of a region] // *Polzunovskij vestnik = Polzunovsky Bulletin*. 2004. № 1. Pp. 226-229 (in Russian)
43. Majorov S. Raspredeleonnaya avtonomnaya generaciya kak osnova energobezopasnosti [Distributed stand-alone generation as a basis for energy security] // *Energonadzor*. 2016. № 5 (81). p. 8 (in Russian)
44. Filippov S.P., Dil'man M.D., Ilyushin P.V. Raspredeleonnaya generaciya i ustojchivoe razvitie regionov [Distributed generation and sustainable development of regions] // *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2019. № 12. Pp. 4-17 (in Russian)
45. Galperova E.V. Metodologiya issledovaniya dolgosrochnoj dinamiki sprosa na energonositeli dlya povysheniya obosnovannosti perspektiv razvitiya TEK: sostav zadach, metody i modeli [Methodology for studying the long-term dynamics of demand for energy carriers with a view to improving the validity of energy sector development prospects: the set of tasks, methods, and models] // *Izvestiya RAN. Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series*. 2021. № 1. Pp. 101-108. DOI: 10.31857/S0002331021010064 (in Russian)
46. Galperova E.V. Ispol'zovanie stenda modelej dlya dolgosrochnogo prognozirovaniya rynochnogo sprosa na energonositeli [Set of models for long-term forecasting of market energy demand] // *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management*. 2016. № 4-2. Pp. 17-27 (in Russian)
47. Kononov Yu.D., Kononov D.Yu. Ekonomicheskaya sostavlyayushchaya energeticheskoy bez-opasnosti i metodicheskie podhody k ee ocenke [The economic component of energy security and methodological approaches to its assessment] // *Nacional'nye interesy: priority i bezopasnost' = National Interests: Priorities and Security*. 2019. vol. 15. iss. 6. Pp. 1086-1096 DOI:10.24891/ni.15.6.1086 (in Russian)
48. Distributed Generation and Combined Heat & Power System Characteristics and Costs in the Buildings Sector. Available at: www.eia.gov (accessed 29.09.2021).
49. Modeling Distributed Generation in the Buildings Sectors. Available at: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/2020/buildings/> (accessed 29.09.2021).

Статья поступила в редакцию 17.09.2021; одобрена после рецензирования 08.10.2021; принята к публикации 18.10.2021.

The article was submitted 17.09.2021; approved after reviewing 08.10.2021; accepted for publication 18.10.2021.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕЖДУНАРОДНОЙ ФАКТОРИНГОВОЙ ОПЕРАЦИИ ДЛЯ КОММЕРЧЕСКОГО БАНКА

Мансурова Юлия Талгатовна

к.э.н., доц. кафедры «Финансы, денежное обращение и экономическая безопасность»,
e-mail: mansurova.j@mail.ru

Туктарова Полина Андреевна

к.э.н., доц. кафедры «Финансы, денежное обращение и экономическая безопасность»,
e-mail: p.korobova@mail.ru

Уфимский государственный авиационный технический университет,
450077 г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.

Мансуров Тагир Валерьевич

к.т.н., директор ООО «СМК-10»

e-mail: spacetag@gmail.com

450055 г. Уфа, ул. Ш. Руставели, 9.

Аннотация. Для принятия решения о внедрении международного факторинга в пакет экспортно-импортных услуг банка необходимо рассчитать экономический эффект этого мероприятия. Для этого в работе были рассмотрены модели оценки эффективности внедрения факторинга для банка, позволяющие, имея основные данные по планируемой факторинговой операции и предприятию-заемщику, оценить эффективность кредитования для банка, что позволит снизить риск потерь банка от неэффективных операций. Достижению максимального эффекта (получению идеально максимальной прибыли) на протяжении всей операции препятствуют целый ряд рисков, сопровождающих любую международную факторную операцию. Рассмотрена экономико-математическая модель, в которой за критерий эффективности было взято условие максимизации ожидания прибыли банка, учитывающей основные характеристики, качественно отличающие международную факторинговую операцию от стандартных активных операций. Выявленные качественные закономерности дают возможность для применения количественных методов оценивания эффективности и надежности факторинга. За основу построения модели международных факторных операций взята статическая модель Чессера. Поскольку международная факторинговая операция характеризуется длительностью периода финансирования, то становится необходимым использование метода NPV (Net Present Value). При проведении экспортно-импортных сделок важное место занимает изменение цены одной валюты, нормированной относительно другой. Для численной оценки данного вида риска используется модель, в основе которой лежит теория дифференциальных уравнений. Таким образом, оценка эффективности международной факторинговой операции сводится к алгоритму, в котором учитывается как действие валютного риска, так и риска делькредере.

Ключевые слова: факторинг, оценка эффективности, риск делькредере, валютный риск.

Цитирование: Мансурова Ю. Т., Туктарова П. А., Мансуров Т. В. Оценка эффективности международной факторинговой операции для коммерческого банка // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3 (23). С. 117-128.

DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.010.

Введение. Можно выделить три основные особенности, качественно отличающие факторную операцию от стандартных активных операций: кредитования и покупки долговых обязательств.

Первая особенность. Операция авансирования, как часть факторной операции, имеет то отличие от стандартного кредитования, что получателем кредитных ресурсов

является одно лицо (продавец), а обязанным их возвратить – другое лицо (дебитор продавца, т. е. покупатель).

Вторая особенность. Факторная операция растянута во времени и ход ее исполнения корреспондирован с ходом исполнения экспортной сделки, которая, вообще говоря, представляет собой ряд повторяющихся краткосрочных контрактов.

Третья особенность. Достижению максимального эффекта (получения идеально максимальной прибыли) на протяжении всей операции препятствуют целый ряд рисков, сопровождающих любую факторную операцию на протяжении всего времени ее осуществления.

Риски факторинговой операции можно разбить на три основных группы рисков (риски делькредере, валютные риски и политические риски) в каждый момент времени существенно влияющие на эффективность факторной операции. Эти риски в дальнейшем называются рисками первого порядка.

Риск делькредере связан с невозвращением кредита либо его неполным или несвоевременным возвращением ввиду недобросовестности или неплатежеспособности покупателя (вина покупателя) или нарушения продавцом условий контракта (вина продавца). В общем понимании риск делькредере связан с невозвращением кредита либо его неполным или несвоевременным возвращением ввиду недобросовестности или неплатежеспособности покупателя или нарушения продавцом условий контракта.

Наиболее распространенным риском из тех, с которыми приходится встречаться, является риск ликвидности, который лишь при наличии ряда дополнительных обстоятельств может перерасти в кредитный риск. Поэтому весьма важным является исследование тех обстоятельств, которые определяют норму ликвидности для каждого хозяйствующего субъекта.

Различие между кредитным риском и риском ликвидности имеет важное значение. Кредитный риск означает вероятность потери сопутствующего риска ликвидности. Риск ликвидности преимущественно означает нехватку наличных средств. На практике, однако, это различие не всегда удается четко провести. Действительно, нехватка ликвидности может иметь высокую цену, вынуждая сторону, ожидающую поступления платежа, прибегать к сравнительно дорогим займам или невыгодной продаже активов. Если нехватка ликвидных средств оказывается весьма значительной, это может спровоцировать невыполнение обязательств по другим контрактам или даже банкротство. Таким образом, спады в движении денежной наличности могут быть важной причиной кредитного риска. Дефицит ликвидных средств в процессе обмена может быть вызван техническим сбоем в платежной системе, а также проистекать из кредитных потерь, вызванных неожиданным банкротством партнера.

Особенно уязвимы перед риском, известным, как риск Херштатта, операции с иностранной валютой, в процессе которых расчеты по двум платежным фазам выполняются в различных временных зонах. Вообще, риски, связанные с конвертацией валют, являются настолько важными, что их стоит выделить в отдельную группу. Валютные риски связаны с рисками курсовых потерь при переводе средств из валюты покупателя в валюту продавца при плавающих курсах валют.

Последняя категория рисков – это политические риски. Политические риски связаны с невозможностью исполнить экспортный контракт или провести расчеты по нему из-за изменения политической ситуации в стране продавца или в стране покупателя.

Все сказанное убеждает, что самой важной частью проблемы институализации товарного кредита является проблема управления сопутствующими рисками. Именно ее исследование и станет центральной частью работы.

1. Пути решения описываемой проблемы. Как и для любой другой финансовой операции, для факторной операции разумно в качестве критерия эффективности взять условия максимизации ожидания прибыли фактора.

Принимая, что ожидание прибыли есть произведение чистой банковской прибыли на сумму финансирования минус интеграл потерь на каждую реализацию дохода от проекта ниже его стоимости, условие максимизации ожидания прибыли, согласно работам [1, 2], записываем следующим образом (1):

$$D = (r - \rho)C - \int_{\underline{R}}^{(1+r)C} [(1+r)C - R]d\tilde{F}(R) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где

R – доход с финансируемого проекта;

\underline{R} – минимальный доход;

r – процентная ставка, выплачиваемая заемщиком;

C – общая сумма финансирования;

$\tilde{F}(R)$ – функция от R вида $[(1+r)C - R]F'(R)$;

ρ – стоимость рефинансирования, равная сумме процентной ставки рефинансирования и эксплуатационных расходов, связанных с организацией выплаты финансирования.

При построении модели необходимо учесть ряд дополнительных важных отличий факторинга (финансирования торгового кредита, оплачиваемого по открытому счету) от банковского кредита, рассмотренные в работах [3, 4].

Во-первых, рассматривая финансирование экспортного товарного кредита (в отличие от целевого кредитования экспорта или дисконтирования экспортных платежных документов), в уравнение модели необходимо включить функцию, описывающую изменение валютного риска в непрерывном времени. Существенная необходимость в этом связана с принципиальной невозможностью хеджирования валютного риска существующими инструментами срочного рынка, поскольку срок погашения товарного кредита не может быть точно известен.

Во-вторых, при банковском кредитовании при отсутствии кредитного риска ликвидный риск сам по себе не может привести к потерям, поскольку любые потери при несвоевременном переводе денег покрываются штрафами и пени.

В-третьих, в силу того, что при револьверных поставках на принятие кредитором последовательно адаптивных решений влияет необходимость учета хода исполнения других экспортных контрактов, сдвинутых во времени относительно текущего, то возникает эффект отклонения параметра, которого нет в банковском кредитовании.

В-четвертых, поскольку финансовый результат товарного кредитования зависит от меняющейся конъюнктуры товарных рынков, то в модели должна возникнуть переменная рентабельность.

В-пятых, поскольку операция товарного кредитования и связанная с ней факторная операция обречены на потери (интеграл потерь больше нуля), то после завершения очередного контракта на поставку товара с потерями для кредитора, им, как правило, принимается решение о новом контракте, что обеспечивает револьверность поставок и непрерывность потока платежей (что, очевидно, невозможно при банковском кредитовании).

Следует также обратить внимание на следующее обстоятельство. Одним из условий, обеспечивающих эффективность факторингового обслуживания, является финансирование Фактором всех или почти всех поставок продавца в течение длительного периода времени. Только в этом случае продавец может рассчитывать на реализацию своей программы расширения продаж, не опасаясь возникновения дефицита оборотных средств. Это означает, что в течение длительного промежутка времени Фактор будет вынужден финансировать продажи клиента, почти не влияя на подбор контрагентов, ценовую политику и другие существенные моменты стратегии продаж своего клиента. Для того, чтобы избежать угроз, связанных с таким положением, факторинговые компании выплачивают после поставки досрочные платежи не в полном объеме (как правило, в размере 60-90%). Это сохраняет заинтересованность продавца в проведении оптимальной политики продаж, сообразуясь с рыночной ситуацией, поскольку, препятствуя возникновению дополнительных потерь Фактора, он тем самым оберегает от потерь и себя.

С учетом второй качественной особенности факторных операций ожидание прибыли от факторинговой операции необходимо зависит от времени ее исполнения. Поэтому критерий эффективности факторной операции можно записать в виде:

$$\int_0^{Tf} dt \int_R^{(1+r)Cf} [(1+r)C - R] \tilde{F}'_t(t, R) dR \rightarrow \min, \quad (2)$$

или

$$\int_0^{Tf} dt \int_R^{(1+r)Cf} F(t, R) dR \rightarrow \min, \quad (3)$$

где

T – срок исполнения факторинговой операции.

Очевидно, что операция будет эффективной, если интеграл потерь на каждую реализацию дохода от проекта ниже его стоимости не будет превышать факторинговую комиссию, ведь в противном случае это будет означать, что комиссия не покрывает возможные потери.

Далее необходимо перейти к решению двух задач: во-первых, рассмотрение такой методики для пробного периода факторингового обслуживания, а во-вторых, применить модель факторингового обслуживания, анализ которой позволит дать ряд качественных рекомендаций фактору по повышению надежности факторных операций.

На основе статистического обобщения эмпирического материала в последние 20 лет появилось несколько моделей прогноза наступления риска делькредере по мотивам неисполнения или неполного либо несвоевременного исполнения своих обязательств торгово-промышленным предприятием [6, 7].

Значительная часть таких моделей (модель CART, модель Альтмана и им подобные) основана на разбиении дебиторов в зависимости от их состоятельности и платежеспособности на классы эквивалентности. Такой подход полностью не применим для исследования риска делькредере в факторных операциях, где этот риск является лишь одним из сопутствующих и конечный результат оценки эффективности операции должен включать интегральную оценку всех рисков, а разбиение на классы эквивалентности, таким образом, может быть лишь конечным, но никак не промежуточным результатом. К тому же все эти модели являются статическими, а нужно контролировать исполнение экспортного контракта в произвольный момент времени.

За основу в дальнейших рассуждениях может быть взята только модель описания и алгоритмизации кредитного и ликвидного рисков, известная как модель Чессера, разработанная в 1974 г. Это также статическая модель, но поскольку она

сформулирована не в терминах классов эквивалентности, а в терминах вероятности неисполнения договора, то можно получить ее динамическую модификацию, которую в дальнейшем возможно использовать в исследованиях факторных операций. Очень важно также, что в понятие “неисполнение договора” Чессер включает не только непогашение кредита (товарного или денежного), но и любые другие отклонения в условиях его погашения от договорных (в сроках, размерах, формах его погашения и т. д.), которые делают кредит менее выгодным для кредитора [8, 9].

В модель Чессера входят следующие шесть переменных:

$$X_1 = \frac{\text{Наличность} + \text{Легкорезализуемые ценные бумаги}}{\text{Совокупные активы}}$$

$$X_2 = \frac{\text{Наличность} + \text{Легкорезализуемые ценные бумаги}}{\text{Нетто-продажи}}$$

$$X_3 = \frac{\text{Брутто – доходы}}{\text{Совокупные активы}}$$

$$X_4 = \frac{\text{Совокупная задолженность}}{\text{Совокупные активы}}$$

$$X_5 = \frac{\text{Основной капитал}}{\text{Чистые активы}}$$

$$X_6 = \frac{\text{Оборотный капитал}}{\text{Нетто-продажи}}$$

Адекватность модели Чессера подтверждается многолетней практикой ее применения: вероятность ненадлежащего исполнения кредитного договора, вычисленного на основе значений переменных модели, измеренных за год до начала срока действия договора, в 75% случаев совпадает с экспертной оценкой степени его действительного невыполнения. Поскольку, степень выполнения торговых кредитных соглашений в России полностью отвечает мировым стандартам (по крайней мере, в отраслях, где конечными потребителями являются физические лица – в них исполнение денежных обязательств, возникших из поставки товаров, всегда означает оплату “живыми” деньгами, а не суррогатами), то все дальнейшие рассуждения будут пригодны и для товарных кредитов.

На основе сказанного выше рассмотрим теперь линейную комбинацию независимых переменных $X_1 - X_6$, коэффициенты которой представляют собой эмпирически определенные веса влияния указанных выше факторов на вероятность возникновения риска делькредере:

$$Y = v_0 + \sum v_i X_i. \quad (4)$$

Вероятность невыполнения договора заемщиком в модели Чессера выражается формулой:

$$P = (1 + e^{-Y})^{-1}. \quad (5)$$

Экономический смысл финансово-экономических показателей, используемых при формировании переменных $X_1 - X_6$, достаточно различен. Наибольший вес имеют переменные X_1, X_3, X_4 . При этом переменные X_1 и X_4 характеризуют ликвидность компании, а X_3 – ее рентабельность.

Переменная X_4 представляет собой величину, обратную коэффициенту ликвидности компании, характеризующему способность компании в принципе расплатиться со всеми своими кредиторами, реализовав, если потребуется, все свои активы. Следовательно, большие значения коэффициента X_4 означают большой

кредитный риск. Частное переменных X_1/X_4 соответствует коэффициенту мгновенной ликвидности, характеризующему способность немедленной оплаты долгов, только лишь за счет высоколиквидных активов. Следовательно, при небольшой степени кредитного риска большие значения коэффициента X_1 свидетельствуют об очень большом ликвидном риске.

Переменная X_3 определяет рентабельность совокупных активов компании. Естественно, что именно на значение этого показателя в наибольшей степени влияют изменение конъюнктуры рынка, тактические решения менеджмента и сезонные факторы.

Поскольку переменные X_1, X_2, X_4, X_5, X_6 – балансовые показатели, то в силу своей низкой инерционности и относительной непродолжительности факторной операции (до 90 дней) мы будем их считать постоянными.

Такое предположение, однако, является недопустимым для переменной X_3 , для которой числитель соответствующей дроби (брутто-доходы) существенно изменяются в течение всего времени осуществления факторной операции.

По своему экономическому смыслу брутто-доходы совпадают при уровне нетто-доходов R в каждый момент времени $t \in (0, T)$ с чистой текущей стоимостью (NPV – Net Present Value) операции, т.е. с интегральной стоимости операции, приведенной к текущему моменту времени. Метод NPV относится уже к динамическим методам, суть которых состоит в приведении доходов и расходов по операции, получаемым в несопоставимые промежутки времени к одному сроку. При таком подходе ожидаемые чистые денежные потоки в течение срока жизни проекта становятся сопоставимыми с потоком в момент времени приведения. Приведение осуществляется путем дисконтирования к более ранней дате или, наоборот, наращивания суммы платежа (если эта дата относится к будущему).

Очевидно, что в рассматриваемой задаче поток платежей носит непрерывный и нерегулярный характер. Учитывая непрерывность процесса обесценения денежных средств, для поиска коэффициента дисконтирования, будем применять особый вид процентной ставки, характеризующей удорожание (за счет инфляции и изменения валютного курса) – силу роста (в английской терминологии – force of interest). Обозначим силу роста через δ .

Поскольку переменные X_1, X_2, X_4, X_5, X_6 суть балансовые показатели, в силу их низкой инерционности и относительной непродолжительности факторной операции (до 90 дней) мы будем их считать постоянными.

Такое предположение, однако, является недопустимым для переменной X_3 , для которой числитель соответствующей дроби (брутто-доходы) необходимо существенно изменяются в течение всего времени факторной операции.

По своему экономическому смыслу, брутто-доходы совпадают при уровне нетто-доходов R во время $t \in (0, T)$ с чистой текущей стоимостью (NPV – Net Present Value) операции.

При непрерывности потока платежей $q(t, R)$ и приведении к начальному моменту времени чистая текущая стоимость будет равна:

$$NPV(0, R) = \int_0^T q(t, R) e^{-\delta(t)t} dt, \quad (6)$$

где

δ – сила роста денежных средств, вычисляемая по формуле

$$\delta = \ln(1 + i(t)),$$

где

$i(t)$ – обобщенный коэффициент дисконтирования.

Рассуждая аналогично, получим значение современной текущей стоимости операции в момент времени $t \in (0, T)$:

$$NPV(t, R) = \int_{j=-N}^N q(t + j\tau, R) \tau e^{-\delta(t+j\tau)(t+j\tau)} dt. \quad (7)$$

Обозначим теперь совокупные активы импортера через A , $\frac{v_3}{A}$ через α , а $Y - \alpha NPV$ через z . Получим:

$$P = (1 + \exp(z + \alpha(\sum_{j=-N}^N q(t + j\tau, R) \tau e^{-\delta(t+j\tau)(t+j\tau)})))^{-1}. \quad (8)$$

Величина $(1-P)$ в данном случае равна вероятности того, что величина текущих потерь будет меньше, чем уровень нетто-доходов R в каждый момент времени t , что будет означать возможность дебитора выполнить свои обязательства по кредиту в полной степени. Ее же можно рассматривать и как ожидаемую в любой случайно рассмотренной факторной операции к получению долю от идеальной прибыли от финансирования (т. е. полученной в условиях отсутствия риска делькредере). Иными словами:

$$(1 - P)(r - \rho)C = \int_{\underline{R}}^R F(t, R) dR \quad (9)$$

Продифференцируем теперь по R левую и правую части. Имеем:

$$F(t, R) = \partial P / \partial R = -(1 + \exp(z + \alpha(\sum_{j=-N}^N q(t + j\tau, R) \tau e^{-\delta(t+j\tau)(t+j\tau)})))^{-2} \times \\ \times \exp(z + \alpha(\sum_{j=-N}^N q(t + j\tau, R) \tau e^{-\delta(t+j\tau)(t+j\tau)})) \alpha \sum_{j=-N}^N \partial q(t + j\tau, R) / \partial R \tau e^{-\delta(t+j\tau)(t+j\tau)} = \\ = G(t, R, [q(t, R)], [q_R(t, R)]), \quad (10)$$

где $[\xi(t, R)]$ для любой функции двух переменных обозначает вектор-функцию с компонентами $\xi(t - \tau N, R), \dots, \xi(t + \tau N, R)$.

Предположим теперь, что риск делькредере связан исключительно с деятельностью дебитора (из описания факторной операции ясно, что он является превалирующим) и пренебрежем пока политическим риском. Валютный риск учитывает функция роста $\delta(t)$, которую рассмотрим позднее.

Тогда задача об эффективности факторной операции сводится к вариационной задаче об экстремуме функционала:

$$\int_0^T dt \int_{\underline{R}}^{(1+r)C} G(t, R, [q(t, R)], [q_R(t, R)]) dR, \quad (11)$$

$$q(t, R) = 0 ((t, R) \in E_0 \cup E_1 \cup G_0 \cup G_1).$$

$$E_0 = \{(t, R) | t \in [-2\tau; 0), R \in [\underline{R}; (1+r)C]\};$$

$$E_1 = \{(t, R) | t \in (T; T + 2\tau], R \in [\underline{R}; (1+r)C]\};$$

$$G_0 = \{(t, R) | t \in [-2\tau; T + 2\tau), R = \underline{R}\};$$

$$G_1 = \{(t, R) | t \in [-2\tau; T + 2\tau), R = (1+r)C\}.$$

Рассмотрим теперь вопрос об учете валютного риска при оценке эффективности факторной операции. Как видно, значение современной стоимости операции зависит от функции $\delta(t) = \ln(1 + i(t))$, где $i(t)$ – функция, связанная с изменением цены одной валюты, нормированной относительно другой (при такой трактовке валюта импортера является товаром, приобретаемым за деньги – валюту экспортера) [10]. В таком случае действует динамическая модель, описывающая приспособление цен во времени к вариациям спроса.

Основным уравнением этой модели является следующее уравнение:

$$i(t + 1) = \max[0, i(t) + \rho U(i(t))] \quad (12)$$

где $U(j)$ – функция избыточного спроса. Цена одной валюты относительно другой повышается или понижается в зависимости от того, будет ли избыточный спрос на валюту положительным или отрицательным. Поскольку спрос на валюту предъявляют как субъекты международной торговли (для обеспечения платежей по международным контрактам) так и спекулянты (для диверсификации инвестиций в различные краткосрочные финансовые инструменты), то скорость повышения или понижения цены одной валюты относительно другой $\frac{di(t)}{dt}$ пропорциональна результирующей от величины спекулятивных намерений относительно данной валюты $s(i,t)$ и размеру избыточного предложения по указанной валюте со стороны субъектов международной торговли.

Таким образом,

$$di(t)/dt = s(i, t) + U(i). \quad (13)$$

Предположим, что для рассматриваемого процесса имеет место строгая валовая заменимость, выраженная условием:

$$dU/di > 0. \quad (14)$$

Экономическое истолкование этого свойства состоит в согласованном (заменимом) изменении курсов валют: повышение цены только одной валюты ведет к увеличению спроса на другие (другую). Такое предположение, естественно, допустимо лишь в том случае, если в отношении данных валют выполнена статья 8 Устава МВФ (свободная конвертируемость при текущих операциях), т. е. с точки зрения расчетов между экспортером и импортером (а, значит, и со стороны всех субъектов валютного рынка) обе валюты при расчетах являются полностью взаимозаменяемыми.

При этом предположении при $\rho > 0$ и надлежащих краевых условиях имеем, что $i(t) + \rho U(i(t)) > 0$.

Спекулятивные намерения субъектов валютного рынка на коротких промежутках времени относительно данной валюты вызываются как изменением ее текущей стоимости за время, когда это изменение можно распознать, т. е. $i(t)-i(t-1)$, так и разностью между ее стоимостью и среднерыночной стоимостью других финансовых инструментов $i(t)-f(t)$. Поэтому:

$$s(i(t), t) = \beta[i(t) - i(t - 1)] + \gamma[i(t) - f(t)]. \quad (15)$$

Коэффициенты β и γ характеризуют меру адаптации рынка к изменению текущих доходностей различных финансовых инструментов и определяются индивидуально для каждого национального валютного рынка эмпирическим путем.

Тогда окончательно уравнение (20) преобразуется к виду:

$$i(t + 1) = i(t) + \rho\left(\frac{di}{dt} - \beta[i(t) - i(t - 1)] - \gamma[i(t) - f(t)]\right) \quad (16)$$

или

$$\frac{di}{dt} = \beta i(t - 1) + [\beta + \gamma - \frac{1}{\rho}]i(t) + (\frac{1}{\rho})i(t + 1) + \gamma f(t). \quad (17)$$

Кроме того, поскольку поведение функции $i(t)$ до момента начала операции нам известно, то для $t < 0$ задано краевое условие. С этим условием задача (17) становится частным случаем задачи вида:

$$\begin{aligned} x'(t) &= \sum_{i=1}^s A_i x(t + n_i) + \Psi(t), \quad t \in [m_0, m_1], \\ x'(t) &= \phi(t), \quad t < m_0, \\ x(t^*) &= x^*, \quad t \in R. \end{aligned} \quad (18)$$

(здесь по смыслу $m_0=0$, $m_1=T$).

Политический риск, препятствующий оплате поставленного товара, может быть связан как со страной импортера, так и со страной экспортера. Количественные показатели политического риска пытаются индексировать страну по отношению к

другим странам по критерию политического риска или оценить вероятность того, какие максимальные потери может нести компания. Можно выделить два типа таких показателей. Первый тип измерения является чисто статистическим и базируется на исторических корреляциях между некоторыми измеряемыми переменными и последующими убытками из-за политического риска. Второй тип основывается на социо-политико-поведенческой теории, учитывающей факторы, которые приводят к действиям, имеющими своими результатами потери из-за политического риска [10].

Примером чисто статистического метода измерения политического риска является последовательный дискриминационный анализ. Это статистическая процедура определения некоторых характерных социо-экономических переменных, связанных с политическими действиями, которые приводят в конечном итоге к убыткам для иностранных компаний. Они определяются по первоначальным данным. После выявления таких значений переменных им присваиваются весовые коэффициенты таким образом, что когда текущие наблюдения текущей стоимости этих переменных умножаются на весовые коэффициенты и складываются вместе, то их сумма образует Z-распределение, которое легко перевести в вероятность получения тех или иных потерь. Чтобы устранить пристрастные мнения и повысить объективность, общий показатель составляют из трех частных показателей, которые отражают степень социальной конфликтности, процессы, идущие в правительстве, и социо-экономические характеристики общества. В эти оценки включаются и характеристики уровней доверия к точности оценивания.

Заключение. Описанные модели полностью описывают методику оценки эффективности факторинговой операции для банка. Но при реализации данной методики мы сталкиваемся с проблемой неопределенности, возникающей в результате отсутствия достаточного статистического материала для определения вида потока платежей $q(t, R)$ и вида Y (линейной комбинации независимых переменных X_1-X_6). Невозможность точного определения $q(t, R)$ приводит к тому, что в результате, полученное решение будет отличаться от реального положения дел.

Отсутствие достаточной статистики по факторинговым операциям в России, несомненно, является одним из главных препятствий в развитии факторинга в нашей стране, поскольку без какой-либо статистики затруднительно решать задачи анализа и управления сопутствующими рисками. Для того, чтобы минимизировать негативные последствия, вызванные этим обстоятельством, наиболее оптимальным путем развития факторинга в России видится следующий: первоначально внедрение факторингового обслуживания должно начаться с внутренних операций, причем в тех отраслях, расчеты в которых основаны на товарных кредитах на небольшие сроки и на небольшие суммы, а спрос обладает весьма слабой эластичностью. Полученный таким образом и обработанный статистический материал, например, под требования изложенной выше методики, позволит перейти к широкому применению факторинга, в том числе и экспортного.

Центральным вопросом при определении надежности факторных операциях является степень влияния рисков, прежде всего кредитного и ликвидного. Однако при регулярных поставках товаров постоянному кругу покупателей, характерных для торговли высоколиквидными товарами, над кредитным риском преобладает ликвидный риск. Множественность рисков (равно как и множественность конечных заемщиков) существенно снижают общий интегральный риск факторной операции. Основные риски, сопутствующие факторинговому обслуживанию можно разбить на три основных группы (риски делькредере, валютные риски и политические риски), в каждый момент времени

существенно влияющие на эффективность факторной операции. Выявленные таким образом качественные закономерности дают возможность для применения количественных методов оценивания эффективности и надежности факторинга. Эти методы основаны на теории дифференциально-разностных уравнений и приводят к конкретным результатам.

За основу построения динамической модели факторных операций взята статическая модель Чессера. Применимость модели Чессера в качестве начального звена для дальнейших построений основана на том, что коэффициенты уравнения модели Чессера рассчитаны с учетом не только кредитного, но и ликвидного риска, который имеет первостепенное значение для оценки эффективности факторной операции.

Таким образом, несмотря на относительную молодость факторинговой индустрии в мире и, особенно, в России, уже накоплен достаточный эмпирический материал, позволивший построить теории, дающие возможность качественного и количественного оценивания эффективности факторингового обслуживания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекларян Л.А., Трейвиш. М.И. Факторинговые операции: Методы анализа эффективности и надежности. М.: ЦЭМИ. 1996. 51с.
2. Бекларян Л.А., Трейвиш. М.И. Модель функционирования факторинговых операций // Экономика и мат. методы. 1997. Т. 38, вып.4. С.55-65.
3. Покаместов И.Е. Методы анализа эффективности факторинговой деятельности коммерческого банка // Страховое дело. 2012. № 5. С. 28-30.
4. Курбатов С.Ю. О развитии факторинговых услуг // Деньги и кредит. 2007. № 5. С. 47-49.
5. Положение Банка России «О порядке формирования кредитными организациями резервов на возможные потери по ссудам, по ссудной и приравненной к ней задолженности» от 26 марта 2004 г. № 254-П.
6. Герасимова Е. Б. Феноменология анализа финансовой устойчивости кредитной организации. М.: Финансы и статистика. 2006. 392 с.
7. Гришина О.В., Земцов А.А., Самиев П.А. Российский рынок факторинга // Аудитор. 2006. № 8. С. 45-48.
8. Методика учета факторинговых операций// Бухгалтерский учет в кредитных организациях. 2006. №11.
9. Фельдман А. "Факторинговые и форфейтинговые операции в России" из кн. "Вексельное обращение". М. "Инфра-М". 1995. С. 58-60.
10. Шмиттгофф К. "Факторинг, форфейтинг, лизинг и другие формы коммерческого кредитования" из кн. "Экспорт: право и практика международной торговли". М. Юридическая литература. 1993. С. 231-235.

UDK 330.42

EFFICIENCY EVALUATION OF THE INTERNATIONAL FACTORING OPERATION FOR A COMMERCIAL BANK

Mansurova Yulia Talgatovna

Ph.D. in economics,

Assoc. Prof. of department "Finance, money circulation and economic security",

e-mail: mansurova.j@mail.ru

Tuktarova Polina Andreevna

Postgraduate student of the department "Artificial Intelligence Systems in Energy"

e-mail: p.korobova@mail.ru

Ufa State Aviation Technical University,

450077 Ufa, st. Karl Marx, 12.

Mansurov Tagir Valerievich

Ph.D., Director of LCC «SMK-10»

e-mail: spacetag@gmail.com

450055 Ufa, st. Sh. Rustaveli, 9

Abstract. To make a decision on the introduction of international factoring in the package of export-import services of the bank, it is necessary to calculate the economic effect of this event. For this purpose, the work considered models for assessing the effectiveness of factoring implementation for a bank, which allow, having basic data on the planned factoring operation and the borrowing company, to assess the effectiveness of lending for the bank, which will reduce the risk of bank losses from ineffective operations. Achievement of the maximum effect (obtaining the ideal maximum profit) throughout the entire operation is prevented by a number of risks accompanying any international factorial operation. An economic and mathematical model is considered, in which the condition of maximizing the expectation of a bank's profit was taken as the criterion of efficiency, taking into account the main characteristics that qualitatively distinguish an international factoring operation from standard active operations. The revealed qualitative regularities make it possible to use quantitative methods for assessing the effectiveness and reliability of factoring. Chesser's static model is taken as the basis for constructing a model of international factorial operations. Since the international factoring operation is characterized by the duration of the financing period, it becomes necessary to use the NPV (Net Present Value) method. When conducting export-import transactions, an important place is occupied by the change in the price of one currency, normalized relative to the other. For a numerical assessment of this type of risk, a model is used, which is based on the theory of differential equations. Thus, the assessment of the effectiveness of an international factoring operation is reduced to an algorithm that takes into account both the effect of currency risk and delcredere risk.

Keywords: factoring, efficiency assessment, delcredere risk, currency risk.

REFERENCES

1. Beklaryan L.A., Treivish M.I. Faktoringovyе operacii: Metody analiza jeffek-tivnosti i nadezhnosti [Factoring operations: Methods for analyzing efficiency and reliability]. 1996. P. 51. (in Russian)
2. Beklaryan L.A., Treivish. M.I. Model' funkcionirovaniya faktoringovyh operacij [Factoring operation model]. // Jekonomika i mat. metody = Economics and mat. methods. 1997. Vol. 38. Issue 4. P.55-65. (in Russian)

3. Pokamestov I.E. Metody analiza jeffektivnosti faktoringovoj dejatel'nosti kommercheskogo banka [Methods for analyzing the effectiveness of factoring activities of a commercial bank] // Strahovoe delo = Insurance business. 2012. № 5. Pp.28-30. (in Russian)
4. Kurbatov S.Yu. O razvitii faktoringovyh uslug [On the development of factoring services] // Den'gi i kredit = Money and Credit. 2007. № 5. Pp.47-49. (in Russian)
5. Polozhenie Banka Rossii «O porjadke formirovanija kreditnymi organizacijami rezervov na vozmozhnye poteri po ssudam, po ssudnoj i priravnennoj k nej zadolzhennosti» ot 26 marta 2004 g. № 254-P [Regulation of the Bank of Russia "On the procedure for the formation by credit institutions of reserves for possible losses on loans, on loan and equivalent indebtedness" dated March 26, 2004 № 254-P]. M.: Finansy i statistika. = M.: Finance and Statistics. 2006. 392p. (in Russian)
6. Gerasimova E.B. Fenomenologiya analiza finansovoy ustoychivosti kreditnoj organizatsii [Phenomenology of analysis of financial stability of a credit organization]. (in Russian)
7. Grishina O.V., Zemtsov A.A., Samiev P.A. Rossiyskiy rynek faktoringa [Russian factoring market] // Auditor = Auditor. 2006. № 8. (in Russian)
8. Metodika ucheta faktoringovyh operacij [Methodology for accounting for factoring operations] // Buhgalterskij uchet v kreditnyh organizacijah = Accounting in credit organizations. 2006. № 11. (in Russian)
9. Feldman A. "Faktoringovye i forfejtingovye operacii v Rossii" iz kn. "Veksel'noe obrashhenie" ["Factoring and forfeiting operations in Russia" from the book. "Century circulation"]. M. "Infra-M"= M. "Infra-M". 1995. Pp. 58-60 (in Russian)
10. Schmitthoff K. Faktoring, forfejting, lizing i drugiye formy kommercheskogo kreditovaniya" iz kn. "Eksport: pravo i praktika mezhdunarodnoy trgovli Factoring, forfeiting, leasing and other forms of commercial lending "from the book." Export: law and practice of international trade]. M. Juridicheskaja literatura= Legal literature. 1993. Pp. 231-235 (in Russian)

Статья поступила в редакцию 27.09.2021; одобрена после рецензирования 13.10.2021; принята к публикации 18.10.2021.

The article was submitted 27.09.2021; approved after reviewing 13.10.2021; accepted for publication 18.10.2021.

ПАМЯТИ СЕРГЕЯ ВИКТОРОВИЧА ЕЛИСЕЕВА



22 октября 2021 г. ушел из жизни доктор технических наук, профессор Сергей Викторович Елисеев - известный ученый в вопросах создания и развития методов теоретической и прикладной механики, теории механизмов и машин, теории колебаний, динамики управляемых систем, мехатроники, робототехники и автоматизации технологических процессов, один из лидеров отечественной науки.

Сергей Викторович родился 31 марта 1940 г. в селе Кыштым Челябинской области, затем семья переехала в Иркутск, с 1947 по 1951 годы он учился в школе № 11 г. Иркутска, в 1958-м году сдал на «отлично» выпускные экзамены на самолетостроительном отделении Иркутского техникума точного машиностроения (ныне – авиационного) и поступил в Иркутский горно-металлургический институт (ИрГТУ) на машиностроительный факультет, по окончании которого в 1963 году получил красный диплом и был распределен в Омский научно-исследовательский конструкторско-технологический институт шинной промышленности (НИКТИ), где до 1964 г. работал в должности инженера-конструктора лаборатории пневматического транспорта, поступил в очную аспирантуру ОмИИТ (ОмГУПС), в 1967 году успешно защитил кандидатскую диссертацию по специальности 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация» и вернулся в Иркутск.

С 1968 по 1975 гг. С. В. Елисеевым был пройден богатый научный и творческий путь от старшего преподавателя Иркутского политехнического института до заведующего лабораторией искусственного интеллекта и динамики роботов. Диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук Сергей Викторович Елисеев защитил в 1973 г. в Институте механики Украинской Академии наук по специальности «Теоретическая механика». В течение 1974 года профессор стажировался в Иллинойском и Массачусетском технологических институтах США. В последующие годы – в научных организациях и вузах Англии, Германии, Франции, Индии, Польши.

С 1976 по 1991 гг. прошлого столетия Сергей Викторович сознательно посвятил себя общественному служению в целом и академической науке, в частности, в стенах Иркутского научного центра СО АН СССР. Его усилиями был создан Отдел робототехники, автоматизации и технической физики при Президиуме Центра. За пятнадцать лет он проявил выдающиеся организаторские способности на руководящих постах: от заведующего лабораторией динамики роботов и искусственного интеллекта Отдела теории систем и кибернетики Сибирского энергетического института до заместителя Председателя Президиума Иркутского научного центра СО АН СССР с сохранением обязанностей заместителя директора Иркутского вычислительного центра (1987–1991 гг.) и заведующего Отделом робототехники, автоматизации и технической физики при Президиуме ИНЦ СО АН СССР. С 1980 по 1991 годы Сергей Викторович Елисеев выполнял одновременно с научной деятельностью обязанности заместителя председателя технико-экономического Совета при обкоме КПСС, занимался разработкой комплексной программы развития Иркутской области.

В 1986–1990 гг. Сергей Викторович являлся руководителем Иркутского областного Совета НТО, депутатом Иркутского областного Совета народных депутатов, членом облисполкома Иркутской области, членом Советов по проблемам машиностроения и автоматизации научных исследований при Президиуме АН СССР. С 1991 г. Сергей Викторович перешел на административную деятельность в Сибэкспоцентр (АО «Иркутская ярмарка») в качестве заместителя генерального директора по науке и технологиям, а в 1999-м возвратился в систему высшего образования на должность проректора Восточно-Сибирского института экономики и права.

С 2002 г. по настоящее время трудился в ИрГУПС* в должностях проректора по внешним связям и послевузовскому образованию, проректора по международным связям, с января 2014 г. – главный научный сотрудник, директор Научно-образовательного центра современных технологий, системного анализа и моделирования, который он и основал. В 2004 г. он наладил выпуск печатного органа – рецензируемого ежеквартального журнала «Современные технологии. Системный анализ. Моделирование».

Сергеем Викторовичем были опубликованы около 700 научных работ, в том числе, 27 монографий, 4 учебных пособия, получены более 80 патентов и авторских свидетельств на изобретения и полезные модели. Четыре его ученика защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, 57 стали кандидатами, а впоследствии 13 из них – докторами наук. Ему были присвоены почетные звания: «Заслуженный инженер Российской Федерации» (2004 г.), «Заслуженный деятель науки Российской Федерации» (2007 г.), «Основатель научной школы: Вибрации. Вибрационная защита. Вибрационные технологии» (2015 г.), в 2012 г. вручен почетный знак общественного поощрения «75 лет Иркутской области».

С 2016 г. Сергей Викторович был членом редколлегии нашего журнал и оказывал нам неоценимую поддержку. Его уход из жизни – большая потеря для всех, кто знал его, кто работал с ним. Светлая память о нем навсегда останется в сердцах его друзей и коллег.

*Собственник фото: Архив ИрГУПС

