ISSN 2413 - 0133
Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

№1(29)/2023
6+

Information and mathematical **ISSN 2413 – 0133**

technologies in science and management **Scientific journal**

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Научный журнал

№ 1 (29)

© Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения Российской академии наук

2023

ISSN 2413 – 0133 Индекс E79114*

EDITORIAL BOARD	РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА
Ablameyko S.V.	Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ
Arshinskiy L.V.	Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
Berestneva O.G.	Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ
Boukhanovsky A.V.	Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО
Bychkov I.V.	Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Woern H.	Вѐрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Voevodin V.V.	Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ
Wolfengagen V.E.	Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ
Gornov A.Y.	Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Gribova V.V.	Грибова В.В., д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
Groumpos P.	Грумпос П., Греция, University of Patras
Zorina T.G.	Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси
Kazakov A.L.	Казаков А.Л., д.ф.-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
Kalimoldaev M.N.	Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ
Karpenko A.P.	Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана
Komendantova N.P.	Комендантова Н.П., PhD, Австрия, Лаксенбург, IIASA
Kureichik V.V.	Курейчик В.В., д.т.н., профессор ЮФУ, Таганрог
Lis R.	Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology
Massel L.V.	Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Moskvichev V.V.	Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, СКТБ «Наука» СО РАН
Ovtcharova J.	Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
Popov G.T.	Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
Sidorov D.N.	Сидоров Д.Н., д.ф-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Smirnov S.V.	Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН
Stennikov V.A.	Стенников В.А., академик РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Stylios C.	Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus
Taratukhin V.V.	Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster
Khamisov O.V.	Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Hodashinsky I.A.	Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР
Chubarov L.B.	Чубаров Л.Б., д.т.н., Новосибирск, ИВТ СО РАН
Yusupova N.I.	Юсупова Н.И., д.т.н., Уфа, УГАТУ

EXECUTIVE EDITORIAL	ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА		
Chief Editor Massel L.V.	Главный редактор	Массель Л.В.	д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Executive Editor Bakhvalova Z.A.	Выпускающий редактор	Бахвалова З.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Editor Gaskova D.A.	Редактор	Гаськова Д.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Editor Massel A.G.	Редактор	Массель А.Г.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Designer Pesterev D.V.	Дизайнер	Пестерев Д.В.	Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Адрес учредителя, издателя и редакции
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

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

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016.
Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (по состоянию на 29.03.2022) по научным специальностям 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.5; 2.4.5.
Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Регистрационный номер ПИ № ФС 77 – 73539 от 31.08.2018.

Отпечатано в типографии «Дубль Принт»
664046 г. Иркутск, ул. Волжская, 14
*Подписка на журнал доступна со второго полугодия 2021г.
Дата выхода 31.03.2023 г. Тираж 100 экз.

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

Содержание

Методологические вопросы информационных и математических технологий

Черкашин А.К. Математическая интерпретация трансцендентальной аналитики и метатеория научного знания 5

Протасов В.И., Потапова З.Е., Мирахмедов Р.О., Клименко В.А. Использование метода Монте-Карло и генетического программирования для получения математической модели метода эволюционного согласования решений 23

Гай В.Е., Домнина Н.А., Баринов Р.О., Поляков И.В., Голубенко В.А., Кузнецов Г.Д. Модель и алгоритмы обнаружения объектов на изображении с использованием локального признакового описания 33

Математическое моделирование в энергетике

Репецкий О.В., Хоанг Д.К. Математическое моделирование и численный анализ влияния толщины радиальных рабочих лопаток на долговечность энергетических турбомашин 44

Куклина А.К. Методология прогнозирования спроса на энергию в сегменте водного транспорта с учетом межтопливной конкуренции 54

Коробова Л.А., Матыцина И.А., Калугин В.А. Экспериментальный стенд для обнаружения дефектов воздухопроводов 64

Карамов Д.Н., Мальцев И.А. Моделирование интегрированной фотоэлектрической системы в условиях развития частной микрогенерации 73

Математические и информационные технологии в энергетике, экономике и экологии

Зорина Т.Г., Юркевич О.И. Анализ электроемкости ВВП Республики Беларусь при прогнозировании электропотребления 86

Панасюк В.В. Риски и угрозы энергетической безопасности Республики Беларусь 99

Кузьмин В.Р. Технология оценки загрязнений окружающей среды объектами энергетики с применением информационно-вычислительной системы WICS 111

Капустин Н.О. Выработка подходов для моделирования и прогнозирования рынка пластиков с учетом формирования «циркулярной экономики» 123

Мансурова Ю.Т., Старцева А.В. Задача формирования системы инновационного развития предприятия с учетом инновационных бизнес-процессов 135

Интеллектуальные технологии и информационная безопасность

Исхаков А.Ю., Жарко Е.Ф. Подход к защите интерфейсов управления киберфизической системой от угроз нарушения доступности 149

Наседкин П.Н., Аршинский Л.В. Оценка состояния комплексной системы защиты информации на основе онтологий 158

Макарова Е.А. Обработка слабоструктурированных текстовых данных для использования в моделях анализа 178

Китаева О.И. Интеллектуальный анализ образовательных данных учебной дисциплины с использованием программы Orange 190

Памяти Н.И. Юсуповой 201

Content

Methodological issues of information and mathematical technologies

Cherkashin A.K. Mathematical interpretation of transcendental analytics and metatheory of scientific knowledge **5**

Protasov V.I., Potapova Z.E., Mirakhmedov R.O., Klimenko V.A. Using the Monte - Carlo method and genetic programming to obtain a mathematical model of the method of evolutionary matching of solutions **23**

Gai V.E., Domnina N.A., Barinov R.O., Polyakov I.V., Golubenko V.A., Kuznetsov G.D. Model and algorithms for detecting objects in an image using a local feature description **33**

Mathematical modeling in energy

Repetckii O.V., Hoang Dinh Cuong Mathematical modeling and numerical analysis of the influence in the thickness blades on the durability of power turbomachines **44**

Kuklina A.K. Methodology for forecasting marine fuel consumption taking into account inter-fuel competition **54**

Korobova L.A., Matytsina I.A., Kalugin V.A. Experimental stand for detecting defects in air ducts **64**

Karamov D.N., Maltsev I.A. Modeling of an integrated photovoltaic system in the conditions of development of private microgeneration **73**

Mathematical and information technologies in energy, economics and ecology

Zorina T.G., Yurkevich O.I. Analysis of electricity intensity of GDP of the Republic of Belarus in the field of electricity consumption forecasting **86**

Panasyuk V.V. Risks and threats to energy security of the Republic of Belarus **99**

Kuzmin V.R. Technology for assessing environmental pollution by energy facilities with the use of information and computing system WICS **111**

Kapustin N.O. Development of a methodological approach to forecasting the plastics market, taking into account the formation of the "circular economy" of the industry **123**

Mansurova J.T., Startseva A.V. The task of forming a system of innovative development of the enterprise taking into account innovative business processes **135**

Intelligent technologies and information security

Iskhakov A.Yu., Jharko E.F. Approach to protecting cyber-physical system management interfaces from accessibility threats **149**

Nasedkin P.N., Arshinskiy L.V. Assessment of the state of an integrated information security system based on ontologies **158**

Makarova E.A. Processing of semi-structured text data for use in data analysis models **178**

Kitaeva O.I. Intelligent analysis of educational data of the educational discipline using the Orange program **190**

In memory of N.I. Yusupova **201**

Методологические вопросы информационных и математических технологий

УДК 167.2:168.51-2:51-7
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.001

Математическая интерпретация трансцендентальной аналитики и метатеория научного знания

Черкашин Александр Константинович
Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН,
Россия, Иркутск, *akcherk@irnok.net*

Аннотация. Исследуются различные методы философской системы И. Канта с позиций математической и географической науки. Эта система рассматривается как часть метатеоретического подхода, представленного средствами методологического, математического и статистического анализа. Используются процедуры векторного расслоения категориального пространства признаков на многообразиях, разработанных в дифференциальной геометрии, в качестве модели трансцендентальной аналитики. Векторная алгебра расслоения моделирует процедуры трансцедентальной диалектической логики в виде триадических систем организации знаний. Наблюдаемая реальность описывается в показателях координатного пространства, априорное знание представлено многообразием связей, на котором осуществляется касательное расслоение пространства на систему независимых слоев в качестве противоположностей, представляющих законы чистого абсолютного знания, исключающего условности познания реальности. Выводятся универсальные уравнения этих связей, представлены примеры применения этих уравнений и их соотношений для анализа статистических данных и создания системных теорий. Предполагается, что совместная работа философов, математиков и географов даст возможность согласовать трансцендентальные понятия и законы для создания единого поля метатеоретических исследований.

Ключевые слова: Трансцендентальная аналитика, процедуры расслоения, пространственные многообразия, триадические схемы, диалектическая логика, статистический анализ, метатеоретическое знание, общая теория систем, правила вывода

Цитирование: Черкашин А.К. Математическая интерпретация трансцендентальной аналитики и метатеория научного знания / А.К. Черкашин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 5-22. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.001.

Введение. Книга И. Канта «Критика чистого разума» (КЧР) – одно из ключевых произведений мировой философии по теории познания. Считается [1], что Кант создал всеохватывающее систематическое описание архитектонической способности чистого разума формировать системы, которое можно успешно применять и развивать в современных условиях. Большое влияние КЧР оказала на становление феноменологии, что, по мнению Э. Гуссерля [2], могло бы стать инструментарием для систематического пересмотра всех наук. Трансцендентальная аргументация Канта превратилась в один из излюбленных приемов рассуждения и доказательства в аналитической философии [3], выступающей за ясность, точность и логическую строгость мышления.

В книге КЧР рассматривается аналитика чистого разума, его диалектика и учение о методе [4]. Использованный в книге философский язык изложения затрудняет адекватное восприятие и понимание текста, допускает различную трактовку, что потребовало дальнейшего разъяснения в работах самого автора, в трудах его последователей – представителей неокантианства, в словарях специальных терминов. Все это повлияло на практический результат использования гносеологических знаний, на формирование негативного отношения к познавательным возможностям философии в целом, на развитие позитивистского течения в методологии науки. Так, современная физика и математика не рассчитывают на помощь филосо-

фии, из которой ранее выросла вся наука [5], а основываются на эмпирических и формально-логических, опережающих философскую мысль моделях реальности.

Фундаментальные проблемы интерпретации КЧР связываются с отсутствием системности изложения материала, состоящего из нескольких слабо связанных частей, который необходимо превратить в систему знаний, объединенных одной идеей органической целостности, когда элементы целого обусловливают и предполагают друг друга [6]. Итогом совершенной И. Кантом революции было «создание абсолютно новой философии, решительно перестроившей весь имеющийся к тому времени мыслительный материал» [6]. Великий трактат КЧР – краеугольный камень философской мысли – не ограничивается только гносеологией, а является очерком всей развернутой системы знаний уровня метатеоретического (МТ) обобщения на стыке специальных системных теорий и математики. Для корректировки интерпретации известных суждений, с одной стороны, необходимо в философском тексте своеобразно расставить адекватные знаки формального языка математики и увязать их в формулы и графические формы. С другой стороны, для иллюстрации методологических положений необходимы практические реализации для демонстрации познавательной возможности разрабатываемых методов, в частности, из области географической науки и других наук о конкретной действительности.

В Кёнигсбергском университете И. Кант преподавал разные предметы: математику и логику, физику и метафизику, географию и этику. Через разнообразие дисциплин он достигал свободного интеллектуального видения и приобретал зрелое суждение о научной проблематике в целом. Чтение лекций по физической географии и страноведению, возможно, сыграло для Канта существенную роль в дальнейшем развитии его философских взглядов и убеждений [7]. Для иллюстрации своих мыслей И. Кант использовал географические и математические понятия, хотя в его работах отсутствовали собственно формулы и графические схемы. При исследовании явления физико-математической ориентации первым предметом его естественнонаучного интереса стала Земля, многообразие и происхождение ее образований и ее положение в космосе [8]. В то время уже было известно дифференциальное и интегральное исчисление И. Ньютона и Г.В. Лейбница, существовали более ранние источники мыслей Ньютона в этом направлении: «Намек на метод (метод флюксий) я получил из способа Ферма проведения касательных; применяя его к абстрактным уравнениям прямо и обратно, я сделал его общим» [9]. Однако многие математические теории и тем более естественно-научные знания, которые могли быть полезны И. Канту для иллюстрации, тогда не были открыты. Современная наука в самых различных областях исследования с вниманием и пониманием относится к его гносеологическому учению для познания напрямую эмпирически непознаваемых сущностей.

Исследовательская цель данной статьи – дать математическую и системную интерпретацию учения И. Канта примерно, как ее понимают авторы в области трансцендентальной (ТЦ) аналитики для формирования метатеории научного знания в терминах расслоения над многообразиями, принятых в дифференциальной геометрии.

2. Основные понятия. Система кантианства представляет мир процессом, осуществляющимся между активным субъектом и материальным объектом, который Кант называл миром-многообразием вещей в себе. Результат процесса – природа в качестве мира явлений, проявленной и освоенной человечеством части объектов [6]. В философских категориях этому соответствует проявление сущности объекта в (наблюдаемых) природных явлениях. В географических понятиях речь идет об объективно существующей природной среде, в местных условиях которой детерминировано формируются естественные и искусственные образования особого рода. Имеют место три компонента земного единства – система (условный субъект, множество взаимосвязанных элементов, функция нескольких переменных), ее среда

(условный объект) и метасистема природных явлений, объединяющая систему и действующую среду. В таком метасистемном соотношении трех компонентов отражается процесс не только познания, но и деятельности и всякого развития – видоизменения в инвариантно-сущностных условиях конкретной среды, что исследуется с использованием так называемого средового подхода [10]. Структура географической среды, экранированная ландшафтной, геосистемной оболочкой, напрямую непознаваемая, предельным образом проявляется в процессе развития и восстановления естественного покрова и изучается в сравнительных исследованиях. Многие географические понятия и образы широко используются в разных науках, например, представления о ландшафтном рельефе: космический ландшафт в физике, экономический ландшафт, эпигенетический ландшафт в биологии, философский ландшафт. Этим подчеркивается многовариантность проявления законов разных наук в неоднородной среде. Такое применение географических методов для изучения, описания и изображения негеографических объектов называют парагеографическим подходом – одним из направлений МТ-познания [11].

В математических терминах единство системы $y \in Y$, среды $x_0 \in X_0$ и метасистемы $x \in X$ – локальных элементов глобальных множеств Y, X_0 и X может быть представлено следующим образом: $x = x_0 + y$, $X = Y \times X_0 \to X_0$, где + – знак обобщенной суммы, × – символ прямого (декартового) произведения, → – символ отображения множества $X = Y \times X_0$ на X_0, что означает выделение системы $x \in X$ из множества систем X, находящейся в конкретной среде $x_0 \in X_0 \subset X$ и удовлетворяющей сумме $x = y + x_0$. В ячейке таблицы-матрицы $X = Y \times X_0$ находится сумма $x = y + x_0$. В рассуждениях используется дедуктивно-номологическая модель К.Г.Гемпеля – одного из лидеров логического позитивизма. В этой модели феномен x, подлежащий объяснению, называется эксплананадум, а предпосылки объяснения x_0 и y – эксплананасами (истинными положениями). Специфические антецедентные условия x_0 и универсальные законы y в сумме определяют эксплананадум $x = x_0 + y$ [12, 13, 14].

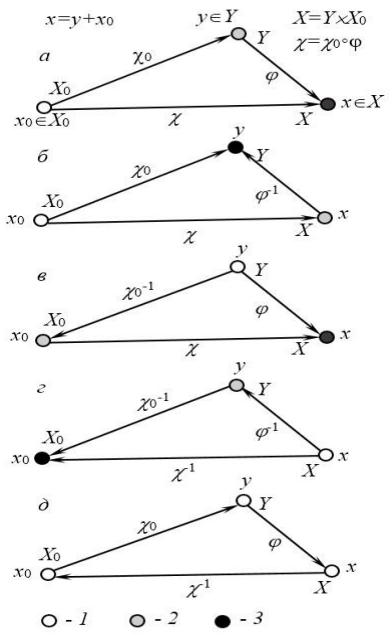


Рис.1. Коммутативные схемы трансцендентальной логики с различными вариантами *а-д* оборачивания стрелок и соотношениями позиций: *1* – тезис, *2* – антитезис, *3* – синтез (пояснения в тексте).

Система Канта синтетична, построена на синтетических актах мышления, триадичная, тройственная, трехчленная, основанная на трихотомии понятий вида: 1) условие x_0, 2) обусловленное y, 3) понятие x, что возникает из соединения, обусловленного с его условием $x = x_0 + y$ [6]. В диалектической логике Гегеля это соответствует тезису x_0, антитезису y и синтезу x категорий, связь которых графически может быть представлена схемами категориальных «инструкций» (рис.1). Схемы у Канта – «воображения», необходимые для доказательства реальности чисто рассудочных понятий, их связи с чувственным изображением. Схемы на разнообразии понятий задают порядок частей, соединяя формальные y и чистые x_0 условия чувственности x. Модель в виде ТЦ-схемы делает возможным применение категорий x_0 к явлению x, связывает их. Подобные отношения передаются трехчленным схематизмом в виде графа, вершины которого соответствуют элементам x и множествам X, а стрелки – отображениям-морфизмам $\chi: X_0 \to X$ прообраза X_0 в образ X. «Воображения» как модельные отображения – это схемы-стрелки, процедуры противопоставления и сопоставления двух противоположностей (оппозиций, вершин). Схематизм (результат схематизации,

моделирования) – собственно граф, выражающий «метод рассудка в пользовании схемами», организация понятий, объектов и явлений. ТЦ-воображение – одно из наименее проясненных понятий ТЦ-логики Канта [15]. Его особенностью, кроме дихотомии $X_0 \to X$, является наличие третьего элемента Y, опосредующего звена X_0 и X (рис. 1а), благодаря чему процедура $\chi: X_0 \to X$ раскладывается на пару последовательных процедур $\chi_0: X_0 \to Y$ и $\varphi: Y \to X$ с выполнением правила транзитивности преобразований $\chi = \chi_0 \circ \varphi$. Например, в алгебре целых чисел для того, чтобы из 5 получить 7 (5→7) необходимо к известному $x_0 = 5$ прибавить y=2: 7=5+2. Граф – это топологическая структура и организация координатных вершин триадного схематизма, где каждое понятие имеет свое место (ТЦ-топику), определяющее особенности его применения; есть признаки и правила, по которым выделяется это место для каждого понятия. Дополнением в схему новых элементов формируется сложная триангуляционная на плоскости или многомерная сеть категориального схематизма, выражающая разные диалектические идеи соотношения понятий.

В общем виде подобные отношения формализуются в математической теории категорий, где такие графы называются коммутативными диаграммами, что связывают объекты (вершины) морфизмами (преобразованиями, отображениями). В этой теории важным для формального анализа является оборачивание стрелок – симметрия преобразований, переход от отображения χ к обратному отображению χ^{-1}, благодаря чему в начальной позиции (тезиса) могут находиться разные вершины, а понятия – иметь различную топику. Надо полагать, что при оборачивании общая алгебраическая установка $x=x_0+y$ должна сохраняться. Например, для схематизма в рис. 1 будет $x=y+x_0$, т.е. при перемене мест слагаемых сумма не поменяется. Графу рис. 1б соответствует $y=x_0+x$, что означает $x_0<0$. Для графа рис. 1г будет $x_0=x+y$, т.е. $y<0$ – элемент противоположного действия. Через симметричное оборачивание стрелок с приведением схематизма к каноническому виду рис. 1а снимается неоднозначность в суждениях Канта. С другой стороны, оборачивание порождает новые отношения связи понятий. Каждое понятие может стать началом x_0 новой триады, что позволяет сформировать треугольную сетку (триангуляцию) ТЦ-исследования (формальную онтологию, карту знаний), в частности, ориентированные графы синтаксической структуры правильных предложений в лингвистике.

При обращении стрелок может получиться циклический граф (рис. 1д), выражающий свойства систем с обратной связью $x= x+x_0+y$, иными словами, $x_0+y=0$ – причин изменений нет. Так получается в географических циклах тектонического поднятия x_0 и морфологического выполаживания y рельефа, перехода из исходного в то же конечное состояние x под действием разнонаправленных сил $x_0=-y$. В этом случае эволюция и качественное развитие отсутствуют. Напротив, коммутативный граф (рис. 1а) иллюстрирует процесс направленного развития, что осуществляется за счет наличия опосредующего элемента y схематического моделирования. Коммутативность графов является аксиомой формирования схем ТЦ-воображения. Эта особенность далее проясняется через понятия дифференциальной геометрии.

Диаграммы схематизации элементов, множеств, преобразований и иных математических форм транзитивно-коммутативных связей дают возможность системно интерпретировать положения КЧР. Трансцендентальное – узловое понятие КЧР, определяет то x_0, что предшествует чувственному опыту x, в первую очередь пространство и время, и делает этот опыт через y возможным, как необходимое условие внешних и внутренних явлений: $x=x_0+y$ [16]. Все трансцендентальное $x_0 \in X_0$ имманентно нашему сознанию, a priori находится как бы у нас «в голове», не подлежит непосредственному наблюдению. ТЦ-понятие X_0 трактуется в смысле географической среды как нечто изначальное, неиспорченное, девственное и близкое

к природе. ТЦ-познание – это познание априорных условий X_0 возможного опыта $X=Y\times X_0$. Например, для создания карты X на пространственной основе X_0 размещаются условные обозначения Y – знаки легенды так, чтобы $X=Y\times X_0\rightarrow X_0$ каждой позиции на карте $x_0\in X_0$ соответствовал свой знак $y\in Y$, и $X=Y\times X_0\rightarrow Y$ каждому обозначению в легенде карты $y\in Y$ – множество однотипных знаков на карте $X(y)$, что позволяет читать карту и связанные с нею тексты.

В схематической формуле $x=x_0+y$ слагаемые – априорные экспланансы x_0 и y выступают на равных, в одинаковом смысле изначально не познаны, трансцендентальны. Топические правила и признаки их различения состоят в следующем: x_0 – инвариантная (постоянная, сохраняющаяся) характеристика внешних и внутренних условий действия; y – переменная характеристика системы, законов ее существования и изменения; x – переменная характеристика метасистемы. Пусть по двум разным наблюдениям установлены линейные зависимости $x=x_0+\varepsilon y$ и $x_1=x_0+\varepsilon y_1$, где ε – коэффициенты размерности, факторной нагрузки, или чувствительности изменения x к изменению y. Величины x, x_1, y, y_1 определяются эмпирически, откуда находится величина $x_0=(y_1x-yx_1)/(y_1-y)$, если она в обоих опытах постоянна. Например, сила $F_a=am$, действующая на падающее тело массой m с ускорением $a=F_a/m$ равна разнице силы тяжести (веса) $F_0=g_0m$ и лобового сопротивления воздуха $F=kV$: $F_a=F_0–F=am=g_0m-kV$, где k - коэффициент сопротивления, определяемого формой и размером тела; V – скорость падения тела; g_0 – ускорение свободного падения на Земле. Наблюдаемое ускорение падения равно $a=(F_0-F)/m=g_0-kV/m$. Приняв $\varepsilon=-k/m$, $x=a$, $y=V$, $x_0=g_0$, по результатами сравнительных измерений фазовых переменных a и V движения тела вычисляется постоянная фоновая величина $g_0=(aV_1-a_1V)/(V_1-V)$, которую необходимо принимать во внимание при расчете любой траектории полета. В понятиях Гемпеля, здесь проявляются специфические условия $F_0=g_0m$ (вес) и универсальные законы $F_a=am$ (инерции) и $F=kV$ (сопротивления) действия сил: $F_a=F_0 - F$ – наблюдаемые силы движения равны сумме постоянных гравитационных F_0 и переменных обратно направленных – F сил сопротивления движению.

Необходимо учитывать все оттенки трансцендентального, в первую очередь различать по Канту нѐчто выходящее за пределы опыта, обозначая 1) приход нового y в систему знаний и 2) условий x_0 возможности опыта, познания явления как феномена. Противопоставляется трансцендентальное x_0 (умопостигаемое, вещь в себе, ноумен) трансцендентному x_0, которое недоступно теоретическому познанию, поэтому становится исключительно предметом веры [15]. Причем это противопоставление исторически ограничено, поскольку трансцендентное переходит в трансцендентальное по мере развития науки, в частности, величина ускорения свободного падения g_0 объясняется гравитационным взаимодействием $g_0=\gamma M/R^2$, где γ – гравитационная постоянная, M – масса и R – радиус Земли. Коэффициент γ до сих пор является трансцендентной величиной, хотя, согласно принципу Маха, он может определяться распределением масс во Вселенной. Эта гипотеза экспериментально не проверяема, и связанные с ней вопросы пока остаются без ответа [17].

Различие феноменов x и ноуменов x_0 (понятий о вещи в себе, сути всякой вещи) имеет принципиальное значение в КЧР для объяснения возможности чистой математики и чистого естествознания y. Правило математического анализа $y=x-x_0$ имеет разные приложения, в частности, в области морали, когда, согласно Канту, моральный закон действия x не зависит от эмпирических условий x_0 (обстоятельств), а должен быть всеобщим законом y. Таким образом, человек должен стремиться к созданию и следованию системе идей $Y=\{y\}$ нравственно совершенных законов. В итоге через формулы схематизма-моделирования (рис.1) раскрывается соотношение категорий «условного» x_0, «чистого» y и «нечистого эмпирического» x, например, чистого разума, что выходит за пределы опыта x и стремится к познанию безусловного y. География по своей сути есть «не чистая», прикладная наука, познающая зем-

ную реальность x во всех тонкостях ее проявления с целью выяснения инвариантов условий $X_0=\{x_0\}$ ее априорного существования (географической среды) $x_0=x-y$. Чистое знание y представлено фундаментальными науками, наборами системных теорий: физика, экономика, экология, психология и т.д. В силу этого география как синтетическая дисциплина $x=x_0+y$ в отличие от других наук бывает разной – физическая география, экономическая география, социальная география и т.д. Она эмпирически изучает проявление законов y различных теорий в конкретной среде x_0, и сравнительно-географическими методами познает саму среду как условия действия законов. В физике такие поправочные условия X_0 называются калибровочными полями, космическими ландшафтами.

Таким образом, метатеория организации знаний решает несколько задач анализа и синтеза: 1) выделение априорного рассудочного знания $x_0=x-y$; 2) выявление ТЦ-идей чистого разума $y=x-x_0$, свободных от средового наполнения x_0; 3) характеризация явлений x через синтез $x=x_0+y$ условий x_0 и законов y. Задача (1) решается средствами феноменологии методом ТЦ-эстетики, ТЦ-аргументации и ТЦ-индукции. Метод ТЦ-аргументации нацеливает исследователя на выявление и использование лежащих в основании феномена x предельных условий x_0 его существования (кантовских ТЦ-условий). Задача (2) разрешается методами ТЦ-аналитики изложения чистых рассудочных знаний и принципов, без которых нельзя мыслить предмет. Она занята рассмотрением проблемы внесения категориальных связей в картину реального природного мира [6]. Для решения задачи (3) используются ТЦ-дедукция (ключевой раздел КЧР), чтобы обосновать правомерность априорного применения категорий x_0 (элементарных понятий чистого рассудка) и их проявлений в законах y к наблюдаемым объектам и показать возможность их использования в качестве принципов априорного синтетического познания (объяснения). Возникает фундаментальная триада КЧР, где тезис – эстетика (1), антитезис – аналитика (2), синтез – диалектика (3), что соответствует триаде свойств чувственности, рассудка и разума в их системных связях [6]. В совокупности эти три методологических направления образуют ТЦ-логику философии схематизма исследования априорного знания (металогического анализа, диалектической логики) – содержательного раздела метатеории.

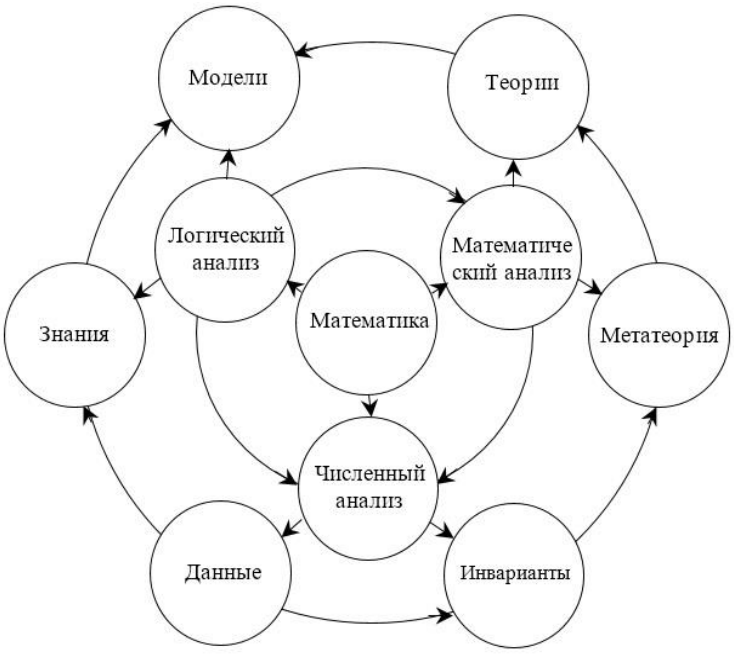


Рис. 2. Коммутативная схема связи метауровней научной информации, организованных вокруг математического знания процедурами математического, численного статистического и (методо)логического анализа. Показано место метатеории в системе научных знаний.

Различаются три МТ- аналитических метода: численный, в том числе статистический анализ, (методо)логический анализ и математический анализ, применяемые в совокупности согласно коммутативной сети (триангуляции) уровней научной информации, организованной вокруг математического знания (рис. 2). Выделяются блоки данных о наблюдаемых объектах, процессах и явлениях, знания о понятиях (концептах, категориях), модели связи понятий, теории формирования системных моделей, метатеория создания теорий и метанаука-математика. Каждый метаинформационный уровень по-разному проявляется на предыдущих уровнях. Так появляются математические модели, статистические данные, математические теории, поместив которые в центр круговой схемы, видим все коррелирующие возможности методов исследования. Познание на МТ-уровне обеспечивается математическим, логическим и статистическим анализом [18]. (Мета)логический философский подход обеспечивается ТЦ-методологией, особенности которой раскрываются средствами математического анализа и используются в разработке методов статистического анализа данных наблюдений.

3. Математический анализ. Основу математического анализа свойств природных и искусственных объектов составляют процедуры расслоения на (над) многообразиях в дифференциальной геометрии, так или иначе проистекающих из представления о касательных прямых и плоскостях к линиям и поверхностям, сформированным в пространстве признаков объектов и явлений. Рассматривается пространство R^n дифференциальных признаков независимых координат $R=\{R_i\}$, $i=1,2,3,\ldots,n$, в которой каждая точка $x\in R$ позиционируется набором значений координат $x=(x_i)$ или радиус-вектором $\boldsymbol{x}=(x_i)$ с началом в начале координат $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ (рис. 3). Вектор – это отрезок направленной линии (стрелки), имеющий начало и конец (вершину), связывающий эти позиции в систему типа ориентированного графа (см. рис.1). Отдельные примеры использования векторного исчисления для представлений знаний ТЦ-философии приведены С.Л. Катречко [19].

Прослеживается многозначность понимания координат как качественной характеристики (шкалы) признаков разного i типа $R=\{R_i\}$, как количественных значений признаков $x=(x_i)\in R$ на этих шкалах и как векторов положения $\boldsymbol{x}=\{x_i\}$ и направления $\boldsymbol{a}=\{a_i\}$ их изменения по мере движения. Все эти величины взаимосвязаны, соответствуют разному содержанию и в приложениях имеют различные аналитические возможности. Отдельные измерения (впечатления) $x=(x_i)\to R$ сводятся $x_i\to R_i$ к общим представлениям о свойствах объекта $R=\{R_i\}$, и так вырабатываются простейшие и основные понятия (категории), непосредственно не вытекающие из наблюдения, а являющиеся «продуктивной силой воображения». Шкалы переменных значений обобщаются до категорий R_i – понятий ТЦ-философии или других системных теорий (метаданных, элементарных знаний). Область определения каждой шкалы подразделяется на градации значений величин x_0, границы между которыми задаются дискретными константами – квантовыми значениями $R_{N1}=N_{\underline{1}}\Delta R_1$ (см. рис. 2). В Боровской модели атома водорода постулируется, что электроны массой m в атоме могут двигаться со скоростью v только по стационарным орбитам радиуса r, для которых момент количества движения $K=mvr$ электрона равен целому числу N постоянных Планка $\hbar$: $mvr=N\hbar$, где $N=0,1,2,3\ldots$ Здесь шкала R задается размерностью K, значение x_i – положением на орбите относительно некоторой ее начальной точки, а также радиус-вектором положения $\boldsymbol{x}$ с началом в центре орбиты. Дискретные выделенные на орбите положения K_N соответствуют квантованным значениям x_0 (числам): $N=K_N/\hbar$. Общая формула дискретного членения шкал $R_{N1}=N_{\underline{1}}\Delta R_1$ с шагом (мерой) ΔR_1 в модели Н. Бора выражается равенством $K_N=N\hbar$, где мерой $\Delta R_i=\hbar$ дискретности становится постоянная Планка, характеризующая параметры перехода электрона с одной орбиты на другую. Каждое явление кодируется набором квантовых чисел $N_{\underline{i}}=0,1,2,3\ldots$, как химические элементы в периодической таблице Д.И.Менделеева. В класси-

фикациях для различения объектов в качестве критериев используют информативные категории сравнительной оценки – градации признаков-меронов. Типы объектов разного качества кодируются набором таких категорий. Положение химических элементов в таблице описывается его электронной конфигурацией, например, кислород O: $1s^2 2s^2 2p^4$, где цифры – квантовые числа n, буквы – числа l, верхние индексы зависят от дополнительного кода (m, σ). Таким образом, в науке категории трактуются как явления определенного рода (шкала признаков), градации (меры) признаков по данной шкале и связанные с ними квантовые числа, определяющие положение объектов в классификации. Так разными способами задается пространство величин, в котором определяется положение и ориентировка векторов $\boldsymbol{x}$ и функции (типы) связи $F(\boldsymbol{x})$ этих величин.

Необходимо проинтерпретировать эти понятия и отношения в терминах МЦ-философии. Множество значений величин $x=(x_i)$ соответствуют измерению и оценке имманентного свойства – действию рассудка, в результате которого осуществляется синтез многообразия чувственно-наглядных представлений $x \in X$ в форме атрибутов базы данных, соответствующих категориям $R=\{R_i\}$ – координатам пространства представления данных, что позволяет сводить многообразие созерцаний в единое, обобщенное представление $F(x)$ – систему связей переменных x. Так рассудок может мыслить a priori синтетическое единство апперцепции многообразия чувственно-наглядных представлений $F(x)$ как условие $F(x_0)$, которому должны быть необходимо подчинены все объекты человеческого наглядного представления x. Апперцепция – это процесс, в результате которого элементы сознания становятся ясными и отчетливыми, могут быть строго сформулированы, в том числе в математической форме. Данное свойство выражается в том, что человек через категориальный строй (значения координат x) воспринимает и понимает объекты и явления в тесной взаимосвязи $F(x)$ друг с другом x с учетом зависимости от прошлого опыта, накопленных знаний, культуры и особенностей геоисторического наследия $F(x_0)$.

Категории – чистые формы мысли – приобретают объективную реальность, имеют a priori наглядные представления лишь в применении к объектам. Синтез многообразия чувственно-наглядных представлений $F(x_0)$, возможный и необходимый a priori, Кант называет "фигурным", в отличии от "рассудочного", который мыслится в одних лишь категориях в отношении многообразия наглядных представлений $F(x)$. Фигурный синтез $F(x_0)$, относящийся только к первоначально-синтетическому единству апперцепции (т.е. единству, мыслимому в категориях) Кант называет трансцендентальным синтезом способности воображения $F(x) \to F(x_0)$. Воображение, по Канту, есть способность наглядно представлять объект без его присутствия $X \to x$, $F(x_0) \to F(x)$, т.е. как МТ-модель. Существует, по Канту, нечто третье $\Delta x = x - x_0$ – опосредствующее представление, в одном отношении однородное с категориями x_0, а в другом – с явлениями x. Категории x_0 не содержат в себе ничего эмпирического, чистое, интеллектуальное, инвариантное, базовое сознание. Категория $\Delta x = x - x_0$ включает и категориально базовое x_0, и чувственное x. Отношения $x \to x_0$ и $F(x) \to F(x_0)$ Кант называет схемой, а x_0 и $F(x_0)$ – формальными и чистыми условиями чувственности.

Согласно схеме на рис.3 устанавливаются векторные связи

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_0 + \Delta \boldsymbol{x},\ F(\boldsymbol{x}) = F(\boldsymbol{x}_0) + \Delta F(\boldsymbol{x}), \qquad (1)$$

где компоненты вектора $\boldsymbol{x}_0 = (x_{0i})$ соответствуют дискретным категориям $x_{0i} = N_{ij} \Delta x_{0i}$, в частности, $R_1 = N_1 \Delta R_1$. Соотношения (1) проясняют категориальную структуру предметов возможного опыта $\boldsymbol{x}$ (см. рис.1), что одновременно идентифицируется условиями объективности опыта $\boldsymbol{x}_0$ и некоторым дополнением $\Delta \boldsymbol{x}$, связанным с принципами априорного синтетического познания. Движением векторов $\boldsymbol{x}$ в пространстве R^n вырисовываются линии и поверхности, соответствующие функциям $F(x)$.

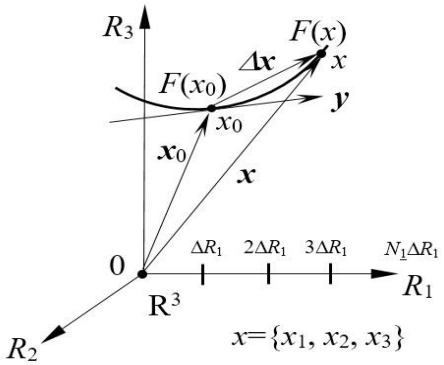


Рис. 3. Формирование касательного векторного поля ***y*** над многообразием линии $F(\boldsymbol{x})$, вычерчиваемой вектором $\boldsymbol{x}=\{x_1,x_2, x_2\}$ в пространстве прямоугольных координатах $R^3=\{R_1,R_2,R_2\}$ (пояснения в тексте).

Направление движения вектора ***x*** задается разностью векторов начального x_0 и конечного x положения: $\Delta\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_0$. В каждой точке $x_0=(x_{0i})$ определяется касательная линия или плоскость (слои), соответствующие уравнению

$$F(x)=F(x_0)+\sum_{i=1}^{n}a_i(x_i-x_{0i})=F(x_0)+\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial F}{\partial x_i}(x_i-x_{0i}),\ a_i=\frac{\partial F}{\partial x_i}, \qquad (2)$$

где $a=(a_i)$ – переменные компоненты ковектора $\boldsymbol{a}=(a_i)$ градиента функции поверхности $F(x)$, определяющие условный вес (цену) признаков $x=\{x_i\}$ или направление вектора перепада, например, высот рельефа, по которым происходит перемещение обломочного материала горных пород и водный сток. Уравнение (2) преобразуется в уравнение функции $f(y)=F(x)-F_0$, $F_0=F(x_0)$ в локальных координатах $y_i=x_i-x_{0i}$ – универсальное уравнение [20]:

$$f(y)=\sum_{i=1}^{n}a_iy_i=\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial f}{\partial y_i}y_i,\ a_i=\frac{\partial f}{\partial y_i},\ f(y)=F(x)-F(x_0). \qquad (3)$$

Это уравнение задает величину $y=\{y_i\}$ и направление $a=\{a_i\}$ касательного вектора ***y.*** При $\Delta\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_0\to 0$ вектор $\Delta\boldsymbol{x}$ приближается к касательному вектору ***y***, когда $\boldsymbol{y}=\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_0$. Здесь осуществляется естественный переход от представления о поверхности к понятию «многообразие» – локально-линейному пространству, т.е. поверхности (рельефу), когда условие $\boldsymbol{y}=\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_0$ выполняется не только в предельном случае $\boldsymbol{y}\to 0$, но в достаточно широкой области $\boldsymbol{y}=\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_0$. Условие предела $\boldsymbol{y}\to 0$ соответствует положению точки касания $x=x_0$. Функция $F(x)$ в локальной области $\boldsymbol{y}=\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_0$ описывается уравнением (3) – функцией $F(x)= f(y)+F_0$. Огибающая $F(x_0)$ поля касательных векторов $\boldsymbol{y}(x_0)$ воспроизводит функцию рельефа $F(x)$, локально определенной функцией $f(y)$ универсального закона (3) – однородной функцией первого порядка $tf(y)=f(ty)$, зависящей от масштаба t переменных y (функцией Эйлера). Подобные свойства многообразий локально (в слое $\boldsymbol{y}(x_0)$) приводят наблюдаемые неизвестные зависимости к универсальному виду, когда связи $f(y)$ переменных y описываются одним и тем же дифференциальным уравнением (3), в силу чего все слои эквивалентны (тождественны). Отметим, что функция $f(y)$ в разных слоях – это не одна и та же по виду функция многих переменных y с разными коэффициентами, а огромное множество однородных функций графически разной формы, так что уравнение (3) в данном смысле обосновывает скрытую идею тождества противоположностей. Функция $f(y)$ в разных видах символизирует надстройку (архитектонику по Канту) в виде структуры и функции слоя, формирующейся над инвариантом слоя – точкой касания x_0 многообразия $X_0\sim F(x)$.

Это универсальное качество позволяет трактовать $f(y)$ как чистое знание некоторой предметной области, а соотношения (1) переписать в виде аксиоматических принципов, порождающих универсальное уравнения (3):

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}_0 + \boldsymbol{y},\ F(\boldsymbol{x}) = F(\boldsymbol{x}_0) + f(\boldsymbol{y}). \quad (4)$$

Результаты векторного анализа и принятие гипотезы существования многообразий согласно (4) позволяют представить наблюдаемые явления $\boldsymbol{x}$ и их связи $F(\boldsymbol{x})$ как сумму категорий условий среды $\boldsymbol{x}_0$ и $F(\boldsymbol{x}_0)$ (ТЦ-аргументов), принадлежащих многообразию сред $F(\boldsymbol{x})= F(\boldsymbol{x}_0)$ и функции $f(\boldsymbol{y})$ касательного в позиции $\boldsymbol{x}_0$ слоя (чистого знания).

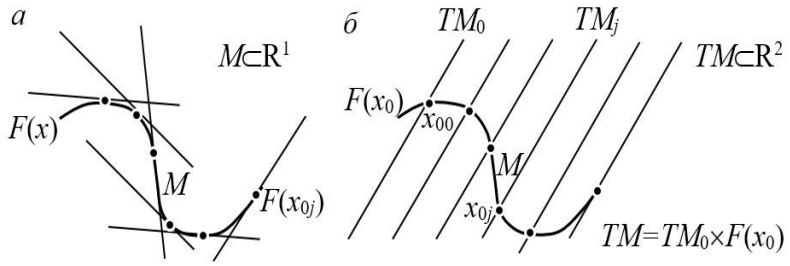


Рис. 4. Плоская кривая многообразия, заданного функцией $F(x)$, и касательные линии к ней в точках x_{0j} – расслоение пространства плоскости R^2 (*а*). Связанная с этим расслоением линейчатая поверхность расслоенного пространства $TM=\{TM_j\}$, образованная движением типового слоя-линии TM_0 по точкам x_{0j} многообразия (*б*).

Гладкие многообразия $M\sim F(\boldsymbol{x})$ являются базой касательных расслоений $\pi:R\rightarrow M$ с формированием над точками $x_{0j}=(x_{0ij})$, $x_{0j}\in M\in R^1$ расслоенного пространства $TM=\{TM_j\}\subset R^2$, состоящего из касательных плоскостей TM_j, среди которых выделяется типовой слой TM_0 сравнения (рис. 4), скольжение которого $TM_0\rightarrow TM_j$ от точки к точке $x_{0j}= x_{00}+N_j\Delta x_0$ по линии $F(\boldsymbol{x})$ порождает линейчатую поверхность $TM=TM_0\times F(x_0)$ (рис. 4б). Размерность расслоенного пространства TM из n координат $x=(x_i)$ (i=1,2,..,n) равна удвоенной размерности пространства многообразия M с увеличенной степенью свободы $2n$: $TM=TM_0\times M$. Наглядным примером расслоения являются чешуя рыбы TM на ее теле M, волосы или иглы животных, листья деревьев TM, прилепленные к точкам x_{0j} на ветвях M, доски забора $TM =TM_0\times F(x_0)$ по контуру участка $F(\boldsymbol{x})$, транспортные маршруты $TM =\{TM_j\}$от пассажирских и грузовых терминалов M и др. Множества слоев расслоения выполняют и действующую, и охранную функцию относительно многообразия связи МЦ-аргументов (значений категорий).

Расслоение-произведение $TM_0\times M\rightarrow M$ на многообразии M выделяет множество слоев $TM=\{TM_j\}\subset X$, касательных в точках $x_{0j}\in M$. Поскольку точка x_{0j} принадлежит также конкретному слою $x_{0j}\in TM_j$, она индивидуализирует этот слой и формирует систему локальных координат $y=\{y_i\}$ создания функции $f(y)$ согласно универсальному уравнению (3). Хотя функция $f(y)$ является универсальной, каждое ее проявление в конкретном слое обусловлено точкой касания слоем многообразия: $f(y)= f(x_{0j},y)=F(x)-F(x_{0j})$. Декартово произведение $TM_0\times M$ формально означает приложение сходных законов TM_0 к многообразию M различных ситуаций x_{0j}. В силу этого существует отображение слоев $TM_j\rightarrow TM_k$, позволяющих заменять слой на слой, перемещать слои $x_{0j}\rightarrow x_{0k}$ по многообразию M, функционально связывать разные слои $TM_j\leftrightarrow TM_k$ в последовательности линейных комплексов, начиная с типового слоя $TM_0\leftrightarrow TM_1$ (см. рис. 4б). Этим обеспечивается системная интеграция слоев, проведение их сравнительного анализа, когда элементы целого обусловливают и предполагают друг друга. Все слои разные, но по универсальной сути все они одно и то же – имеет место наглядное тождество противоположностей.

4. Статистический анализ. Отдельные примеры векторных представлений знаний (см. рис. 1-3) в физике приведены выше. В целом теория ТЦ-аргументации может быть использована при анализе широкого спектра процессов и явлений в природе и обществе. В частности, каждый вид животного, растения или сообщества по-разному проявляет себя в разных усло-

виях географической среды. Функции реакции (отклика) на факторное влияние в философской трактовке соответствуют связи причины x и следствия $F(x)$. Факторная зависимость обычно имеет колоколообразную форму с оптимумом $F(x_m)$ максимального влияния на процессы в сочетанном воздействии модальных значений факторов x_m. Все функции $F(x_m, x)$ и связанные с ними представляют своеобразные модусы в смысле Спинозы – меры, образы, способы, виды существования или действия. Хорошей аппроксимацией функции реакции $F(x)$ является функция кривой логарифмически нормального распределения с переменными $x_i=\ln z_i$ действия факторов z_i [21]:

$$f(y)=f_0(x_m)+a(y)y,\ f(y)=\ln F(x)-\ln F(x_m),\ y=x-x_m,\ a(y)y=-\alpha y^2=-\alpha(x-x_m)^2. \qquad (5)$$

Это уравнение для одной переменной y, например высоты местоположения, соответствует (3) при $a(y)=-\alpha y$ (α – константа). Функция $f_0(x_m)$ ТЦ-аргументации имеет смысл поправочного слагаемого, определяющего влияние экологических свойств экосистем x_m на факторную зависимость с учетом смещения $y=x-x_m$ (рис. 5). По (5) выявляется вид функции многообразия $f_0(x)$ – огибающей кривой факторного влияния $f(y)=f(x_m, y)$ с разными модальными положениями x_m максимумов (оптимумов). Огибающая кривая $f_0(x)$ должна иметь в точке касания $x=x_0=x_m+y_m$ одинаковое значение с $f(y)=f(y_m)$ и общую в этой точке касательную с $f(x_m, y)$ [22]:

$$f(y)=f_0(x_m)-\alpha y^2,\ df_0(x_m)/dx_m-d(\alpha y^2)/dy\cdot dy/dx_0=df_0(x_m)/dx_m+2\alpha y=0.$$

В случае линейной зависимости $f_0(x_m)=C-\beta x_m$ получаем $y_m=\beta/2\alpha$, или $x_m=x-\beta/2\alpha$, откуда $f_0(x)=f(y)=f_0(x-\beta/2\alpha)-\alpha\beta^2/4\alpha^2 = C-\beta x+\beta^2/2\alpha-\beta^2/4\alpha$. Точка касания x_0 огибающей $f_0(x)$ смещена $x_0 = x_m+y_m$ на величину y_m относительно положения максимума x_m (см. рис. 5). Величина смещения $y_m=\beta/2\alpha$ - константа, поэтому положение максимума зависит от положения точки касания: $x_m= x_0 -y_m$.

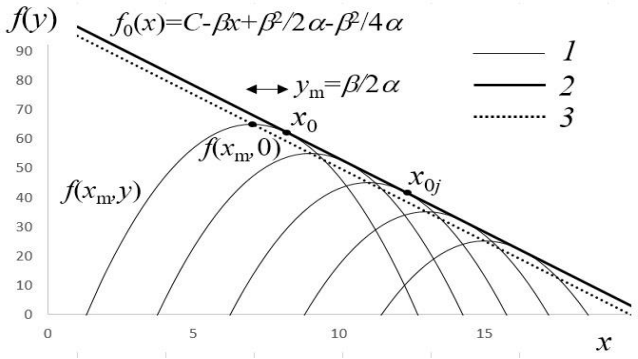


Рис. 5. Изменение формы экологической ниши (*1*) в показателях продуктивности $f(y)= f(x_m, y)$ ($y=x-x_m$) по фактору высоты местоположения x (градиент 100 м) объектов в ландшафте. Показана линия $f_0(x)$ (*2*), огибающая кривые продуктивности в точках касания x_0, и линия ТЦ-аргументации (*3*), проходящая через максимумы кривых $f(x_m, 0)$.

Формула $f_0(x)$ в данном случае определяется особенностями рельефа ландшафта и ограничивает величину оптимальной реакции $f(x_m,0)$ (продуктивности, встречаемости) объектов на факторное воздействие, т.е. являются ТЦ-аргументом проявления свойств объектов, известных из опыта. Таким образом, существуют методы математического анализа, позволяющие выделить по множеству функций $f(x_m,y)=C-\beta x_m-\alpha y^2$ с разными параметрами x_m функцию аргументов $f_0(x)=f_0(x_0)$, ограничивающую положение экстремальных значений всех $f(y)$ (рис. 5). Обратим внимание, что похожие кривые $f(y)$ при совмещении модальных значений $x=x_m$ пропорциональны, функционально зависимы, образую гомотопический ряд по x_0 – комплекс связей зависимостей $f(x_m,y)$ между собой, как это отмечалось при общем сравнении слоев расслоения на многообразиях. Огибающая $f_0(x)$ определяет степень проявления закона $f(y)$ в соответствующих условиях x_0 (рис. 5).

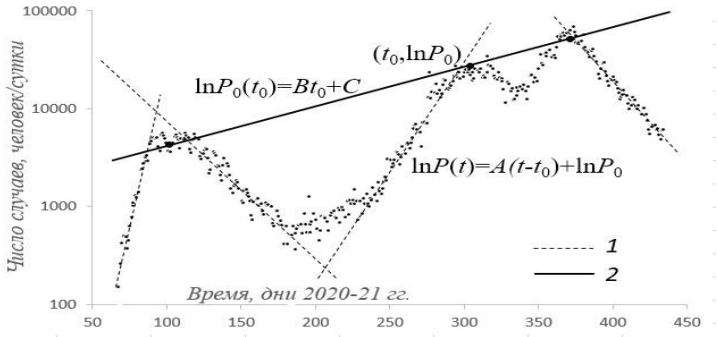


Рис. 6. Суточное приращение установленных случаев $P(t)$ заражения населения коронавирусом Covid-19 в Великобритании в 2020-21 гг. (точки – исходные данные статистики). Показаны линии тенденций изменения локальных $\ln P(t)$ (*1*) и априорных $\ln P_0(t_0)$ (*2*) значений в разных фазах пандемии.

В других исследованиях постоянно возникает неопределенность в трактовке наблюдаемых данных с помощью математических моделей. Например, при прогнозировании динамики во времени $x{\sim}t$ установленных за сутки случаев $P(t)$ заражения новым коронавирусом Covid-19 сталкиваемся с необходимостью априорного знания ожидаемого суммарного числа заразившихся и временного положения $x_0{\sim}t_0$ пика $F(x_0){\sim}\ln P_0=\ln P(t_0)$ суточного прироста численности $P(t)$ заразившихся $F(x){\sim}\ln P(t)$ [23]. Для графической линеаризации зависимостей используется полулогарифмическое масштабирование данных. На рис. 5 показано линейное приближение $\ln P(t)=A(t-t_0)+\ln P_0$ значений $P(t)$ первой, второй и третьей волны пандемии 2020-21 гг. в Великобритании. Точки $(t_0,\ln P_0)$ на линии ТЦ-аргументации $\ln P_0(t_0)=Bt_0+C$ соответствуют положению максимума функции $\ln P(t)$.

Приведенные примеры показывают, что знание скрытых априорных параметров «вещи в себе» (с нулевыми индексами типа $P_0(t_0)$) обеспечивает точность объяснения и прогнозирования процессов и явлений, делает анализ и прогноз более конкретными.

5. Теоретическое знание. В модельной схеме рис.1а ТЦ-аналитика – это расчленение (расслоение) всего многообразия априорного знания на начала чистого рассудочного знания, состоящего из многообразия понятий X_0 и основоположений Y, без которых невозможно мыслить познаваемый объект X. В статистическом анализе $Y=X-X_0$ соответствует соотношениям (3) и (4) $\boldsymbol{y}=\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}_0$, $f(\boldsymbol{y})=F(\boldsymbol{x})-F(\boldsymbol{x}_0)$. В логико-философском смысле познавательного процесса позиция X_0 трактуется как система атрибутивных координат-понятий $\boldsymbol{x}$ и модальностей $\boldsymbol{x}_0$, связанных с положением начала координат – условий $\boldsymbol{x}_0$ действия законов $f(\boldsymbol{y})$ чистого разума Y в локальных координатах $\boldsymbol{y}$. Без такого позиционирования невозможно сквозное познание реальности X, объекты которой координируются наборами изменчивых значений x. Вычленение априорной структуры рассудка X_0 и разума Y позволяет ответить на вопрос о возможности естествознания как науки о действительности $X=X_0+Y$. Естествознание, по Канту, оказывается возможным потому, что в его основе лежат априорные понятия X_0, а также правила их соединения в суждения Y, обусловливающие всеобщий характер научных истин, и их применения к явлениям X [15].

Система Y формируется как очищенное от условностей X_0 теоретическое знание, основанное на полисистемном расслоении базовых понятий и законов по принципам МТ-подхода, особенностью которого становятся геометрические методы расслоения над многообразиями. В этом они отличаются от геометрического метода философии [24] аксиоматического изложения философских идей Декарта и Спинозы по образцу геометрии Евклида с установлением необходимых определений и аксиом и доказательством теорем. Метатеория регламентирует правила создания системных теорий (см. рис 2). Это позволяет построить рациональную концепцию происхождения новой теории, являющейся следствием предыду-

щей через радикальную переинтерпретацию знаний как процедуру, способную привносить новизну в науку [25].

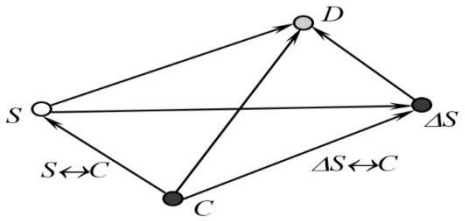


Рис. 7. Коммутативная схема модели тетраэдра трансцендентальной логики, представляющая универсальные законы (6) – соотношения понятий общей теории систем.

Многообразие знаний M расслаивается $TM=\{TM_j\}$ на отдельные системные теории TM_j с выделением типового слоя TM_0, специальная интерпретация понятий которого $TM_0 \to TM_j$ порождает новую теорию TM_j. Точка касания TM_j многообразия M соответствует инварианту теории и началу координат формирования понятийного пространства, организации понятий в аксиомы по принципам векторной логики и алгебры (см. рис. 1). Триадная схема дополняется четвертым элементом, образуя тетраэдр (рис. 7). Через векторное соотношение понятий организуются аксиоматическая база типовой системной теории – общей теории систем в специальной формулировке [26]:

$$\forall S_i\ \forall \Delta S_i\ \forall D_i : 1)\ S \equiv C,\ 2)\ \Delta S \equiv C,\ \ 3)\ \Delta S_i \equiv D_i. \qquad (6)$$

В содержательном смысле эти аксиомы отражают положения систематической философии, имеют онтологический статус. Первая аксиома $S \equiv C$ постулирует существование C мира (объединения, универсума) S разнообразных систем S_i. Вторая аксиома $\Delta S \equiv C$ утверждает о существовании универсума ΔS всех изменений систем ΔS_i (развития мира). Третья аксиома $\Delta S_i \equiv D_i$ связывает всякое изменение ΔS_i с некоторым действием D_i (борьбой противоположностей). Эта аксиома – аналог уравнения (3), где $f(\boldsymbol{y})$ – изменение (мера, метрика), а в правой части стоит оператор дифференцирования (действия). Универсум S задает координаты представления систем разного рода с началом координат в инвариантной позиции C, а ΔS – ограничения (пределы) существования и возможностей таких систем, например, универсального постоянства и ограниченности скорости света в локальных координатах в физике. Аксиомы (6) отражают онтологическую позицию диалектического реализма (материализма): Мир объективно существует, изменяется, и всякое изменение есть результат борьбы противоположностей. Они имеют прямое отношение к метафизике, понимаемой как всеобщее, синтетически-априорное знание Y рациональной или теоретической философии.

Придание аксиомам (6) иного систематического смысла порождает новые аксиоматические системы. Они имею всеобщий статус типа «категорического императива» Канта – безусловного и всеобщего долженствования в специальной предметной области знания. Категорический императив – центральное понятие практической философии Канта выражает существо «чистых» моральных законов $Y=X-X_0$ безусловного исполнения в отличие от гипотетических императивов X, обусловленных обстоятельствами X_0. Все эти законы отражают различные стороны человеческой свободы деятельности как высшей ценности и цели развития [26].

Помимо социально-деятельностной интерпретации возможно большое количество других системных трактовок общей теории систем в формулировке (6), из которых наибольший интерес представляет диалектическая логика единства, тождества и опосредования противоположностей. В логической трактовке все суждения S_i объединяются в универсальное высказывание о мире S, все новые суждения – в универсальные высказывания об изменении мира ΔS, включая новые знания. В первой и второй аксиомах (6) утверждается, что универсальные

высказывания истинны (тождественны C), т.е. отражают реальное существование и изменение мироздания. Истина – логический инвариант, сохраняющийся при разного рода логических преобразованиях высказываний.

Третья аксиома $\Delta S_i \equiv D_i$ (6) в терминах логического мышления выражает диалектический закон отрицания отрицания, в соответствие с которым всякое новое суждение ΔS_i является результатом опосредования $D_i(S_i, S_j)$ двух противоположностей S_i и S_j (слоев). Это выражается в форме правила (модуса) вывода: если $S_i \leftrightarrow C$ и $S_j \leftrightarrow C$ – одновременно истинны, и ΔS_i является опосредованием S_i и S_j, следует одновременно и из $S_i \rightarrow \Delta S_i$ и из $S_j \rightarrow \Delta S_i$, то тогда ΔS_i также истинно ($\Delta S_i \leftrightarrow C$). Это правило справедливо и для тех случаев, когда S_i и S_j являются полными противоположностями ($S_i \rightarrow S_j$). Тогда доказательство идет по диалектической схеме «тезис S_i – антитезис S_j – синтез ΔS_i», как на рис. 1а, где $X=X_0+Y$. Стрелка соответствует операции отрицания $X_0 \rightarrow Y$, $X_0 \rightarrow X$), а схождение стрелок – опосредованию ($X_0 \rightarrow X$, $Y \rightarrow X$): сумме, синтезу. Допускается оборачивание стрелок с сохранением коммутативного порядка, потому $X_0 \rightarrow Y$ эквивалентно $X_0 \leftrightarrow Y$: операция отрицания симметрична.

С.Л. Катречко [27], формализуя ТЦ-аргументацию Канта по объяснительной схеме К. Гемпеля, не учитывает логико-алгебраическую операцию опосредования: если X – истинно и X_0 есть необходимое условие X ($X_0 \rightarrow X$, X_0 - неопытная «гипотеза»), следовательно, X_0 – истинно. Такая формулировка однонаправленного следствия соответствует формально-логическому (недиалектическому) выводу. Схема К. Гемпеля в данных отношениях терминов моделируется графом на рис. 1г и выражается так: если $X \leftrightarrow C$ и $Y \leftrightarrow C$ и $X \rightarrow X_0$ и $Y \rightarrow X_0$, то $X_0 \leftrightarrow C$, что алгебраически выражается разницей $X_0 = X - Y$. Это, в частности, означает, что по достоверным данным $X \leftrightarrow C$, зная объективные законы $Y \leftrightarrow C$ жизни природы и общества, всегда можно восстановить действующие условия географической среды $X_0 \leftrightarrow C$. Так формулируется обратная задачи моделирования; прямая задача состоит в синтезе априорных знаний по Гемпелю: $X=Y+X_0$ (см. рис 1в). Обратим внимание, что в формулировке правил вывода в схеме рис. 1 появляется 4-й элемент (см. рис. 6), соответствующий логическому инварианту – истине. Добавляя в систему категорий по правилам вывода (аргументации) новые элементы, получаем разветвлённую логическую триангуляционную сеть доказательств, применимую при решении системных задач разных теорий независимых предметных областей исследования. Диалектическая логика тождества и опосредования противоположностей (слоев) едина для всех теорий, процедур моделирования и статистической обработки информации, а также математики, где она проявляется в виде формальных алгебраических операций и отношений.

Заключение. Проведен метатеоретический (МТ) анализ положений философии Канта для решения различных проблем научных теоретических и эмпирических исследований. Предлагается математическая интерпретация системы Канта как единого целого, позволяющая представить трансцендентальные (ТЦ) категориальные понятия и основоположения средствами ТЦ-логики с реальными диалектическими противоречиями и опосредованиями. Методы МТ-анализа разрабатываются на основе базового математического аппарата алгебры и геометрии по принципам расслоения пространства на многообразиях. В таком случае средства МТ-анализа формируется независимо от философских и логических представлений, которые могут быть иллюстрациями МТ-знания. Методы МТ-анализа подразделяются на три группы: логико-философского, численного статистического и математического. Кант предвосхитил многие МТ-идеи, и сейчас им требуется придать точную математический формулировку и системное содержание.

Наблюдаемая реальность X описывается в категориально-координатном пространстве. Многообразие в этом пространстве соответствует априорному знанию X_0. Касательное рас-

слоение пространства на многообразии дает множество слоев Y, локально отображающих свойства многообразий так, что $Y=X-X_0$ – чистое абсолютное знание, исключающее относительность познания реальности X. В первую очередь решается главная задача ТЦ-дедукции, что многообразия связи координатных категорий составляют необходимые условия X_0 возможности вещей X ($X_0 \rightarrow X$). Но эти условия недостаточные, поскольку полнота суждений подразумевает еще наличие чистого знания $Y \rightarrow X$: $X=X_0+Y$. Математическое моделирование операций ТЦ-аналитики в терминах векторной логики (алгебры) позволяет использовать в дальнейшем весь арсенал дифференциальной геометрии и топологии для МТ-анализа и ТЦ-синтеза. Важным моментом становится сравнительный анализ структуры слоев как противоположностей, например, при индукции теорий через терминологическую интерпретацию общей теории систем как выражения положений систематической философии.

На МТ-уровне познания осуществляется естественное совмещение философских, математических и статистических методов научных исследований. Появляется возможность математической дешифровки философских текстов, когда использование формальных соотношений вносит ясность в расшифровку предложений Канта, сопоставляя каждому понятию ТЦ-учения термин из математического анализа. Здесь, наверное, пока не обеспечивается однозначность трактовки философских категорий через абстрактные термины, но совместная работа философов, математиков, географов и представителей других наук даст в дальнейшем возможность строго согласовывать разноуровневые понятия и связи для взаимного обогащения методологии различных предметных областей знаний и создания единого поля метатеоретических исследований.

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств государственного задания (№ госрегистрации темы: АААА-А21-121012190056-4).

Список источников

1. Левин М. Р. Универсум науки. Архитектонические идеи науки, отраслей и частей научного знания в философии Канта / М.Р.Левин // Кантовский сборник, 2020. – Т. 3. – № 2. – С. 26-45.
2. Гуссерль Э. Феноменология. Статья в Британской энциклопедии / Э. Гуссерль // Логос, 1991. – № 1. – С.12-21.
3. Hanna R. Kant and the foundations of analytic philosophy. Oxford, Oxford University Press, 2001, 312 p.
4. Кант И. Критика чистого разума / И. Кант. – М.: Наука, 1999. – 655 с.
5. Вайнберг С. Мечты об окончательной теории: физика в поисках самых фундаментальных законов природы / С.Вайнберг. – М.: Из-во ЛКИ, 2008. – 256 с.
6. Калинников Л.А. Системность КЧР и система Канта (I) / Л.А. Калинников // Кантовский сборник, 2015. – № 3 (53). – С. 7-21.
7. Штарк В. Физическая география в Кёнигсбергском университете: Карл Генрих Раппольт и Иммануил Кант / В. Штарк // Кантовский сборник. Межвузовский тематический сборник научных трудов. – Выс.26. – Калининград: Из-во Российского гос. ун-тета им. И.Канта, 2006. – С. 203-220.
8. Кассирер Э. Жизнь и учение Канта / Э. Кассирер. – Санкт-Петербург: Центр гуманитарных инициатив, 2013. – 448 с.
9. Вавилов С.И. Исаак Ньютон / С.И. Вавилов. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1945. – Гл.13. – 2-е изд. – С.171-184.
10. Лепский В.Е. Междисциплинарные проблемы средового подхода к инновационному развитию / В.Е. Лепский. – М.: Когито-центр, 2011. – 240 с.
11. Черкашин А.К. Геокартографическое мышление в современной науке / А.К. Черкашин // Геодезия и картография, 2020. – № 7. – С. 27-36.
12. Гемпель К.Г. Логика объяснения / К.Г. Гемпель. – М.: Дом интеллектуальной книги; Русское феноменологическое общество (ДИК, РФО), 1998. – 237 с.
13. Suppe F. Swan Song for Positivism. Explanation and intertheoretical reduction. Structure of Scientific Theories, Urbano&Chicago, Univ. of Illinois Press, 1977, pp. 619-624.
14. Резников В.М. Объяснение явлений посредством моделей в естествознании и их понимание / В.М. Резников // Философия науки, 2015. – № 4 (67). – С. 29-39.

15. Румянцева Т.Г. Философия И. Канта (глоссарий) / Т.Г.Румянцева. – Минск, 2004. – 75 с.
16. Трансцендентальное // Большая российская энциклопедия [в 35 т.] / гл. ред. Ю. С. Осипов. – М.: Большая российская энциклопедия, 2004-2017. – URL: http://bigenc.ru/text/4200289.
17. Киттель Ч. Берклеевский курс физики. Т. 1. Механика / Ч. Киттель, В. Найт, М. Рудерман // М.: Наука, 1975. – 479 с.
18. Черкашин А.К. Инновационная математика: поиск оснований и ограничений моделирования реальности / А.К. Черкашин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. – № 2 (14). – С. 69-87.
19. Катречко С.Л. Природа явления в трансцендентализме Канта: семантико-когнитивный анализ / С.Л. Катречко // Кантовский сборник, 2018. – Т. 37. – № 3. – С. 31-55.
20. Черкашин А.К. Метатеоретическое системное моделирование природных и социальных процессов и явлений в неоднородной среде / А.К.Черкашин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. – № 1 (13). – С. 61-84.
21. Austin M.P. On non-linear species response models in ordination. Vegetatio, 1976, vol. 33, no. 1, pp. 33-41.
22. Залгаллер В.А. Теория огибающих / В.А. Залгаллер. – М.: Наука, 1975. – 104 с.
23. Черкашин А.К. Иерархическое моделирование эпидемической опасности распространения нового коронавируса COVID-19 / А.К.Черкашин // Проблемы анализа риска, 2020. – Т. 17. – № 4. – С. 10-21.
24. Майданский А.Д. Геометрический порядок доказательства и логический метод в «Этике» Спинозы / А.Д. Майданский // Вопросы философии, 1999. – № 11. – С. 172-180.
25. Брюшинкин В.Н. Поризматическая модель происхождения научных теорий и ее применение к исследованию истории логики / В.Н. Брюшинкин // Вопросы философии, 2013. – № 6. – С. 40-45.
26. Черкашин А.К. Полисистемный анализ и синтез / А.К. Черкашин // Новосибирск: Наука, 1997. – 502 с.
27. Катречко С.Л. Трансцендентальная аргументация Канта как формальная онтология // РАЦИО.ru, 2011. – № 5. – С. 89-105.

Черкашин Александр Константинович. *Доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией теоретической географии Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, ORCID: 0000-0002-7596-7780, WOS: K-2418-2017, AuthorID: 58425, akcherk@irnok.net, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская 1.*

UDC 167.2:168.51-2:51-7
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.001

Mathematical interpretation of transcendental analytics and metatheory of scientific knowledge

Aleksander K. Cherkashin
V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS,
Russia, Irkutsk, *akcherk@irnok.net*

Abstract. Different methods of Kant's philosophical system are studied from the standpoint of mathematical and geographical sciences. This system is considered as part of the meta-theoretical approach, represented by means of methodological, mathematical and statistical analysis. The procedures of vector stratification (bundle) of the categorical feature space on manifolds developed in differential geometry are used as a model of transcendental analytics. Vector bundle algebra models the procedures of transcendental dialectical logic in the form of triadic systems of knowledge organization. The observed reality is described in terms of coordinate space. A priori knowledge is represented by a manifold, on which the tangent bundle of space into a system of independent layers as opposites is carried out. The bundle layers represent the laws of pure absolute knowledge, excluding the conventions of cognition of reality. The universal equations of these relations are derived, and examples of the application of these equations and their relations for the analysis of statistical data and the creation of system theories are presented. It is assumed that the joint work of philosophers, mathematicians and geographers will make it possible to coordinate transcendental concepts and laws to create a united field of meta-theoretical research.

Keywords: Transcendental analytics, fibration procedures, spatial manifolds, triadic schemes, dialectical logic, statistical analysis, metatheoretical knowledge, general theory of systems, rules of inference

Acknowledgements: The study was carried out at the expense of the state task (state registration number of the topic: AAAA-A21-121012190056-4).

References

1. Levin M. R. Universum nauki. Arhitektonicheskie idei nauki, otraslej i chastej nauchnogo znaniya v filosofii Kanta [Universe of the science. Architectonic ideas of science, branches and parts of scientific knowledge in Kant's philosophy]. Kantovskij sbornik [Kantian bulletin], 2020, vol. 3, no. 2, pp. 26-45.
2. Husserl E. Fenomenologiya. Stat'ya v Britanskoj enciklopedii [Phenomenology. Article in the British Encyclopedia], Logos, 1991, no. 1, pp. 12-21.
3. Hanna R. Kant and the foundations of analytic philosophy. Oxford, Oxford University Press, 2001, 312 p.
4. Kant I. Kritika chistogo razuma [Critique of pure reason]. Moscow, Nauka, 1999.
5. Weinberg S. Mechty ob okonchatel'noj teorii: fizika v poiskah samyh fundamental'nyh zakonov prirody [Dreams of a final theory: The scientist's search for the ultimate laws of nature]. Random house publishing group, 2011, 256 p.
6. Kalinnikov L.A. Sistemnost' KPR i sistema Kanta (I) [A systematicity in CPR and the system of Kant (I)]. Kantovskij sbornik. [Kantian journal], 2015, no. 3 (53), pp. 7-21.
7. Shtark V. Fizicheskaya geografiya v Kyonigsbergskom universitete: Karl Genrih Rappol't i Immanuil Kant [Physical geography at the University of Konigsberg: Karl Heinrich Rappold and Immanuel Kant]. Kantovskij sbornik. Mezhvuzovskij tematicheskij sbornik nauchnyh trudov. [Kantian journal collection. Interuniversity thematic collection of scientific papers], – Kaliningrad: Iz-vo Rossijskogo gocudarstvennogo univesrsiteta im. I.Kanta, Vypusk 26, 2006, pp. 203-220.
8. Kassirer E. Zhizn' i uchenie Kanta. Sankt-Peterburg: Centr gumanitarnyh iniciativ [Life and teaching of Kant]. Saint-Petersburg: Center for Humanitarian Initiatives, 2013, 448 p.
9. Vavilov S. I. Isaak N'yuton [Isaak Newton]. M.-L.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1945, ch. 13, 2nd ed., pp. 171-184.
10. Lepsky V. E. Mezhdisciplinarnye problemy sredovogo podhoda k innovacionnomu razvitiyu [Interdisciplinary problems of the environmental approach to innovative development]. Moscow, Kogito-center, 2011, 240 p.
11. Cherkashin A. K. Geokartograficheskoe myshlenie v sovremennoj nauke [Geographical thinking in modern science]. Geodeziya i kartografiya [Geodesy and cartography], 2020, no. 7, pp. 27-36.
12. Hempel C. G. Studies in the logic of confirmation. Mind. A quarterly review of psychology and philosophy, 1945, vol. LIV, no. 213, pp. 1-26.
13. Suppe F. Swan Song for Positivism. Explanation and intertheoretical reduction. Structure of Scientific Theories, Urbano&Chicago, Univ. of Illinois Press, 1977, pp. 619-624.
14. Reznikov V.M. Ob"yasnenie yavlenij posredstvom modelej v estestvoznanii i ih ponimanie [Explanation of phenomena by means of models in natural science and their understanding]. Filosofiya nauki [Philosophy of science], 2015, no. 4 (67), pp. 29-39.
15. Rumyantseva T.G. Filosofiya I.Kanta (glossarij) [Philosophy of I. Kant (glossary)]. Minsk, 2004, 75 p.
16. Transcendental'noe [Transcendental]. Bolshaya rossiyskaya enciklopediya [The Great Russian Encyclopedia] [in 35 vol.] / ed. Yu.S.Osipov. Moscow, 2004-2017, available at: http://bigenc.ru/text/4200289.
17. Kittel Ch., Knight V.D., Ruderman M.A., Helmholz A.C., Burton J.M. Berkleevskij kurs fiziki. Mekhanika [Berkley physics course. Mechanics], Moscow, Nauka, 1975, 479 p.
18. Cherkashin A. K. Innovacionnaya matematika: poisk osnovanij i ogranichenij modelirovaniya real'nosti [Innovative mathematics: the search for foundations and limitations of reality modeling]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 2 (14), pp. 69-87.
19. Katrechko S.L. Priroda yavleniya v transcendentalizme Kanta: semantiko-kognitivnyj analiz [The nature of appearance in Kant’s transcendentalism: A semantico-cognitive analysis]. Kantovskij sbornik [Kantian bulletin], 2018, vol. 37, no. 3, pp. 31-55.
20. Cherkashin A. K. Metateoreticheskoe sistemnoe modelirovanie prirodnyh i social'nyh processov i yavlenij v neodnorodnoj srede [Metatheoretic system modeling of natural and social processes and phenomena in an inhomogeneous environment]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 1 (13), pp. 61-84.
21. Austin M.P. On non-linear species response models in ordination. Vegetatio, 1976, vol. 33, no. 1, pp. 33-41.
22. Zalgaller V. A. Teoriya ogibayushchih [The theory of envelopes]. Moscow, Nauka, 1975, 104 p.

23. Cherkashin A. K. Ierarhicheskoe modelirovanie epidemicheskoj opasnosti rasprostraneniya novogo koronavirusa COVID-19 [Hierarchical modeling of epidemic danger of the spread of the novel coronavirus COVID-19]. Problemy analiza riska [Problems of risk analysis], 2020, vol. 17, no. 4, pp. 10-21.
24. Maidansky A.D. Geometricheskij poryadok dokazatel'stva i logicheskij metod v «Etike» Spinozy. [Geometric order of proof and logical method in Spinoza's "Ethics"]. Voprosy filosofii [Questions of philosophy], 1999, no. 11, pp. 172-180.
25. Bryushinkin V. N. Porizmaticheskaya model' proiskhozhdeniya nauchnyh teorij i ee primenenie k issledovaniyu istorii logiki [Porismatic model of the origin of scientific theories and its application to the study of the history of logic]. Voprosy filosofii. [Questions of philosophy], 2013, no. 6, pp. 40-45.
26. Cherkashin A. K. Polisistemnyj analiz i sintez [Polysystem analysis and synthesis]. Novosibirsk, Nauka, 1997, 502 p.
27. Katrechko S.L. Transcendental'naya argumentaciya Kanta kak formal'naya ontologiya [Kant's transcendental argumentation as a formal ontology]. RACIO.ru, 2011, no. 5, pp. 89-105.

Alexander K. Cherkashin. *Doctor of Geographical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Theoretical Geography of V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS, ORCID: 0000-0002-7596-7780, WOS: K-2418-2017, AuthorID: 58425, akcherk@irnok.net, 664033, Irkutsk, Ulaanbaatar st. 1.*

Статья поступила в редакцию 04.07.2022; одобрена после рецензирования 19.07.2022; принята к публикации 12.01.2023.

The article was submitted 07/04/2022; approved after reviewing 07/19/2022; accepted for publication 01/12/2023.

УДК 519.87
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.002

Использование метода Монте-Карло и генетического программирования для получения математической модели метода эволюционного согласования решений

Протасов Владислав Иванович[1], Потапова Зинаида Евгеньевна[1], Мирахмедов Роман Октамович[1], Клименко Владислав Алексеевич[2]

[1] Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Россия, Москва, *protvlad@gmail.com*

[2] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, Московская область, Долгопрудный

Аннотация. В работе обсуждается новый метод принятия решений – метод эволюционного согласования решений, развиваемый на протяжении ряда лет в Московском авиационном институте. Приводится теоретическое обоснование метода, использующее модель Георга Раша и теорему о присяжных Кондорсе. В основе метода лежит процедура эволюционного согласования решения, построенная, исходя из генетических алгоритмов. Для построения математической модели метода используется генетическое программирование. Обучающая выборка получена, исходя из компьютерной модели метода эволюционного согласования решений и вычислений с использованием метода Монте-Карло. Анализ математической модели показал значительное уменьшение вероятности возникновения ошибок при решении задач произвольной трудности.

Ключевые слова: согласование решений, трудность задачи, модель Раша, теорема Кондорсе, генетические алгоритмы, уменьшение вероятности ошибок

Цитирование: Протасов В.И. Использование метода Монте-Карло и генетического программирования для получения математической модели метода эволюционного согласования решений / В.И. Протасов, З.Е. Потапова, Р.О. Мирахмедов, В.А. Клименко // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 23-32. – DOI:10.38028/ESI.2022.29.1.002.

Введение. В настоящее время происходит существенная перестройка способа производства – старые индустриальные способы заменяются современными, связанными с переходом к цифровой экономике. В связи с тем, что решаемые задачи становятся все сложнее и имеющихся ресурсов не всегда хватает для поддержания требуемых темпов развития [1-4], возникла проблема нахождения и теоретического обоснования новых технологий решения сложных интеллектуальных задач, возникающих в науке, технике и промышленности и поддержки этих технологий соответствующими системами. Отсутствие математических моделей систем коллективного интеллекта тормозит проведение разработок методов групповой работы, позволяющих гарантированно решать сложные задачи, выдвигаемые практикой, и создавать соответствующие программные продукты для достижения этих целей [2].

К настоящему времени в области принятия решений разработано большое количество методов коллективной работы, предназначенных для применения в различных предметных областях [3], но присущие этим методам недостатки и ограничения, связанные с трудностями настройки на предметную область, отсутствием универсальности и стандартизации, затрудняют использование этих методов в практике. Существенным недостатком существующих методов является отсутствие гарантии правильности решения. Для каждой вновь возникшей задачи требуется занимающая длительное время процедура подбора метода из большого количества разработанных методов и настройка подобранного метода на специфику новой проблемы [5].

Большое количество работ и подходов посвящено устранению этих недостатков. Так, применение математических моделей и аналитических методов позволило в ряде случаев упростить процедуры настройки на предметную область и получить ряд важных критериев, позволяющих оптимизировать процедуры принятия решений [6]. Использование нечеткой

логики [7] позволило получить процедуры нахождения оптимальных решений при решении некоторого ряда трудно формализуемых задач. Различные комбинированные технологии [8, 9], включающие, например, эволюционные стратегии и генетические алгоритмы, также конструировались для устранения приведенных выше ограничений. Весьма актуальна, несмотря на свое давнее происхождение, теорема о присяжных маркиза де Кондорсе, опубликованная им в 1785 году. Теорема определяет условия, при выполнении которых вероятность правильного решения, получаемого жюри, стремится к единице. На этом эффекте основываются современные системы краудсорсинга, эксплуатирующие коллективный труд десятков и сотен тысяч пользователей сети Интернет [10].

При построении систем коллективного интеллекта (СКИ) не в полной мере учитывается двойственность креативных характеристик интеллектуальных агентов, выступающих при создании коллективного решения в двух ролях – генераторов решений или их частей и оценивателей чужих решений. Далее таких агентов будем называть акторами. Для них строятся специальные СКИ – системы эволюционного согласования решений (СЭС). Особенность этих систем заключается в том, что в них непосредственно используется двойственность креативных характеристик акторов [11]. СЭС построены на базе теории метасистемных переходов В. Ф. Турчина, который установил определяющую роль правил взаимодействия. Эти правила в систему вносятся извне и способствуют возникновению синергетического эффекта «усиления интеллекта» [12]. Использование правил взаимодействия, взятых из генетических алгоритмов, а также двойственность креативных характеристик акторов при групповой работе позволило создать новый метод – метод эволюционного согласования решений (МЭС). Метод был протестирован с использованием тестовых задач. Связь вероятности правильного решения тестовых заданий с подготовленностью носителей интеллекта и трудностью заданий была установлена в однопараметрической модели Раша [13]. В настоящей работе эта модель используется для построения математической модели МЭС. В работе используется также генетическое программирование, позволяющее из обучающей выборки, полученной из компьютерной модели МЭС, найти искомую функциональную зависимость вероятностей правильного и ошибочного решений от числа акторов и их креативных характеристик.

Известно, что в настоящее время для решения задач генетического программирования (ГП) используются суперкомпьютеры с мощными программными комплексами [14]. Вот что говорится одним из лидеров современного генетического программирования Дж. Коза по этому поводу: «Во многих случаях результаты моделирования эволюционных процессов оказываются сопоставимыми с комплексными структурами, разработанными традиционными способами. Это естественно, поскольку движущей силой как эволюции, так и технического прогресса являются механизмы естественного отбора» [14]. В свою очередь проблемой в ГП является сложная организация вычислительных алгоритмов, использующая суперкомпьютеры и языки описания и действия с деревьями типа ЛИСП или ПРОЛОГ. При этом затраты на программирование зачастую превышают затраты на вычисления по этим программам.

1. Постановка задачи. Необходимо построить математическую модель МЭС, позволяющую оценивать вероятности правильных и ошибочных решений группы акторов в зависимости от их числа и их креативных характеристик. Математическая модель позволит получить доказательство увеличения вероятности правильных решений в этих системах, оценивать вероятности ошибочного решения, исходя из математической модели, и строить системы с заданными величинами этих вероятностей. Требуется также разработать новую схему генетического программирования, свободную от перечисленных выше недостатков.

2. Методика решения задачи. Для построения математической модели вначале составляется компьютерная программа, позволяющая получить из описанных выше параметров искомые значения вероятностей правильных и ошибочных параметров. Далее, с исполь-

зованием модели Монте-Карло строится обучающая выборка, связывающая входные параметры с полученными вероятностями. Для получения функциональной зависимости этих вероятностей от входных параметров используется генетическое программирование.

2.1. Метод эволюционного согласования. Метод эволюционного согласования (МЭС) основан на процедуре заполнения слотов проекта групповым актором в соответствии с правилами взаимодействия, взятых из генетических алгоритмов (ГА) [15]. На первой стадии – стадии генерации решений акторы, исходя из своих способностей, заполняют слоты проекта, либо оставляют некоторые из них незаполненными. Первая стадия соответствует оператору ГА создания популяции решений или их частей, вторая это стадия согласования.

В первой разновидности метода предусмотрено многократное проведение итераций согласования. Во второй разновидности метода – только одна итерация согласования. При дальнейшем изложении вторая разновидность будет называться трехтактной схемой организации работы МЭС. Эта схема приведена на рисунке 1.

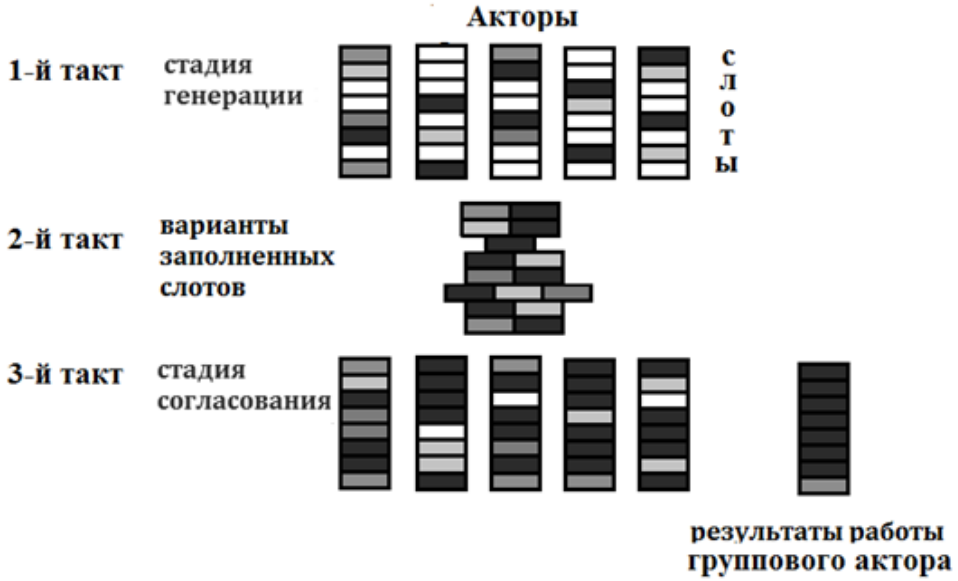


Рис. 1. Трехтактная схема организации работы МЭС

2.2. Модель Раша. При определении вероятности правильного ответа связь между уровнем трудности тестовых вопросов и степенью подготовленности акторов была установлена Георгом Рашем в наиболее общей теории конструирования тестов, опирающейся на теорию измерений – Item Response Theory (IRT) [13]. Для наших целей подходящей является однопараметрическая модель Раша, как наиболее простая модель, связывающая вероятность получения правильного ответа G_R испытуемого с уровнем его подготовленности θ_{GR} и трудностью задания β. Подготовленность актора и трудность задания являются латентными переменными. Считается, что они не могут быть непосредственно измеренными, а могут быть получены лишь в результате использования математических моделей, оперирующих наблюдаемыми переменными, называемыми индикаторными. Поскольку $G_R(\beta,\ \theta_{GR})$ представляет собой логистическую кривую, поэтому принято задавать подготовленности акторов и трудности заданий в логитах. Диапазон изменения этих величин простирается от минус бесконечности до плюс бесконечности. В качестве индикаторов в модели Раша выступают результаты тестирования группы акторов с использованием тестовых заданий различного уровня трудности.

Вероятность G_R правильного заполнения слота трудности β, согласно этой модели, определяется формулой:

$$G_R = \frac{1}{1+e^{\beta-\theta_{GR}}}\,. \qquad (1)$$

Зависимость вероятности правильного ответа от трудности задания и подготовленности актора при генерации решений приведена на рисунке 2.

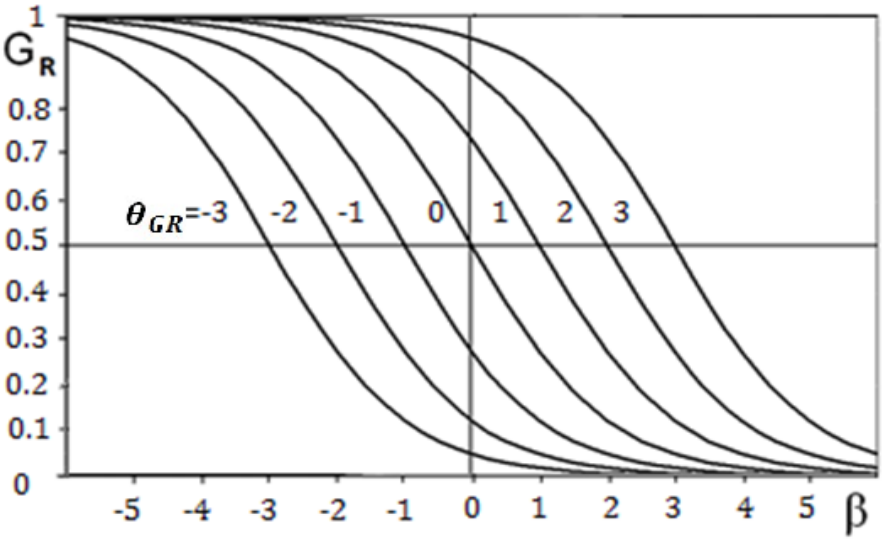


Рис. 2. Зависимость вероятности правильного ответа актора от трудности задачи β и подготовленности θ_{GR}

Будем считать, что актор характеризуется при работе над проектом со слотами одинаковой степени трудности четырьмя параметрами:

G_R - вероятность заполнения слота правильным ответом,

G_N - вероятность заполнения слота неправильным ответом,

E_R – вероятность правильного оценивания слота,

E_N – вероятность неправильного оценивания слота.

С этими параметрами актора можно связать четыре вспомогательных параметра, используемых в дальнейшем [9]:

$G_S = G_R + G_N$ - вероятность заполнения слота на стадии генерации решений,

$G_V = 1 - G_S$ - вероятность ответа «не знаю» на этой стадии,

$E_S = E_R + E_N$ - вероятность того, что слот будет заполнен при оценивании,

$E_V = 1 - E_S$ - вероятность того, что слот не будет заполнен при оценивании.

Для определения зависимости вероятности неправильного решения от трудности задания вначале определим по модели Раша зависимость вероятности заполнения слота актором:

$$G_S = \frac{1}{1+e^{\beta-\theta_{GS}}}. \quad (2)$$

где θ_{GS} – подготовленность актора к заполнению слотов как правильными, так и не правильными ответами.

Вероятность принятия неправильного решения актором составит при этом

$$G_N = \frac{1}{1+e^{\beta-\theta_{GS}}} - \frac{1}{1+e^{\beta-\theta_{GR}}}. \quad (3)$$

Аналогичные выражения получаются и для вероятностей правильной и ошибочной экспертизы:

$$E_R = \frac{1}{1+e^{\beta-\theta_{ER}}}, E_S = \frac{1}{1+e^{\beta-\theta_{ES}}},$$
$$E_N = \frac{1}{1+e^{\beta-\theta_{ES}}} - \frac{1}{1+e^{\beta-\theta_{ER}}}.$$

Графики для выражений (1-3) приведены на рисунке 3. На графике приведена также зависимость вероятности неправильного решения $G_{N2} = 1 - G_R$ в случае, когда при оценке правильности решений используется двоичная логика, и актор стремится дать ответ, даже если не знает его и пытается отгадать. Видно, что с ростом трудности задачи эта вероятность существенно превышает вероятность G_N. Уменьшение вероятности принятия неправильного

решения G_N с ростом трудности задачи β обусловлено тем, что актор дает ответ «не знаю» в трудных для него случаях.

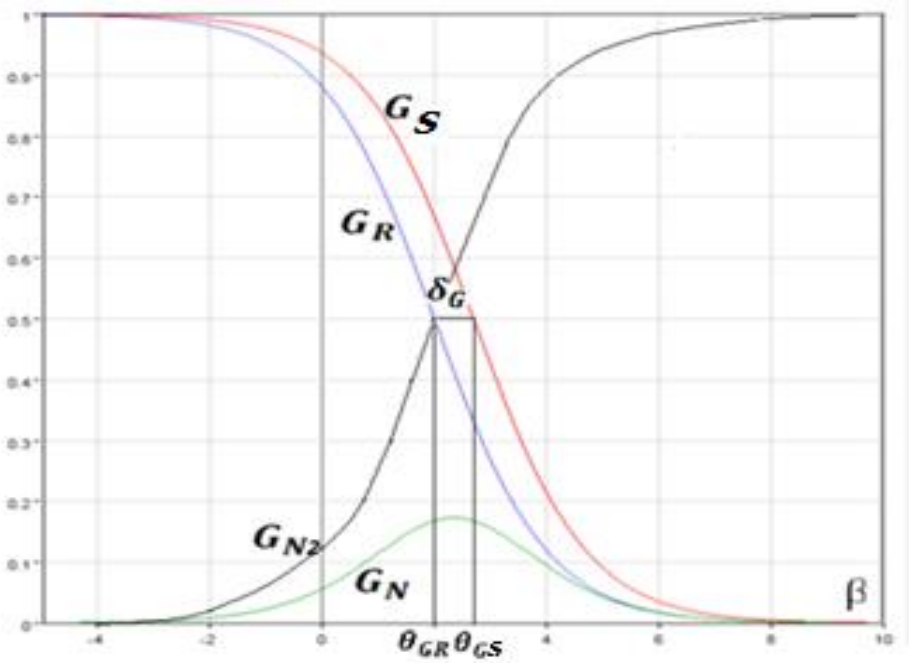


Рис. 3. Графики зависимостей $G_R(\beta)$, $G_S(\beta)$ и $G_N(\beta)$ от трудности задачи

Свойство актора к генерации ошибочного ответа назовем «ошибаемостью при генерации» и охарактеризуем величиной δ_G: $\delta_G = \theta_{GS} - \theta_{GR}$; свойство актора к ошибочной экспертизе назовем «ошибаемостью при экспертизе» и охарактеризуем величиной

$$\delta_E: \delta_E = \theta_{ES} - \theta_{ER} .$$

В таблице 1 приведена обучающая выборка методом Монте-Карло.

Таблица 1. Обучающая выборка методом Монте-Карло

β	G_R	G_N	P_R	Q_R	QN
-5	0.99592986	0.00204482	0.99794770	0.99998800	0.00001200
-4	0.98901306	0.00550064	0.99446327	0.99991120	0.00008760
-3	0.97068777	0.01453820	0.98515700	0.99932670	0.00064990
-2	0.92414182	0.03669246	0.96115133	0.99542180	0.00414530
-1	0.81757448	0.08267503	0.90252963	0.97194320	0.02198000
0	0.62245933	0.14606545	0.76751083	0.86518820	0.07727250
1	0.37754067	0.17229333	0.51542263	0.57994930	0.14077410
2	0.18242552	0.12760000	0.24398947	0.23499600	0.11247750
3	0.07585818	0.06599288	0.09053877	0.05688610	0.04128500
4	0.02931223	0.02801195	0.03202890	0.00998690	0.00888120
5	0.01098694	0.01089433	0.01137190	0.00149080	0.00146430

3. Генетическое программирование. Для восстановления искомой модели использованы идентификаторы моделирующей программы a1[k,i], d[k,i], a2[k,i], здесь k – номер особи, i – номер команды. Каждый оператор программного дерева моделировался одной командой типа p[k,i] = p[k,a1[i]] | d[k,i] | p[k,a2[i]], где d[k,i] ∈ {1;2;3} и соответствует знакам арифметических операций сложения{1}, вычитания{2} и умножения{3}.

С первой по третью ячейки программы заносятся по порядку строки выборки с данными. С четвертой по восьмую ячейки генерируются случайные константы c4-c8. Далее генерируются семь случайных команд, расположенных с девятой по пятнадцатую ячейку. Ячейки p9-p30 являются рабочими ячейками программы, ячейка p31 содержит результат выполнения программы Y.

При генерации программы выполняется простое правило: операндами команды i могут быть только операнды с адресами от 1 до i-1. Такое простое правило позволяет избежать множества сложнейших процедур, применяемых многими разработчиками программных оболочек генетических программ при скрещивании графов, например, таких, как удаление лишних программных кодов, так называемых интронов, замена унарных операций на дугах и узлах графов, добавление и/или удаление дуг или узлов и т.д.

Далее выполняется сформированная программа, делается оценка особи – вычисляется сумма квадратов разностей, полученных по программе результатов и взятых из обучающей выборки (так называемая в ГА фитнесс-функция). Производится скрещивание с использованием одноточечного кроссинговера двух случайно выбранных программ, вычисляется фитнесс-функция. Выполняется оператор естественного отбора, в результате которого оставляется лучшая программа. С заранее заданной вероятностью, являющейся настроечным параметром системы, происходит мутация в константах или командах. Для мутированной особи вычисляется фитнесс-функция. Далее процессы обмена, кроссинговера, мутации и естественного отбора продолжаются до тех пор, пока не появится особь со значением фитнесс-функции, равной нулю. Таким образом, в пределах программного бинарного дерева находится нужная последовательность команд, число и величины констант, удовлетворяющих обучающей выборке.

Таблица 2. Результаты восстановления искомой функции

Вариант 1					Вариант 2				
i	a1[i]	d[i]	a2[i]	p[i]	i	a1[i]	d[i]	a2[i]	p[i]
1	0	0	0	x1	1	0	0	0	x1
2	0	0	0	x2	2	0	0	0	x2
3	0	0	0	x3	3	0	0	0	x3
4	0	0	0	c4=0	4	0	0	0	c4=0
5	0	0	0	c5=0	5	0	0	0	c5=0
6	0	0	0	c6=1	6	0	0	0	c6=0
7	0	0	0	c7=0	7	0	0	0	c7=1
8	0	0	0	c8=1	8	0	0	0	c8=1
9	3	3	2	0	9	8	3	8	1
10	3	3	2	0	10	3	2	9	0
11	7	1	8	1	11	8	2	9	-2
12	5	1	10	0	12	8	2	10	0
13	8	2	2	0	13	2	3	8	0
14	12	3	4	0	14	11	3	9	-2
15	2	2	3	0	15	4	3	8	0
16	9	2	2	0	16	11	2	14	0
17	16	1	13	0	17	10	2	5	0
18	15	1	14	0	18	4	3	2	0
19	4	1	17	0	19	10	3	6	0
20	11	2	7	1	20	5	3	15	0
21	15	1	7	0	21	8	1	6	-1
22	10	3	18	0	22	14	2	10	-1
23	19	1	3	1	23	6	3	7	0
24	9	3	22	0	24	1	3	14	0
25	14	3	24	0	25	13	2	2	0
26	9	1	25	0	26	2	1	11	-1
27	13	3	1	0	27	2	2	18	0
28	20	2	13	0	28	26	3	2	0

Вариант 1					Вариант 2				
i	a1[i]	d[i]	a2[i]	p[i]	i	a1[i]	d[i]	a2[i]	p[i]
29	1	1	27	0	29	28	3	1	0
30	26	3	29	0	30	29	3	12	0
31	30	1	28	0	31	30	1	2	0
p[31]=x1·x2·x3· (2-x2)+x2					p31]=x2+x2·x3·x1· (2-x2)				

4. Получение математической модели. Генетический алгоритм помог нам получить результат:

$$P_R = G_R + E_R * G_V * G_R * (2 - G_R)$$

При его преобразовании с учетом перемножения независимых событий получили более понятный вид данного выражения:

$$P_R = G_R + E_R \cdot G_V \cdot (2 \cdot G_R - G_R \cdot G_R - 1 + 1) = G_R + E_R \cdot G_V \cdot (1 - (1 - G_R)^2).$$

Ранее все расчеты производились для количества акторов, равным трем. Формулу для произвольного числа акторов можно записать так:

$$P_R = G_R + E_R G_V (1 - \ (1 - G_R)^{M-1})$$

Аналогично, для P_N получаем выражение:

$$P_N = G_N + E_N G_V (1 - \ (1 - G_N)^{M-1})$$

5. Применение модели Кондорсе. Полученную P_R и P_N подставляем в модель Кондорсе [16-18] и получаем выражения:

$$Q_R = \sum_{i=0}^{\frac{M-1}{2}} C_M^i P_R^{M-i} (1 - P_R)^i$$

Для M=9 получим:

$$Q_R = P_R^9 + 9P_R^8(1 - P_R) + 36P_R^7(1 - P_R)^2 + 36P_R^6(1 - P_R)^3 + 36P_R^5(1 - P_R)^4$$

На рисунке 4 показаны зависимости вероятностей правильного и ошибочного решения группы от трудности задания β.

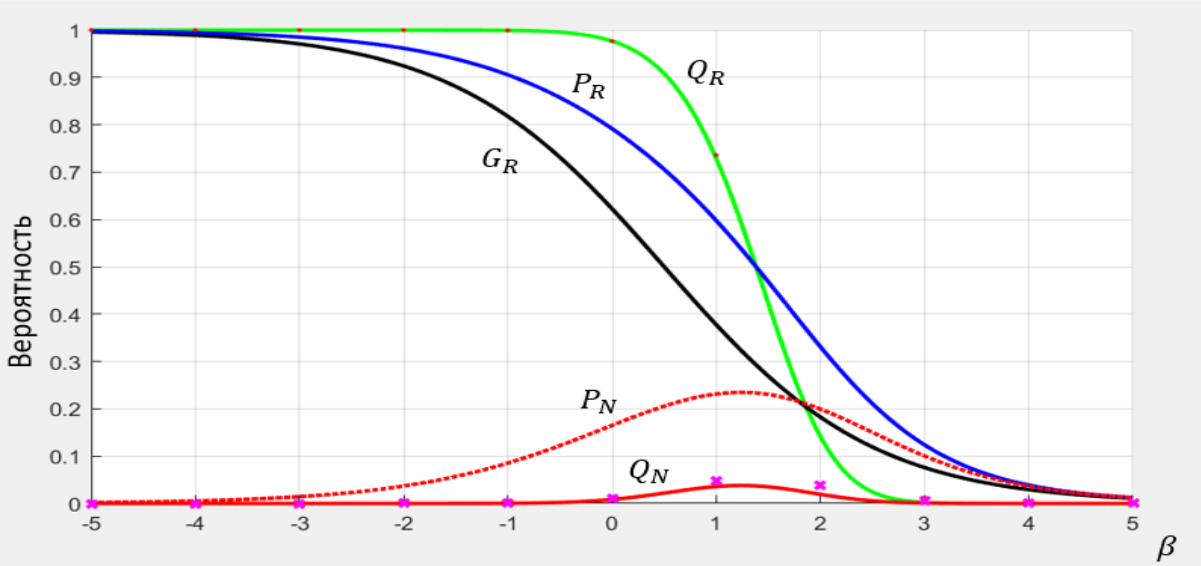


Рис. 4. Графики зависимости вероятностей правильного и ошибочного решения группы от трудности задания β

Заключение. В заключение работы можно сделать следующие выводы:

1. Для получения математической модели некоторой системы вывод зависимости выходной величины модели от многих ее входных параметров нередко затруднителен. Предложено простое представление системы с использованием модели Монте-Карло. По полу-

ченной обучающей выборке с использованием генетического программирования можно восстановить искомую модель.

2. Анализ полученной математической модели метода эволюционного согласования решений показывает, что при его использовании происходит существенное увеличение вероятности правильного решения для простых и средних по трудности задач и значительное уменьшение вероятности ошибочных решений для задач произвольной трудности.

Список источников

1. Forsyth R. Expert systems. Principles and case studies. London: Chapman and Hall, 1984, 231 p.
2. Grudin J. Computer-Supported Cooperative Work: Its History and Participation. Computer, 1994, v. 27 (4), pp. 19-26.
3. Gupta M.M., Sanchez,E. Approximate Reasoning in Decision Analysis. North-Holland Publishing Company, 1982, 455 p.
4. Gupta M.M. Approximate Reasoning in Expert Systems. North-Holland Publishing Company, 1985, 835 p.
5. Veltman K. Computers and a new philosophy of knowledge. Frankfurt: Internftional Classification, 1991, v. 18, pp. 2-2.
6. Protasov V., Charnine M., Melnikov E. The Crowdsourcing Linguistic Technology for Experts Assessment. Proceedings of the 2014 International Conference on Artificial Intelligence, Las Vegas: CSREA Press, 2014, v. II, pp. 656-661.
7. Zadeh L.A. Fuzzy algorithms. Information and Control, 1968, pp. 12-94.
8. Jonathan Shapiro, Adam Prügel-Bennett, Magnus Rattray. A statistical mechanical formulation of the dynamics of genetic algorithms. Proceeding conference AISB Workshop on Evolutionary Computing, 1994, pp. 17-27.
9. Protasov V., Potapova Z., Akhobadze G. How to reduce the probability of erroneous decisions in the systems of collective intelligence. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, v.927(1), 012069.
10. Howe J. The Rise of Crowdsourcing. Wired, 2006, pp. 1-4.
11. Mirakhmedov, Potapova Z., Protasov V. MESING – a new method of organizing the joint work of neural networks and its metrology. Journal of Physics: Conference Series, 2021, v. 1727, 012004.
12. Turchin V.F. The Phenomenon of Science: A Cybernetic Approach to Human Evolution. New York: Columbia University Press, 1977, XVII, 348 p.
13. Rasch G. Probabilistic Models for Some Intelligence and Attainment Tests. Chicago: University of Chicago Press, 1981, 199 p.
14. Koza J.R. Genetic Programming: A Paradigm for Genetically Breeding Populations of Computer Programs to Solve Problems. Stanford University Computer Science Department technical report STAN-CS-90-1314, 1990.
15. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975, 228 p.
16. Marie-Jean-Antoine-Nicolas Condorcet. Essay on the application of analysis to the probability of decisions rendered by plurality of votes. Paris: Imprimerie Royale, 1785.
17. Baharad Eyal, Goldberger Jacob, Koppel Moshe, Nitzan Shmuel Beyond Condorcet: Optimal Aggregation Rules Using Voting Records. The Open Access Publication Server of the ZBW – Leibniz Information Centre for Economics. Cesifo working paper no. 3323 category 2: public choice january 2011.
18. Koriyama Yukio, Szentes Balázs A resurrection of the Condorcet Jury Theorem, Theoretical Economics, 2009, v.4, pp. 227-252.

Протасов Владислав Иванович. *Д.т.н., доцент, профессор кафедры Цифровые технологии и информационные системы Московского авиационного института (национальный исследовательский университет), AuthorID: 520803, SPIN: 9455-1291, ORCID: 0000-0002-483-7209, protvlad@gmail.com, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.*

Потапова Зинаида Евгеньевна. *К.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры Математическая кибернетика Московского авиационного института (национальный исследовательский университет, AuthorID: 180610, ORCID: 0000-0002-2718-1556, potapovaz@yandex.ru, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.*

Мирахмедов Роман Октамович. *Аспирант кафедры Цифровые технологии и информационные системы Московского авиационного института (национальный исследовательский университет), ORCID: 0000-0001-8930-0138, mirakhmedov@gmail.com, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.*

Клименко Владислав Алексеевич. *Студент 1-го курса магистратуры Московского физико-технического института (национальный исследовательский университет), ORCID: 0000-0001-8839-5753, vladklim21@gmail.com, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.*

UDC 519.87
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.002

Using the Monte - Carlo method and genetic programming to obtain a mathematical model of the method of evolutionary matching of solutions

Vladislav I. Protasov[1], Zinaida E. Potapova[1], Roman O. Mirakhmedov[1], Vladislav A. Klimenko[2]

[1] Moscow Aviation Institute (National University), Russia, Moscow, *protvlad@gmail.com*

[2] Moscow Institute of Physics and Technology (National University), Russia, Dolgoprudny

Abstract. The paper discusses a new decision-making method - the method of evolutionary decision matching, which has been developed over a number of years at the Moscow Aviation Institute. The theoretical substantiation of the method is given, using the Georg Rasch model and the Condorcet jury theorem. The method is based on the procedure of evolutionary coordination of the solution, built on the basis of genetic algorithms. To build a mathematical model of the method, genetic programming is used. The training sample was obtained based on calculations using the Monte Carlo model and a computer model of the evolutionary decision matching method. The analysis of the mathematical model showed a significant decrease in the probability of making mistakes when solving problems for any difficulty values.

Keywords: solution matching, problem difficulty, Rasch model, Condorcet theorem, genetic algorithms, genetic algorithms, error reduction

References

1. Forsyth R. Expert systems. Principles and case studies. London: Chapman and Hall, 1984, 231 p.
2. Grudin J. Computer-Supported Cooperative Work: Its History and Participation. Computer, 1994, v. 27 (4), pp. 19-26.
3. Gupta M.M., Sanchez,E. Approximate Reasoning in Decision Analysis. North-Holland Publishing Company, 1982, 455 p.
4. Gupta M.M. Approximate Reasoning in Expert Systems. North-Holland Publishing Company, 1985, 835 p
5. Veltman K. Computers and a new philosophy of knowledge. Frankfurt: Internftional Classification, 1991, v. 18, pp.2 – 2.
6. Protasov V., Charnine M., Melnikov E. The Crowdsourcing Linguistic Technology for Experts Assessment. Proceedings of the 2014 International Conference on Artificial Intelligence, Las Vegas: CSREA Press, 2014, v. II, pp. 656 - 661.
7. Zadeh L.A. Fuzzy algorithms. Information and Control, 1968, pp. 12-94.
8. Jonathan Shapiro, Adam Prügel-Bennett, Magnus Rattray. A statistical mechanical formulation of the dynamics of genetic algorithms. Proceeding conference AISB Workshop on Evolutionary Computing, 1994, pp. 17-27.
9. Protasov V., Potapova Z., Akhobadze G. How to reduce the probability of erroneous decisions in the systems of collective intelligence. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, v.927(1), 012069.
10. Howe J. The Rise of Crowdsourcing. Wired, 2006, pp. 1-4.
11. Mirakhmedov, Potapova Z., Protasov V. MESING – a new method of organizing the joint work of neural networks and its metrology. Journal of Physics: Conference Series, 2021, v. 1727, 012004.
12. Turchin V.F. The Phenomenon of Science: A Cybernetic Approach to Human Evolution. New York: Columbia University Press, 1977, XVII, 348 p.
13. Rasch G. Probabilistic Models for Some Intelligence and Attainment Tests. Chicago: University of Chicago Press, 1981, 199 p.
14. Koza J.R. Genetic Programming: A Paradigm for Genetically Breeding Populations of Computer Programs to Solve Problems. Stanford University Computer Science Department technical report STAN-CS-90-1314, 1990.
15. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975, 228 p.
16. Marie-Jean-Antoine-Nicolas Condorcet. Essay on the application of analysis to the probability of decisions rendered by plurality of votes. Paris: Imprimerie Royale, 1785.

17. Baharad Eyal, Goldberger Jacob, Koppel Moshe, Nitzan Shmuel Beyond Condorcet: Optimal Aggregation Rules Using Voting Records. The Open Access Publication Server of the ZBW – Leibniz Information Centre for Economics. Cesifo working paper no. 3323 category 2: public choice january 2011.
18. Koriyama Yukio, Szentes Balázs A resurrection of the Condorcet Jury Theorem, Theoretical Economics, 2009, v.4, pp. 227-252.

Protasov Vladislav Ivanovich. *Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department Digital technologies and information systems, Moscow Aviation Institute (National University), AuthorID: 520803, SPIN: 9455-1291, ORCID: 0000-0002-483-7209, protvlad@gmail.com, 125993, Moscow, Volokolamskoe Shosse, 4.*

Potapova Zinaida Evgenyana. *Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department Mathematical cybernetics, Moscow Aviation Institute (National University), AuthorID: 180610, ORCID: 0000-0002-2718-1556, potapovaz@yandex.ru, 125993, Moscow, Volokolamskoe Shosse, 4.*

Mirakhmedov Roman Oktamovich. *Postgraduate student of the Department "Digital technologies and information systems", Moscow Aviation Institute (National University), ORCID: 0000-0001-8930-0138, mirakhmedov@gmail.com, 125993, Moscow, Volokolamskoe Shosse, 4.*

Klimenko Vladislav Alekseevich. *1st year master's student Moscow Institute of Physics and Technology, ORCID: 0000-0001-8839-5753, vladklim21@gmail.com, Russian Federation, 141701, Moscow, 9 Institutskiy per.*

Статья поступила в редакцию 14.07.2022; одобрена после рецензирования 16.09.2022; принята к публикации 22.02.2023.

The article was submitted 07/14/2022; approved after reviewing 09/16/2022; accepted for publication 02/22/2023.

УДК 004.932.72
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.003

Модель и алгоритмы обнаружения объектов на изображении с использованием локального признакового описания

Гай Василий Евгеньевич, Домнина Наталья Александровна,
Баринов Роман Олегович, Поляков Игорь Владимирович,
Голубенко Владимир Андреевич, Кузнецов Георгий Дмитриевич

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Россия, Нижний Новгород, *barinovr@list.ru*

Аннотация. Предлагается метод обнаружения объекта на изображении на основе теории активного восприятия. Теория активного восприятия предоставляет возможность для реализации этапов предварительной обработки и формирования признакового описания. Признаковое описание областей изображения, состоящее из спектральных коэффициентов U-преобразования, позволяет выявлять области с перепадами яркости. Для принятия решения, является ли рассматриваемая область ключевой, то есть, содержит ли область перепады яркости, соответствующие контуру объекта, вводится коэффициент, который в совокупности с максимальным значением стандартного отклонения дает порог, уникальный для каждого изображения. Для достижения инвариантности к повороту и масштабу, изображение-шаблон подвергается масштабированию и вращению. Локализация целевого объекта осуществляется методом k-means. Для тестирования использовались изображения из базы Amsterdam library of object images, их изменённые копии (несколько целевых объектов на исследуемом изображении, изображения с наложенным шумом) и реальные изображения. Для каждого типа изображений было проведено сравнение результатов предложенного метода с результатами метода scale-invariant feature transform. При анализе результатов тестирования были предложены параметры, дающие наибольшую точность предложенного метода обнаружения объекта на изображении. При наличии шума на изображении, точность предложенного метода в сравнении с точностью существующего метода оказалась больше на 30 %. При наличии на тестовом изображении более одного искомого объекта предложенный метод с точностью порядка 96 % способен определить все целевые объекты.

Ключевые слова: обработка изображений, обнаружение объектов, теория активного восприятия

Цитирование: Гай В.Е. Модель и алгоритмы обнаружения объектов на изображении с использованием локального признакового описания / В.Е. Гай, Н.А. Домнина, Р.О. Баринов, И.В. Поляков, В.А. Голубенко, Г.Д. Кузнецов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 33-43. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.003.

Введение. В настоящее время наблюдается быстрый рост объемов цифровых графических данных. Каждую секунду в сеть Интернет попадает множество фото и видео с разных концов света. Посещая музей, галерею, другой город или другую страну люди хотят запечатлеть каждый значимый момент этого события. В связи с этим число алгоритмов, применимых к фото- и видеосъемке, с каждым днем все растет. Уже никого не удивляет, что при создании фото на экране отображается возраст и пол человека, а при создании группового фото выделяются лица всех людей. Гораздо меньше внимания уделено анализу достопримечательностей и произведений искусства.

Чтобы при наведении камеры отображалось название памятника или скульптуры, нужно разработать быстрый алгоритм для использования его в реальном времени, а также обеспечить устойчивость к повороту, шуму, смене освещения и масштаба. Эффективность этого алгоритма в набольшей мере зависит от того, как изображение будет представлено для анализа. Здесь очень важно правильно выбрать так называемые «ключевые» точки и способ их описания.

1. Обзор существующих методов обнаружения объектов на изображении. Существующие методы обнаружения объектов на изображении преимущественно включают в себя три этапа:

1. Предварительная обработка изображения – преобразование изображения к виду, подходящему для вычисления признаков.
2. Формирование признакового описания – процесс создания итогового описания изображения.
3. Принятие решения о присутствии объекта на изображении, а также его локализация – процесс сопоставления признаков двух изображений.

Структура системы обнаружения объектов представлена на рисунке 1.

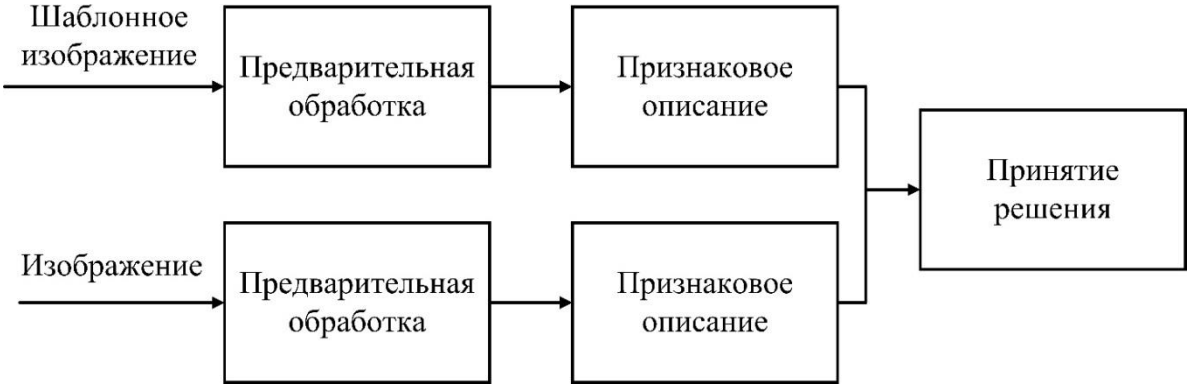


Рис. 1. Структура системы обнаружения объектов

Предварительная обработка изображения, как правило, производится для избавления от дефектов изображения и повышения точности распознавания.

Для снижения уровня шума на изображениях разработано много методов и алгоритмов. Среди них можно выделить методы адаптивного сглаживания [1], анизотропной диффузии [2] и медианной фильтрации [1]. Последний обладает высоким быстродействием и позволяет снизить уровень помех на изображениях, при его работе не происходит усреднения по яркости, контуры объектов на изображении не размываются.

Метод формирования описания изображения на основе локальных бинарных шаблонов представлен в [3]. Он основан на вычислении знака разности между яркостями соседних отсчётов. В методе SIFT [4] признаковое описание вычисляется по ключевым точкам. В качестве них выступают так называемые «пятна» – это такие области, которые ярче или темнее, чем их окружение. Такой выбор был сделан по той причине, что на маленькие области меньшее влияние оказывают эффекты искажений, а некоторые изменения могут вообще не повлиять на дескриптор. Построение дескрипторов в алгоритме SURF [5] основывается на тех же принципах, что и SIFT. В методе BRIEF [6] для этой цели вычисляется расстояния Хэмминга [7] между двумя последовательностями битов. Если дескрипторы представлены не в виде бинарных или символьных строк, то в качестве метрики может использовать Евклидово расстояние. Оно применимо для признаков, описываемых количественными переменными.

Вычисление вышеописанных метрик может быть финальным этапом в сопоставлении признаков. В этом случае есть два подхода:

1. Каждому дескриптору изображения-шаблона ставится в соответствие некоторое количество дескрипторов тестируемого изображения. Совпадение дескрипторов определяется порогом.
2. Каждому дескриптору изображения-шаблона ставится в соответствие один наиболее подходящий дескриптор тестируемого изображения.

Другой вариант, например, алгоритм RANSAC [8], может содержать дополнительные шаги для локализации объекта. Если объект переместился на сцене или снят с другого

ракурса, то можно выявить особенности, не относящиеся к объекту и тем самым уменьшить количество ложно определенных связей.

После того, как все признаки сопоставлены и, возможно, применены дополнительные методы для достижения наилучшего результата, остается локализовать объект.

Большинство существующих алгоритмов сегментации можно разделить на два класса [9]:

- интерактивные – использующие пользовательские подсказки;
- автоматические – не требующие участия пользователя;
- автоматические алгоритмы сегментации, которые, в свою очередь, также делятся на два класса:
  - выделение областей изображения с заданными свойствами, уникальными для конкретной предметной области (mean shift [10, 11], k-means [12]);
  - разбиение изображения на однородные области.

2. Реализация системы обнаружения объекта на изображении на основе теории активного восприятия. Теория активного восприятия [13, 14] позволяет реализовать как этап предварительной обработки изображения, так и этап формирования признакового описания.

Изображение представляется в виде множества областей, которые получены из исходного с помощью скользящего окна:

$$P = \{P_{ij}\}, i \in X,\ j \in Y,$$

где P_{ij} – область изображения размером $n*n$ пикселей; i, j – координаты левого верхнего угла области P_{ij}.

Для изображения-шаблона на этом этапе выполняются еще несколько шагов. Чтобы добиться инвариантности к повороту и масштабу, после представления изображения в градациях серого, выполняется его масштабирование с коэффициентами s, а также вращение на углы $\pm\alpha$.

Признаковое описание для каждой области изображения P_{ij} можно представить в виде следующей формулы:

$$D_{ij} = \{d_k\}, k = \overline{1, L},$$

где d_k – k-й коэффициент спектрального представления области изображения; L – количество фильтров, применяемых при вычислении U-преобразования.

Исходя из этого признаковое описание изображения в целом можно представить в виде набора признаковых описаний всех его областей:

$$D = \{D_{ij}\}, i \in X,\ j \in Y.$$

Для оптимизации системы в итоговые дескрипторы изображения заносятся только те признаки, которые соответствуют ключевым областям. Будем считать область ключевой, если в ней есть перепад яркости, который соответствует контуру объекта.

Признаковое описание областей изображения, состоящее из спектральных коэффициентов U-преобразования, позволяет выявлять области с перепадами яркости. Для каждой области, по которой были вычислены спектральные коэффициенты, вычисляется их среднеквадратичное отклонение (СКО). Исходя из этого, получаем формулу для вычисления СКО спектральных коэффициентов области P_{ij}:

$$s_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{1}^{n}(d_i - d_{cp})^2},$$

где n = 15 – количество учитываемых коэффициентов спектрального представления; d_i – i-й спектральный коэффициент; d_{cp} – среднее арифметическое спектральных коэффициентов рассматриваемой области без учета 0-го коэффициента.

Для принятия решения, является ли рассматриваемая область ключевой, введем коэффициент, который в применении с максимальным значением СКО будет давать некий порог, уникальный для каждого изображения:

$$s_{ij} > kS_{\max},$$

где k – задаваемый коэффициент отбора точек, $S_{\max}$ – максимальное значение СКО по всем областям изображения.

Увеличение коэффициента k задает больший порог, что приводит к уменьшению количества точек, принимаемых за ключевые. Чем ниже его значение, тем меньший перепад яркости области нужен для того, чтобы считать область ключевой.

Последний этап служит для сопоставления дескрипторов исследуемого изображения и изображения-шаблона.

Для каждой точки изображения-шаблона вычисляется расстояние до каждой из точек исследуемого изображения. В результате этого получаем вектор, который содержит 5 значений: вычисленное расстояние, координаты точки первого изображения и координаты точки второго изображения.

После того, как точки были сопоставлены, необходимо локализовать объект. Для этой цели предлагается использовать алгоритм k-means. Поскольку алгоритм требует указать количество сегментов, на которое будет поделено изображение, один его вызов с некоторым заданным числом может быть не всегда эффективен. Для решения этой проблемы было решено поступить следующим образом. Первый вызов k-means осуществляется с минимальным числом сегментов – 2. После этого используется вспомогательный метод выборочного поиска [14], который из полученных сегментов создаст набор областей, которые в дальнейшем будут проверяться на наличие объекта с помощью уже сопоставленных нами точек. Данный метод осуществляет выборочный поиск, используя 4 показателя сходства, основанные на совместимости цвета, текстуры, размера и формы. Выборочный поиск начинается с чрезмерного сегментирования изображения на основе интенсивности пикселей с использованием метода сегментации на основе графиков [16].

Таким образом, с помощью данного метода формируется набор областей для дальнейшего принятия решения о наличии на одной или нескольких найденных областях искомого объекта.

Следующим шагом является поиск области, содержащей объект. Для этого, с использованием координат найденных областей и координат сопоставленных точек, подсчитывается количество таких точек в каждой из областей. Каждая область, содержащая не менее m совпадений ключевых точек, считается за искомый объект.

3. Вычислительный эксперимент. Для проведения эксперимента использовалась база изображений 1000 предметов, созданная в Амстердамском университете – ALOI [17].

Для каждого объекта в этой базе есть одно или несколько следующих видов изменений: угол обзора, направление освещения, цвет освещения.

Для проведения тестирования были выбраны 100 объектов с разными типами изменений. В дополнение к этому, с использованием этой базы были получены дополнительные изображения для проверки устойчивости алгоритма к шуму, масштабу и присутствию на исследуемом изображении несколько искомых объектов. Для создания изображений разного масштаба использовались следующие коэффициенты S: 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2.

Для искажения изображений использовался шум «соль-перец». Были использованы следующие значения вероятностей для создания такого шума: 0,02; 0,04; 0,06; 0,1; 0,2; 0,4.

Последней частью набора данных для тестирования являются реальные изображения. Основная часть – это фотографии памятников, остальные – фотографии обычных предметов, но, в отличие от ALOI, это реальные фотографии с присутствием некоторого фона.

При поиске области, содержащей объект, количество совпавших ключевых точек m задаётся равным 30 для всех случаев.

В итоге, получается база изображений 435 предметов, у каждого предмета есть шаблоны и изображения для поиска с разными типами изменений объекта.

3.1. Анализ результатов эксперимента. Разделим результаты в зависимости от вида тестового изображения:

1. Изображения из базы ALOI.
2. Изображения, созданные с использованием базы ALOI (несколько искомых объектов на исследуемом изображении, изображения с наложенным шумом).
3. Реальные изображения.

В таблицах будут представлены результаты для разных значений параметров, которые используются в разрабатываемой системе. Для каждого типа входных изображений будут также приведены результаты метода SIFT для сравнения точности и времени работы.

Приведем описание параметров:

– k_{kp} – коэффициент отбора ключевых точек; чем меньше значение, тем больше на изображении будет определено ключевых точек
– k_m – коэффициент отбора дескрипторов; чем больше значение, тем больше будет определено совпадений
– n – размер скользящего окна

Для каждой комбинации параметров будет указана точность локализации, а также затрачиваемое на локализацию время.

В таблице 1 приведены результаты тестирования предложенного алгоритма на устойчивость к изменению угла обзора. Данный блок содержит 60 изображений отдельных объектов на однородном фоне. У тестового изображения изменен угол обзора α от -30 до +30 с шагом в 10 градусов.

Таблица 1. Устойчивость к изменению угла обзора

k_{kp}	k_m	n	Точность
0,5	1,6	16	96,67%
0,6	1,8	16	96,67%

В таблице 2 приведены результаты тестирования предложенного алгоритма на устойчивость к изменению направления освещения. Данный блок содержит 50 изображений отдельных объектов на однородном фоне, у тестового изображения изменено направление освещения.

Таблица 2. Устойчивость к изменению направления освещения

k_{kp}	k_m	n	Точность
0,5	1,6	16	100,00%
		32	100,00%
	1,8	16	100,00%
0,6	1,6	16	100,00%
	1,8	16	100,00%

Из результатов можно сделать вывод, что метод полностью устойчив к изменению освещению. Результат, полученный с использованием SIFT, также дает точность 100%.

Результаты тестирования предложенного алгоритма на изображениях с изменением цвета освещения представлены в таблице 3. Данный блок содержит 45 изображений отдельных объектов на однородном фоне, у тестового изображения изменен цвет освещения.

Таблица 3. Устойчивость к изменению цвета освещения

k_{kp}	k_m	n	Точность
0,5	1,4	16	100,00%
	1,6	16	100,00%
		32	100,00%
	1,8	16	100,00%
		32	100,00%
0,6	1,6	16	100,00%
	1,8	16	100,00%
		32	100,00%
	2,0	16	100,00%

Из результатов можно сделать вывод, что метод полностью устойчив к изменению цвета освещения объекта. Результат, полученный с использованием SIFT, также дает точность 100%.

В таблице 4 представлены результаты тестирования предложенного алгоритма на способность к обнаружению нескольких объектов на изображении (отдельные объекты на однородном фоне, тестовое изображение имеет 2 и более искомых объекта, которые могут быть повернуты, наклонены, а также иметь измененный угол обзора или масштаб). Данный блок содержит 30 изображений.

Таблица 4. Несколько объектов на изображении

k_{kp}	k_m	n	Точность (минимум 1 объект)	Точность (все объекты)
0,5	1,6	16	100,00%	93,33%
	1,8	16	100,00%	93,33%
0,6	1,4	16	100,00%	93,33%
	1,6	16	100,00%	93,33%

Метод SIFT определяет один объект с точностью 100.00 %, но он не может определить 2 и более объекта, поэтому здесь его точность – 0.00 %. Пример работы метода SIFT с несколькими искомыми объектами представлен на рисунке 2.

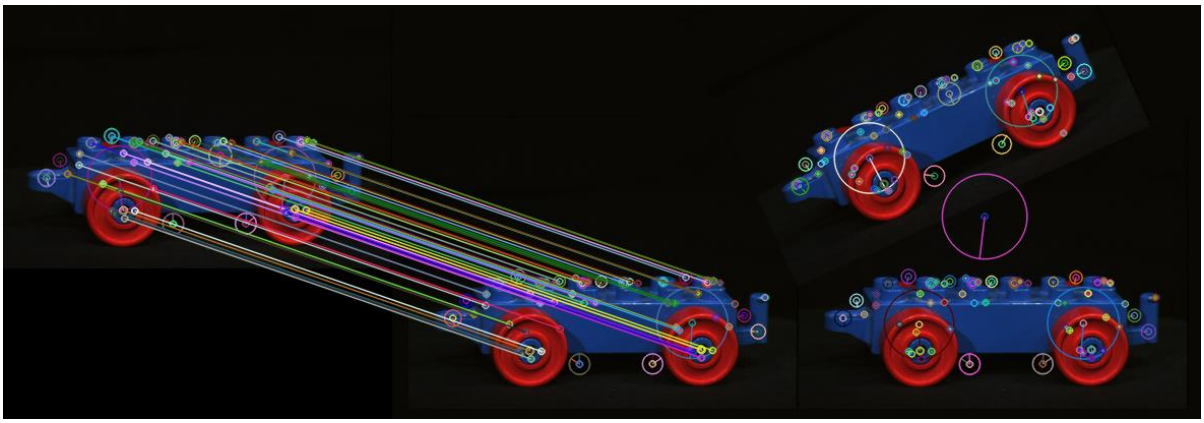


Рис. 2. Результат работы метода SIFT с несколькими объектами

Метод SIFT корректно нашел ключевые точки на всех 3 объектах, но на этапе сопоставления дескрипторов, он сопоставил только максимально похожие. Для сравнения на рисунке 3 показан результат работы разрабатываемого метода на том же тестовом изображении.

В таблице 5 приведены результаты тестирования предложенного алгоритма на способность к обнаружению нескольких объектов на изображении с шумом. Данный блок содержит 30 изображений.

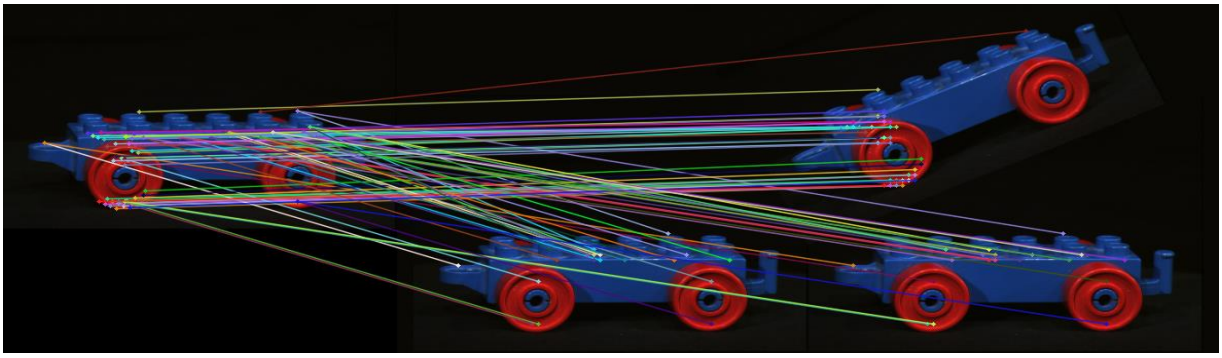


Рис. 3. Результат работы предложенного метода с несколькими объектами

Таблица 5. Несколько объектов на изображении с шумом

k_{kp}	k_m	n	Точность (минимум 1 объект)	Точность (все объекты)
0,5	1,8	32	96,67%	90,00%
0,6	1,6	16	96,67%	90,00%

Метод SIFT оказался очень слабо устойчив к шуму, он определяет один объект с точностью 38.33%, он также не может определить 2 и более объектов, поэтому здесь его точность – 0.00%. На рисунке 4 представлен результат работы разрабатываемого метода при наличии шума на изображении.

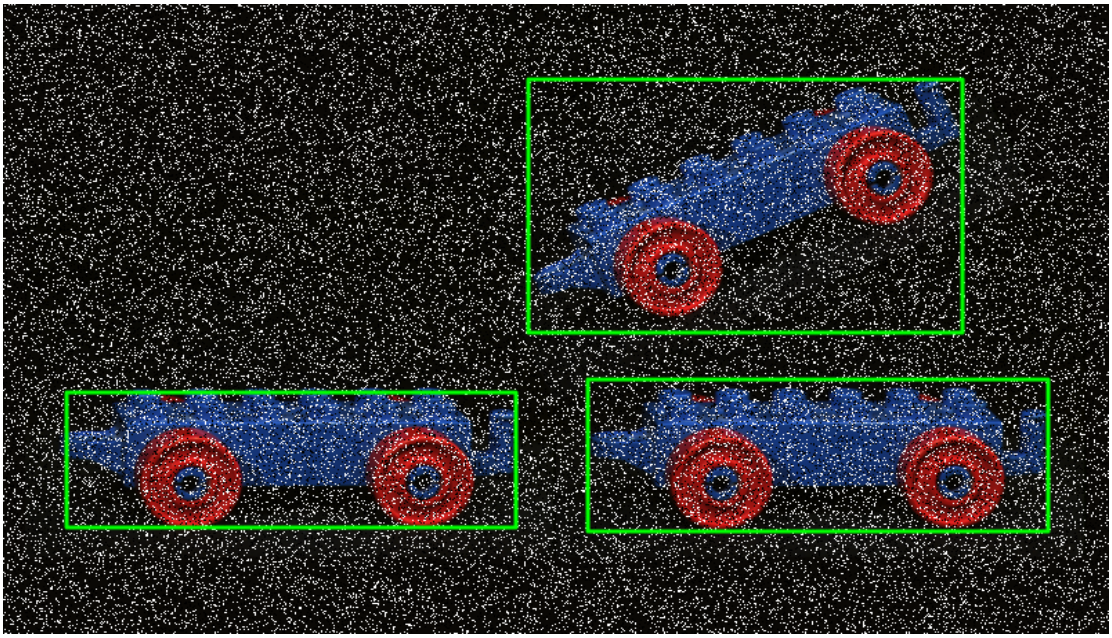


Рис. 4. Результат работы предложенного метода при наличии шума на изображении

В дополнение к этому виду тестирования рассмотрим еще 80 изображений, которые соответствуют 10 объектам, каждый из которых имеет следующие вероятности наложенного шума «соль-перец»: 0,02; 0,04; 0,06; 0,1; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6. Из результатов тестов следует, что вплоть до вероятности шума, равной 10%, точность определения объекта составляет 100%, вероятности 20% и 40% дают точность 90%, что соответствует 9 найденным объектам из 10. Начиная с вероятности 50% точность начинает резко падать и показывает 60% при вероятности шума 50% и 40% точности при вероятности шума 60%.

Таким образом, можно сделать вывод, что метод SIFT нельзя применять в ситуациях, когда есть даже небольшой шум. При вероятности шума 2% он уже показывает точность 60%, при вероятности 4% точность снижается до 50% и с повышением уровня шума только падает. Вероятно, причина этого – повышение контрастности на изображении на этапе предварительной обработки данных и отсутствие применения алгоритмов, понижающих шум.

Рассмотрим еще один дополнительный блок, который включает в себя 80 изображений, соответствующих 10 объектам, каждый из которых имеет следующие коэффициенты масштабирования *s*: 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2. Результаты приведены в таблице 6.

Таблица 6. Результаты дополнительного тестирования

Масштаб	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
Точность	100%	100%	100%	100%	100%	100%	90%	50%

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что предложенный алгоритм устойчив к изменению масштаба. При коэффициенте масштабирования 0,2 метод SIFT корректно определил 8 объектов из 10, в то время как разрабатываемый справился с 5 объектами.

Результаты тестирования предложенного алгоритма на реальных изображениях представлены в таблице 7. Данный блок содержит 40 изображений, на которых могут быть изменены угол обзора, освещение, масштаб, а также присутствовать шум.

Таблица 7. Реальные изображения

k_{kp}	k_m	n	Точность
0,5	1,8	16	95,00%
0,6	1,4	32	95,00%
	1,8	16	95,00%

Результат, полученный с использованием метода SIFT, дает точность 85,0%. Если рассматривать результаты метода SIFT без зашумленных изображений, то его точность равна 96,67%.

Таким образом, для каждого конкретного случая были выявлены параметры, дающие наиболее высокую точность. Суммируя полученные результаты, можно определить параметры, которые дают лучшие результаты в большинстве случаев. Такими параметрами являются: k_{kp} – 0.5, k_m – 1,8, n – 16.

Среднее время обработки изображения – 0,24 секунды.

Анализируя результаты тестов, можно сделать вывод о том, метод SIFT работает лучше разрабатываемого в нормальных условиях: он дает 100% точность при изменении угла поворота, направления и цвета освещения для изображений из тестовой базы и 96,67% точность для реальных изображений. Однако, на зашумленных изображениях его точность снижается до 63,33%. Также метод SIFT не может работать с несколькими объектами на изображении. При этом время работы метода SIFT вдвое меньше времени разрабатываемого метода (0,24 секунд против 0,10 секунд).

Заключение. Проведённые эксперименты и сравнительный анализ показали, что точность работы системы в нормальных условиях оказалась сопоставимой с точностью существующих методов, однако при наличии шума разработанный метод дает намного большую точность (+ 30%).

Ряд существующих методов (SIFT, SURF) на этапе сопоставления дескрипторов исследуемого изображения и изображения-шаблона находят только одну наиболее подходящую точку, вследствие чего такие методы не могут обнаружить 2 и более объектов, если они присутствуют на изображении. Сопоставление точки «один – ко всем» занимает

немного больше времени, нежели останавливать поиск на первой подходящей, но такой подход значительно расширяет функциональность метода, позволяя находить все присутствующие на изображении объекты с точностью 96,67%.

Список источников

1. Писаревский А.Н. Системы технического зрения (принципиальные основы, аппаратное и математическое обеспечение) / А.Н. Писаревский. – Л.: Машиностроение, 1988. – 424 с.
2. Анисимов Б.В. Распознавание и цифровая обработка изображений: Учеб. Пособие / Б.В. Анисимов, В.Д. Курганов, В.К. Злобин. – М.: Высш. школа, 1983. – 295 с.
3. Sharma G., ul Hussain, Jurie F. Local higher-order statistics (LHS) for texture categorization and facial analysis. Computer Vision – ECCV 2012, 12th European Conference on Computer Vision, Florence, Italy, 2012, Proceedings, Part VII, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 1-12.
4. Oji R., Tajeripour F. Full object boundary detection by applying scale invariant features in a region merging segmentation algorithm. International journal of artificial intelligence & applications (IJAIA), 2012, vol. 3, no. 5, pp. 41-50.
5. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: Speeded up robust features. Computer vision image understanding, 2008, vol. 110, no. 3, pp. 346-359.
6. Chen J. RLBP: Robust Local Binary Pattern. Proceedings of the British Machine Vision Conference, BMVA Press, 2013.
7. Minsky M., Papert S. Perceptrons. MIT Press, Cambridge, MA, 1969.
8. Martin A. Fischler, Robert C. Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Comm. Of the ACM, vol. 24, pp. 381-395.
9. Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: Бином: Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
10. Comaniciu D., Meer P. Mean shift: A robust approach towards feature space analysis. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 24: 603–619, 2002.
11. Kim E., Wang W., Li H., Huang X. A parallel annealing method for automatic color cervigram image segmentation. In: Medical Image computing and computer assisted intervention, MICCAI-GRID 2009 HPC Workshop, 2009.
12. Вежневец А., Баринова О. Методы сегментации изображений: автоматическая сегментация / А. Вежневец, О. Баринова // Компьютерная графика и мультимедиа, 2006. – № 4.
13. Утробин В.А. Элементы теории активного восприятия изображений / В.А. Утробин // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 2010. – Т. 81. – №2. – С. 61-69.
14. Кондратьев В.В. Применение методов теории самоорганизации к задачам профилирования и конфигурирования вычислительных систем / В.В. Кондратьев, Д.В. Жевнерчук //Доклады математики. – Издательство Плеяды, 2014. – Т. 90. – №. 3. – С. 788-790. – ISSN 1064-5624.
15. Jasper RR Uijlings, Koen EA van de Sande, Theo Gevers, Arnold WM Smeulders. Selective search for object recognition. International journal of computer vision, 104(2):154–171, 2013.
16. Felzenszwalb P., Huttenlocher D., Efficient graph-based image segmentation. International Journal of Computer Vision, 2004, vol. 59, no. 2.
17. Geusebroek J.M. Burghouts G.J., Smeulders A.W.M, The Amsterdam library of object images. Int. J. Comput. Vision, 2005, 61(1), pp. 103-112.

Гай Василий Евгеньевич. *Доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, AutorID: 531326, ORCID: 0000-0002-3644-5234, iamuser@inbox.ru.*

Домнина Наталья Александровна. *Старший инженер по разработке программного обеспечения в области компьютерной графики А/О Интел АО, ORCID: 0000-0002-3817-401X, zhestckova.natali@yandex.ru.*

Баринов Роман Олегович. *Инженер ООО «СКБ «Связь и локация», ORCID: 0000-0002-0269-3205, barinovr@list.ru.*

Поляков Игорь Владимирович. *Ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, AuthorID: 879102, ORCID: 0000-0002-1492-9350, polyakovigor92@gmail.com.*

Голубенко Владимир Андреевич. *Практикант-разработчик ПО А/О Интел АО, ORCID: 0000-0002-4683-3249, fullmoonshrine@gmail.com.*

Кузнецов Георгий Дмитриевич. *Инженер, ООО «СКБ «Связь и локация», ORCID: 0000-0001-5564-045X, gd.smith@yandex.ru.*

UDC 004.932.72
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.003

Model and algorithms for detecting objects in an image using a local feature description

Vasily E. Gai, Natalia A. Domnina, Roman O. Barinov, Igor V. Polyakov, Vladimir A. Golubenko, Georgy D. Kuznetsov
Nizhny Novgorod State Technical University,
Russia, Nizhny Novgorod, *barinovr@list.ru*

Abstract. The paper proposes an object detection method based on the theory of active perception. The theory of active perception provides an opportunity for implementation of pre-processing and feature description stages. The region feature descriptors consisting of spectral coefficients of U-transformation allows pne to identify regions with brightness variations. To designate a region as key, that is containing brightness differences corresponding to the object contour, a coefficient is introduced, which in combination with maximum RMS results in a unique threshold for each image. To achieve invariance to rotation and scale, the template image is subjected to scale and rotation transformations. Localization of the target object is done using the k-means method. For testing, images from the ALOI database, as well as their altered copies (multiple target objects in the image under study, images with superimposed noise) were used. For each image type, the results of the proposed method were compared with the scale-invariant feature transform method. The parameters resulting in the highest accuracy for the proposed object detection method were proposed for analysis. On noisy images, accuracy of the proposed method increased by 30% compared to the existing method. With more than one target object present on the test image, the proposed method was able to detect all target objects with an accuracy of about 96%.

Keywords: image processing, object detection, theory of active perception

References

1. Pisarevsky A.N. Sistemy tekhnicheskogo zreniya (printsipial'nyye osnovy, apparatnoye i matematicheskoye obespecheniye) [Technical Vision Systems (Fundamental Principles, Hardware and Mathematical Support)]. Mashinostroenie, 1988. 424 p.
2. Anisimov B.V., Kurganov V.D., Zlobin V.K. Raspoznavaniye i tsifrovaya obrabotka izobrazheniy, Ucheb. Posobiye [Recognition and digital image processing, Textbook]. Moscow: High School [Higher. School], 1983, 295 p.
3. Sharma G., ul Hussain, Jurie F. Local higher-order statistics (LHS) for texture categorization and facial analysis. Computer Vision – ECCV 2012, 12th European Conference on Computer Vision, Florence, Italy, 2012, Proceedings, Part VII, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 1-12.
4. Oji R., Tajeripour F. Full object boundary detection by applying scale invariant features in a region merging segmentation algorithm. International journal of artificial intelligence & applications (IJAIA), 2012, vol. 3, no. 5, pp. 41-50.
5. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: Speeded up robust features. Computer vision image understanding, 2008, vol. 110, no. 3, pp. 346-359.
6. Chen J. RLBP: Robust Local Binary Pattern. Proceedings of the British Machine Vision Conference. BMVA Press, 2013.
7. Minsky M., Papert S. Perceptrons. MIT Press, Cambridge, MA, 1969.
8. Martin A. Fischler, Robert C. Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Comm. Of the ACM, vol. 24, pp. 381-395.
9. Shapiro L., Stockman J. Komp'yuternoye zreniye [Computer Vision]. Moscow: Binom, Laboratoriya znaniy [Laboratory of Knowledge], 2006, 752 p.
10. Comaniciu D., Meer P. Mean shift: A robust approach towards feature space analysis. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 24: 603–619, 2002.
11. Kim E., Wang W., Li H., Huang X. A parallel annealing method for automatic color cervigram image segmentation. In: Medical Image computing and computer assisted intervention, MICCAI-GRID 2009 HPC Workshop, 2009.
12. Vezhnevets A., Barinova O. Metody segmentatsii izobrazheniy: avtomaticheskaya seg-mentatsiya [Methods of Image Segmentation: Automatic Segmentation]. Komp'yuternaya grafika i mul'timedia [Computer graphics and multimedia], 2006, no. 4.

13. Utrobin V.A. Elementy teorii aktivnogo vospriyatiya izobrazheniy [Elements of the theory of active image perception]. Trudy Nizhegorodskogo gosudartsvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.Ye. Alekseyeva [Proceedings of Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev], 2010, vol. 81, no.2, pp. 61-69.
14. Kondratiev V.V., Zhevnerchuk D.V. Primeneniye metodov teorii samoorganizatsii k zadacham profili-rovaniya i konfigurirovaniya vychislitel'nykh sistem [Application of Methods of Self-Organization Theory to Problems of Profiling and Configuring Computational Systems]. Doklady Mathematics [Reports of Mathematics], Izdatel'stvo Pleyady [Reports of Mathematics], 2014, vol. 90, no. 3, pp. 788-190, ISSN 1064-5624.
15. Jasper RR Uijlings, Koen EA van de Sande, Theo Gevers, Arnold WM Smeulders. Selective search for object recognition. International journal of computer vision, 104(2):154–171, 2013.
16. Felzenszwalb P., Huttenlocher D., Efficient graph-based image segmentation. International Journal of Computer Vision, 2004, vol. 59, no. 2.
17. Geusebroek J.M. Burghouts G.J., Smeulders A.W.M, The Amsterdam library of object images. Int. J. Comput. Vision, 2005, 61(1), pp. 103-112.

Gai Vasily Evgenievich. *Associate Professor at NSTU R.E. Alekseeva, AutorID: 531326, ORCID: 0000-0002-3644-5234, iamuser@inbox.ru.*

Domnina Natalia Alexandrovna. *Senior engineer for software development in the field of computer graphics of Intel A/O, ORCID: 0000-0002-3817-401X, zhestckova.natali@yandex.ru.*

Barinov Roman Olegovych. *Engineer of SKB «Communication and location», ORCID: 0000-0002-0269-3205, barinovr@list.ru.*

Polyakov Igor Vladimirovich. *Assistant at NSTU R.E. Alekseeva, AuthorID: 879102, ORCID: 0000-0002-1492-9350, polyakovigor92@gmail.com.*

Golubenko Vladimir Andreevich. *Intern-software developer of Intel A/O, ORCID: 0000-0002-4683-3249, fullmoonshrine@gmail.com.*

Kuznetsov Georgy Dmitrievich. *Engineer of SKB «Communication and location», ORCID: 0000-0001-5564-045X, gd.smith@yandex.ru.*

Статья поступила в редакцию 14.07.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 15.02.2023.
The article was submitted 07/14/2022; approved after reviewing 09/07/2022; accepted for publication 02/15/2023.

Математическое моделирование в энергетике

УДК 519-7
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.004

Математическое моделирование и численный анализ влияния толщины радиальных рабочих лопаток на долговечность энергетических турбомашин

Репецкий Олег Владимирович, Хоанг Динь Кыонг
Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского,
Россия, Иркутск, *hoangcuonghd95@gmail.com*

Аннотация. Данная статья посвящена компьютерному моделированию и численному анализу изменения толщины лопаток для исследования влияния преднамеренной расстройки на долговечность радиальных рабочих колес энергетических турбомашин. Объектом исследования является радиальное рабочее колесо с 10-ю лопатками, изготовленное фирмой “Schiele”, специализирующейся на производстве агрегатов для химической промышленности и вентиляционного оборудования. Использован метод конечных элементов с применением конечного элемента TET10 из программы ANSYS WORKBENCH. Исследованы несколько вариантов изменения геометрии (толщины лопаток) для анализа прочности рабочих колес, которые могут дать точные прогнозные модели для вынужденной динамической реакции, характеристик расстроенных рабочих колес и оценки ресурса в циклических симметричных системах. Данный анализ является лишь небольшим фрагментом комплексного исследования влияния геометрических и жесткостных параметров на ресурсные характеристики радиальных рабочих колес и выбран из соображений минимального изменения аэродинамических характеристик роторных конструкций. По результатам исследования, два из пяти вариантов показали повышение количества циклов до разрушения рабочего колеса, минимальное процентное изменение массы и собственных частот радиального рабочего колеса. Полученные расчеты позволяются сократить объем дорогостоящих экспериментальных исследований и уменьшить сроки конструирования новых машин по критериям эффективности, надежности, технологии и ресурсосбережения высоконагруженных агрегатов.

Ключевые слова: долговечность, метод конечных элементов, математические модели, преднамеренная расстройка, радиальное рабочее колесо, турбомашин

Цитирование: Репецкий О.В. Математическое моделирование и численный анализ влияния толщины радиальных рабочих лопаток на долговечность энергетических турбомашин / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 44-53. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.004.

Введение. В настоящее время компьютерное прогнозирование фактического ресурса и оценка прочности роторных конструкций компрессоров и турбин являются одними из основных задач при создании новых турбомашин и диагностике роторов с большой наработкой. Сложность оценки прочности и эксплуатационной надежности роторов турбомашин связана с наличием в них высоконагруженных элементов и разнообразием их геометрических форм. Наиболее нагруженными элементами турбомашин являются рабочие лопатки, в которых накапливается повреждаемость от влияния центробежных сил, температурного нагрева и аэродинамического влияния, поэтому обеспечение высокой прочности и долговечности рабочих лопаток является актуальной проблемой современного двигателестроения для авиационной, космической, энергетической, нефте-газовой, автомобильной и многих других отраслей промышленности [1-4].

Несмотря на многочисленные исследования и пристальное внимание к проблеме многоцикловой усталостной долговечности рабочих колес, как промышленных, так и академических, до сих пор отсутствует всеобъемлющее проектное решение этой задачи. На практике в конструкциях всегда возникают отличия между лопатками (по массе, геометрии, материалу и т.д.) из-за технологии изготовления, монтажа, износа при эксплуатации и других факторов.

Все эти малые отличия лопаток, так называемая расстройка параметров, вносят погрешность в численный анализ ресурсных характеристик, по сравнению с идеальными конструкциями. Чаще всего расстройка лопаток является малой величиной с незначительными отклонениями по собственной частоте колебаний и другим параметрам от номинального значения. Однако, исследования разных авторов [1, 5, 6, 7] показывают, что явление расстройки параметров способно оказывать значительное влияние на прочность и долговечность конструкции. Как следует из предыдущих исследований [8, 9], данные радиальные лопатки могут иметь разрушения при достижении $2{,}0938 \cdot 10^5$ циклов на середине входной кромки пера. Также отмечается, что изменение толщины лопатки будет влиять на долговечность радиального рабочего колеса в целом. Для достижения цели повышенной долговечности лопатки в данной работе дополнительно исследуются три варианта изменения толщины лопатки (не более 10%) для анализа ресурсных характеристик радиальных рабочих колес [10]. Конкретно, в каждом варианте предполагается увеличение толщины лопатки на середине пера и уменьшение толщины на двух краях кромки (верхнем и нижнем). Предполагается, что модели уменьшенного порядка расстроенного диска с лопатками эффективны для численного исследования механической конструкции и устранения неисправностей реального рабочего колеса. Следует отметить, что подготовка геометрических и других данных для компьютерного анализа данных конструкций проста, а вычислительное время невелико [11]. Можно утверждать, что расчет на прочность и долговечность лопатки турбин с помощью ЭВМ дает большую глубину исследования, широту охватываемых вопросов, значительно сокращает объем дорогостоящих экспериментальных исследований, уменьшает сроки конструирования новых машин по критериям эффективности, надежности, технологии и ресурсосбережения высоконагруженных агрегатов.

В данной работе использован метод конечных элементов (МКЭ) с применением конечного элемента TET10 и программы ANSYS WORKBENCH для расчета колебаний и долговечности радиального рабочего колеса с целью анализа и прогнозирования ресурсных характеристик. Рассмотрены пять вариантов изменения толщины лопатки (не более 10%) для достижения цели повышения долговечности радиального рабочего колеса [10]. Настоящее локальное исследование является лишь небольшой частью комплексного анализа влияния геометрических факторов и расстройки параметров на ресурсные характеристики данной конструкции [9, 13, 16, 24]. Математические модели учитывают вероятностное моделирование, которое может дать более точные прогнозные распределения для динамической реакции и оценки ресурса лопатки радиальных рабочих колес [1, 12, 13].

Значения расстройки параметров лопаток определяются по формуле [14, 15]:

$$\Delta f_i = \frac{f_{j,i} - \overline{f}_j}{\overline{f}_j}, \tag{1}$$

где $\overline{f}_j$ – среднее значение основных частот j-ой формы колебания; $f_{j,i}$ – частоты j-ой формы колебания лопаток; i = 1,2,…, N (N - количество лопаток).

Уравнения движения с использованием метода конечных элементов для статики и свободных колебаний могут быть представлены в виде [2, 12, 13]:

$$\left(K_E + K_G + K_R\right)\delta = F_\Omega + F_T + F_G, \tag{2}$$

а для свободной вибрации:

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + \left(K_E + K_G + K_R\right)\delta = 0, \tag{3}$$

где δ – вектор перемещений, K_E и M – матрицы жесткости и массы, соответственно, K_G – матрица геометрической жесткости, зависящая от скорости и температуры, K_R – дополни-

тельная матрица жесткости, возникающая в результате вращения, F_Ω, F_T, F_G – векторы, соответствующие силам вращения, температуры и давления газа соответственно, C – матрица демпфирования.

1. Численный анализ изменения толщины лопаток. Метод конечных элементов (МКЭ) представляет собой эффективный численный метод для решения инженерных и физических задач. МКЭ удачно конкурирует с методом граничных элементов за счет преимуществ при анализе конструкций сложной геометрии и задач, где почти каждый элемент исследуемой среды обладает различными свойствами. Подобный анализ выполнен на примере радиального рабочего колеса с 10-ю лопатками [16, 17, 18].

Материал радиального рабочего колеса – сталь, модуль Юнга – $2{,}1 \cdot 10^5$ Мпа, плотность – 7850 кг/м^3, коэффициент Пуассона – 0,3. Конструкция объекта жестко закреплена по ободу диска. В конечно-элементной модели применяется конечный элемент TET10 программы ANSYS WORKBENCH с общим количеством конечных элементов 58382 и 115590 узловыми точками. Количество степеней свободы составляет 346770 (рис. 1).

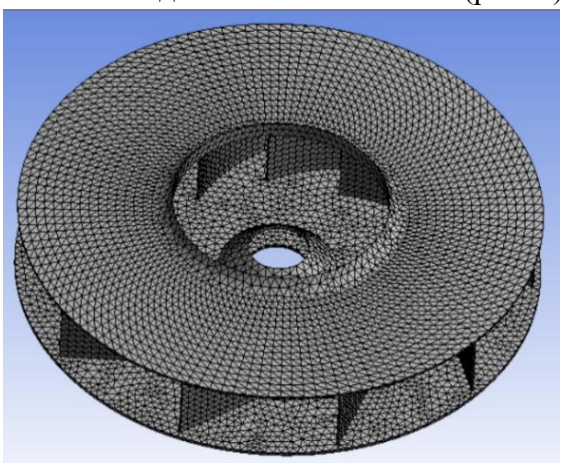


Рис. 1. Конечноэлементная модель радиального рабочего колеса с 10-ю лопатками

На рис. 2 представлены три основных варианта по изменению толщины радиальной лопатки для рассмотрения возможностей повышения долговечности радиального рабочего колеса.

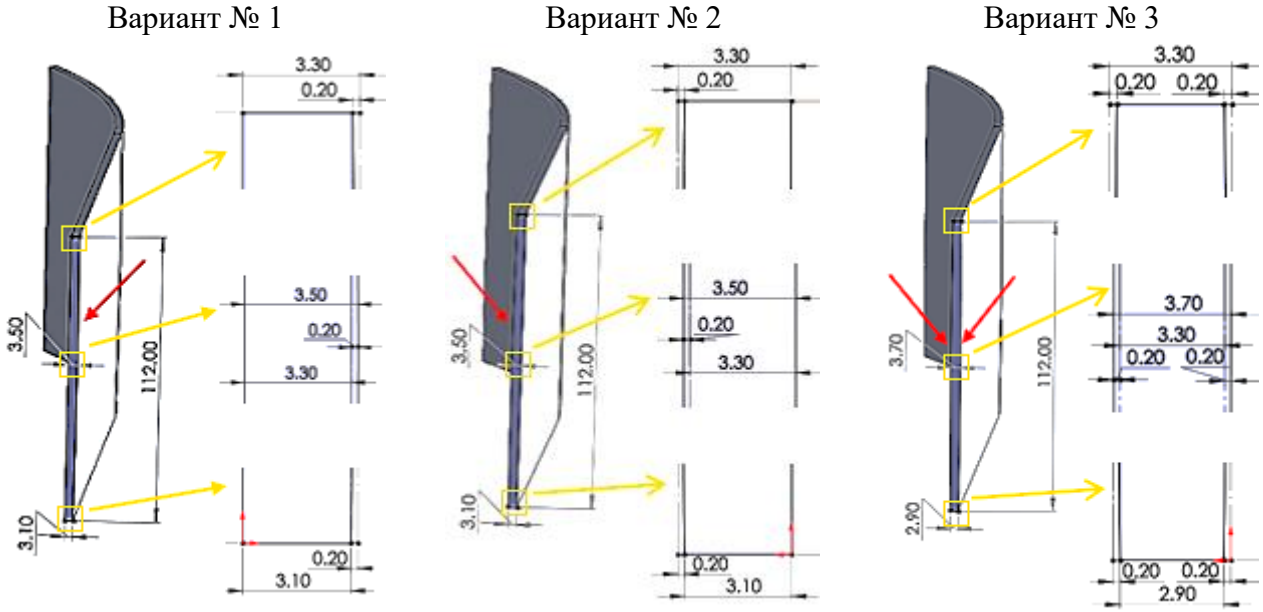


Рис. 2. Варианты изменения толщины радиальной лопатки

В варианте № 1 и 2 предполагается увеличение толщины лопатки на 0,2 мм на середине и уменьшение толщины на 0,2 мм на двух краях кромки. В варианте № 3 толщина лопатки увеличивается на 0,4 мм на середине и уменьшается на 0,4 мм на двух краях кромки. Геометрическая кромка имеется форму окружности по радиусу $R = 3920$ мм. Направленные изменения толщины лопатки помечаются красными стрелками, а изменения геометрических участков указаны желтыми стрелками. Таким образом, в каждом варианте предполагается увеличение толщины лопатки на середине и уменьшение толщины на двух краях кромки (верхнем и нижнем). Толщина радиальной лопатки изменяется на правой стороне лопатки – вариант № 1, на левой стороне лопатки – вариант № 2 и на двух сторонах лопатки – вариант № 3 (рис. 2). Данные варианты изменений связаны с легкостью их технологического получения, небольшими финансовыми затратами и минимальным влиянием на аэродинамические характеристики ступени.

Основные параметры изменения толщины радиальной лопатки показаны в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры изменения толщины радиальной лопатки

Вид лопатки		Основные параметры лопатки			Масса, кг
		Высота, мм	Толщина, мм		
			по центру	по краям кромки	
Исходная лопатка		112	3,3	3,3	0,9888
Предложенная лопатка	Вариант № 1	112	3,5	3,1	1,0089
	Вариант № 2	112	3,5	3,1	1,0087
	Вариант № 3	112	3,7	2,9	1,0288

Анализ таблицы 1 показывает, что масса лопатки в трех вариантах повышается при изменении толщины радиальной лопатки по сравнению с исходной лопаткой. Конкретно, в варианте № 1 масса повышается на 2,03%, в варианте № 2 – на 2,01%, а в варианте № 3 – на 4,05%. Вариант № 2 обладает минимальным процентным изменением массы лопатки.

2. Расчет долговечности лопаток радиальных рабочих колес энергетических турбомашин. В реальных условиях работы примерно 60% отказов двигателей в эксплуатации происходит вследствие разрушения и поломки деталей из-за недостаточной прочности. Поврежденными деталями, как правило, являются высоконагруженные элементы радиальных роторов (лопатки). Из этого количества отказов примерно 70% деталей разрушаются вследствие их вибраций [19, 20]. В лопатках радиальных рабочих колес турбомашин вибрация лопаток влияет на многоцикловую усталость и срок службы двигателя [1, 21]. Поврежденные фрагменты лопастей в результате многоцикловых усталостных отказов могут привести к повреждению и разрушению узлов, частичному или полному отказу двигателя. По этим причинам вибрации лопаток представляют собой основную область исследований в рабочих колесах [22, 23, 24].

В таблице 2 анализируются собственные частоты радиального рабочего колеса. На рис. 3 представлены процентные изменения собственных частот каждого варианта радиального рабочего колеса к исходному варианту с 10-ю лопатками. Результаты исследования собственных частот колебаний радиального рабочего колеса иллюстрируют таблица 2 и рис. 3.

В приведенной таблице 2 и на рис. 3 показано, что собственные частоты радиального рабочего колеса уменьшаются по формам колебаний 0/0; 1/0; 1/1; 2/0 и повышаются по форме колебания 5/0 при изменении толщины лопатки на 0.2 мм, но вариант № 2 обладает минимальным процентным изменением собственных частот по форме колебания 0/0; 1/0; 1/1; 2/0 и максимальным процентным изменением собственных частот для формы колебания 5/0.

Расчет долговечности радиального рабочего колеса по трем вариантам геометрических изменений представлен на рис. 4. Данный расчет количества циклов до разрушения рабочего колеса каждого варианта анализируется в таблице 3.

Таблица 2. Значения собственных частот радиального рабочего колеса

Форма n/m (n-число узловых диаметров, m- окружностей)	Собственные частоты радиального рабочего колеса, Гц		
	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3
0/0	80,440	80,481	79,490
1/0	43,472	43,476	43,213
1/1	392,97	392,90	388,82
2/0	341,98	342,08	339,30
5/0	416,25	416,71	415,87

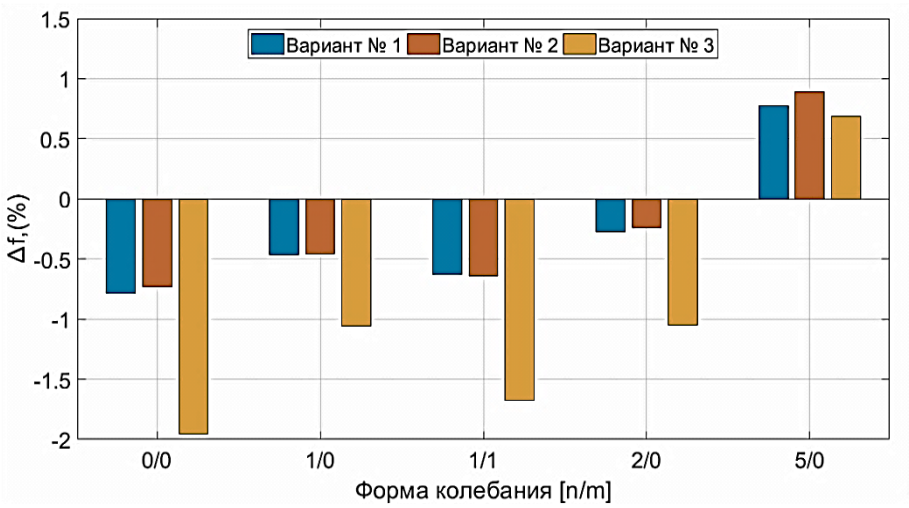


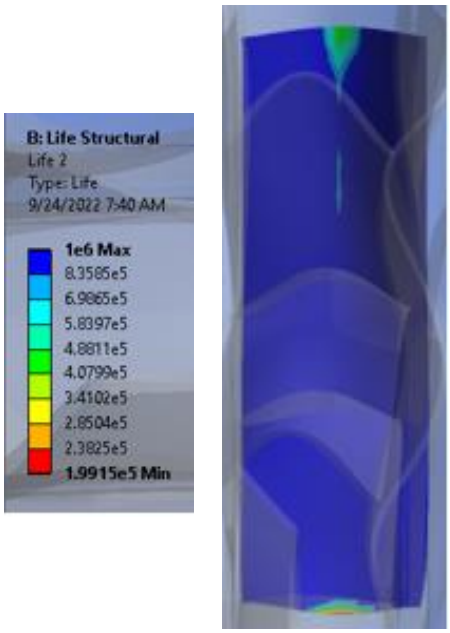
Рис. 3. Процентное изменение собственных частот радиального рабочего колеса

Таблица 3. Значения количества циклов до разрушения рабочего колеса

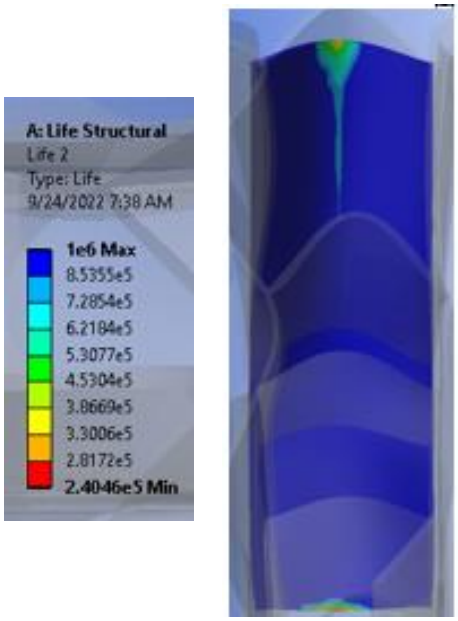
Номер варианта	Вариант при изменении толщины всех лопаток на 0,2 мм	Долговечность (в циклах)	Отклонение от исходной лопатки $\Delta\overline{N}(\%)$
1	С уменьшением по всей лопатке	$1{,}8685 \cdot 10^5$	– 10,76
2	С увеличением по всей лопатке	$2{,}3636 \cdot 10^5$	+ 12,89
3	С увеличением по всей лопатке на 0,2 мм на середине и уменьшением на 0,2 мм на двух краях кромки на правой стороне лопатки (вариант № 1)	$1{,}9915 \cdot 10^5$	– 4,89
4	С увеличением по всей лопатки на 0,2 мм на середине и уменьшением на 0,2 мм на двух краях кромки на левой стороне лопатки (вариант № 2)	$2{,}4046 \cdot 10^5$	+ 14,84
5	С увеличением по всей лопатке на 0,4 мм на середине и уменьшением на 0,4 мм на двух краях кромки на двух сторонах лопатки (вариант № 3)	$2{,}0714 \cdot 10^5$	– 1,07

Расчет долговечности лопаток для двух вариантов (с уменьшением и увеличением по всей лопатке на 0,2 мм) приведен в работе авторов [25]. Расчет долговечности выполнен на основе методики математического моделирования и прогнозирования многоцикловой уста-

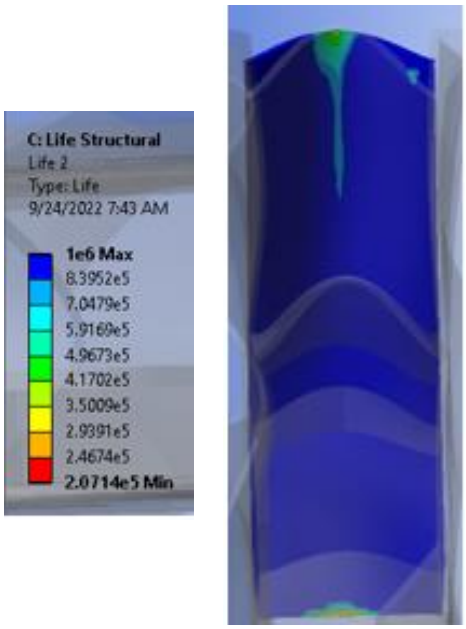
лостной долговечности радиальных рабочих колес турбин с учетом динамической нагрузки, описанной в работе [9].



Вариант № 1



Вариант № 2



Вариант № 3

Рис. 4. Расчет долговечности лопаток радиального рабочего колеса

Результаты исследования пяти геометрических вариантов показали, что при увеличении толщины по всей лопатке на 0,2 мм долговечность конструкции повышается на +12,89%., а при увеличении толщины по всей лопатке на 0,2 мм на середине и уменьшении на 0,2 мм на двух краях кромки на левой стороне (вариант № 2) долговечность лопатки радиального рабочего колеса также повышается до +14,84%. В остальных вариантах долговечность лопатки радиального рабочего колеса уменьшается (рис. 5).

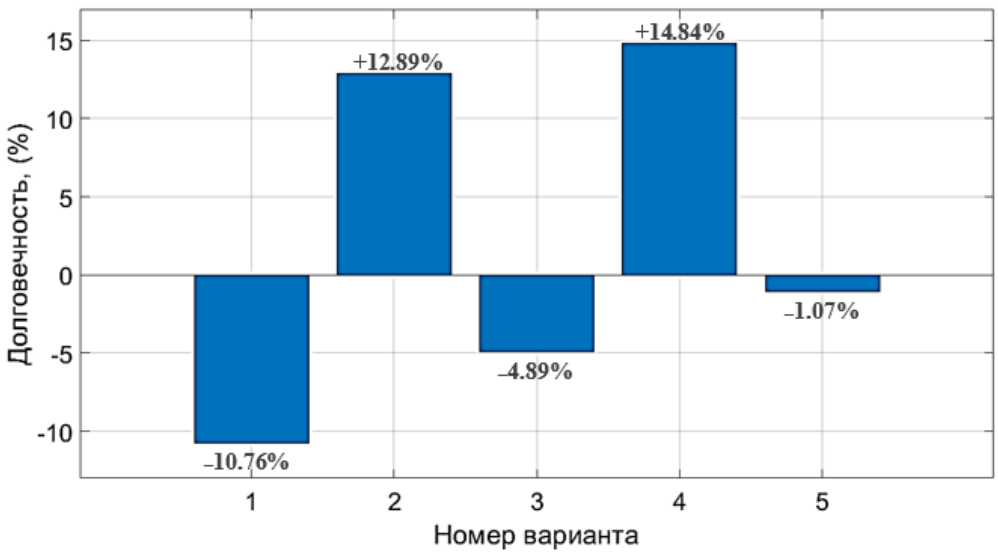


Рис. 5. График распределения долговечности при изменении толщины лопатки на 0,2 мм

Заключение. В настоящей работе представлены результаты оценки долговечности радиального рабочего колеса с 10-ю лопатками. Предложены и проанализированы пять вариантов изменения толщины лопатки. По результатам исследования, два из пяти вариантов демонстрируют повышение количества циклов до разрушения рабочего колеса, а при увеличении толщины на 0,2 мм по всей лопатке на середине и уменьшении на 0,2 мм на двух краях кромки с левой стороны (вариант № 2) получается максимальное увеличение долговечности радиального рабочего колеса до +14,84% по сравнению с другими вариантами. Также, для данного варианта, имеем минимальное процентное изменение массы до +2,01% и минимальное процентное снижение собственных частот радиального рабочего колеса по исследованным формам колебаний. Полученные результаты дополняют комплексное исследование влияния геометрических параметров на ресурс турбомашин. Настоящие результаты численного эксперимента могут использоваться для повышения срока службы двигателей в областях авиационного, энергетического, химического и транспортного машиностроения при небольших финансовых затратах на проектирование и с минимальным изменением аэродинамических характеристик роторных элементов турбомашин.

Список источников

1. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин / А.Г. Костюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 476 с.
2. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
3. Hanschke B., Klauke T., Kühhorn A. The effect of foreign object damage on compressor blade high cycle fatigue strength. ASME Journal of engineering for gas turbines and power, 2017, vol. 7A, 9 p.
4. Weiss T., Voigt M., Schlums H., Mucke R., Becker K.H., Vogeler K. Probabilistic finite-element analyses on turbine blades. ASME Journal of engineering for gas turbines and power, 2009, GT2009-59877, pp. 1-10.
5. Castanier M.P., Pierre C. Modeling and analysis of mistuned bladed disk vibrations: status and engineering directions. Journal of propulsion and powers, 2006, vol. 122, no. 2, pp. 384-396.
6. Beck J.A.J., Brown M., Runyon B., Scott-Emuakpor O.E. Probabilistic study of integrally bladed rotor blends using geometric mistuning models. Aerospace research central AIAA 2017-0860, 2017, pp. 1-12.
7. Schlesier K.D., Scheidt L.P., Wallaschek J. Investigations on transient amplitude amplification by applying intentional mistuning. ASME Journal of engineering for gas turbines and power, 2018, vol. 7C, 9 p.
8. Репецкий О.В. Анализ преднамеренной расстройки параметров при изменении толщины радиальных лопаток турбомашин / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг // Весник НГИЭИ, 2022. – № 3 (130). – С. 7-23.
9. Репецкий О. В. Математическое моделирование и численная оценка долговечности радиальных рабочих колес турбомашин / О. В. Репецкий, Д. К. Хоанг // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника, 2022. – № 69. – С. 53-61.

10. Irretier H., Repetskii O. Vibration and life estimation of rotor structures. International federation for the promotion of mechanism and machine science (IFToMM), 1998, pp. 456-464.
11. Kaneko Y., Takemura M., Mori K., Ooyama H. Stability analysis of mistuned bladed disk of steam turbine blade. Proceedings of international gas turbine congress 2015 Tokyo, 2015, pp. 1397-1404.
12. Beck J.A., Brown J.M., Kaszynski A.A., Gillaugh D.L. Numerical methods for calculating component modes for geometric mistuning reduced-order models. J. Eng. gas turbines power, 2022, no. 3 (144), 031006, 9 p.
13. Репецкий О.В. Компьютерное моделирование и численный анализ чувствительности радиальных колес турбомашин / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг // Вестник НГИЭИ, 2022. – № 7 (134). – С. 22-36.
14. Beirow B., Kühhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetckii O. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning. Proceed. of ASME turbo expo, 2019. – № 1 (141). – GT2018- 76584. – 8 p.
15. Castanier M.P., C. Pierre Using intentional mistuning in the design of turbomachinery rotors. AIAA J, 2002, no. 10 (40), pp. 2077-2086.
16. Repetckii O.V., Hoang D.C. Physical and mathematical modeling and computer analysis of radial impellers for chemical and power engineering, taking into account ecology. IOP conference series: earth and environmental science, 2022, vol. 990, 012044, 6 p.
17. Репецкий О.В. Анализ преднамеренной расстройки параметров при изменении толщины радиальных лопаток турбомашин / О.В. Репецкий, Д.К. Хоанг // Весник НГИЭИ, 2022. – № 3 (130). – С. 7-23.
18. Мяченков В.И. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов/ В.И. Мяченков. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с.
19. Markus W., Johannes E., Oliver V., Ralf L. Automatic numerical analyses and optimization of operating maps applied to a radial compressor. ASME turbo expo 2019: turbomachinery technical conference and exposition, GT2019-91408, V02DT46A014, 12 p.
20. До М. Т. Численный анализ влияния расстройки параметров на динамические характеристики рабочих колес турбомашин: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / До Мань Тунг; Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского. – Иркутск, 2014. – 197 с.
21. Yuan J., Schwingshackl C., Salles L., Wong C., Patsias S. Reduced order method based on an adaptive formulationand its application to fan blade system with dovetail joints. Proceedings of ASME turbo expo, 2020, GT2020-14227, pp. V011T30A004.
22. Scheidt T. L., Wallaschek J. Single nodal diameter excitation of turbine blades: experimental and theoretical study. Journal of engineering for gas turbines and power, 2021, vol. 143, no. 9, 8 p.
23. Yan Y.J., Cui P.L., Hao H.N. Vibration mechanism of a mistuned bladed disk. Journal of sound and vibration, 2008. – Vol. 317. – P. 294-307.
24. Repetskiy O., Ryjikov I. Modeling and simulation of dynamic processes with the help of program package BLADIS+. Innovations and advanced techniques in systems, computing sciences and software engineering, 2008, pp. 219-220.
25. Repetckii O.V., Hoang D.C. Fatigue life of radial turbomachines at changing thickness blades taking into account intentional mistuning. E3S Web of conferences, 2022, vol. 363, 9 p.

Репецкий Олег Владимирович. *Доктор технических наук, профессор, проректор по международным связям Иркутского государственного аграрного университета им. А.А. Ежевского, AuthorID: 118300, SPIN: 6232–8930, ORCID: 0000–0003–2560–2721, repetckii@igsha.ru, 664038, Россия, г. Иркутск, пос. Молодежный.*

Хоанг Динь Кыонг. *Аспирант кафедры «Электрооборудования и физики», Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, AuthorID: 1132852; SPIN: 6487-4299; ORCID: 0000-0003-0232-8723, hoangcuonghd95@gmail.com, 664038, Россия, г. Иркутск, пос. Молодежный.*

UDC 519-7
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.004

Mathematical modeling and numerical analysis of the influence in the thickness blades on the durability of power turbomachines

Oleg V. Repetckii, Dinh Cuong Hoang
Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky,
Russia, Irkutsk, *hoangcuonghd95@gmail.com*

Abstract. This article is devoted to computer modeling and numerical analysis of the change in the thickness blades to study the effect of intentional mistuning on the durability wheels of power turbomachines. The object of the study is a radial wheel with 10 blades manufactured by Schiele (Germany), which specializes in the production aggregates for the chemical industry and ventilation equipment. The finite element method was used the TET10 finite element from the ANSYS WORKBENCH program. Five options in this paper have been provided for running mistuned wheels that can give accurate predictive distributions for forced response, mistuned wheel performance and resource estimation in cyclic symmetrical systems. According to the results of the study, two of the five options showed an increase in the value of the number of cycles to destruction wheels, the minimum percentage change in the mass and natural frequencies of the radial wheel. The obtained calculations make it possible to significantly reduce the volume of expensive experimental studies and reduce the time for designing new machines according to the criteria of efficiency, reliability, technology and resource saving of highly loaded aggregates.

Keywords: durability, finite element method, mathematical models, intentional mistuning, radial wheel, turbomachines

References

1. Kostyuk A.G. Dinamika i prochnost' turbomashin [Dynamics and strength of turbomachines]. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI [MEI Publishing House], 2007, 476 p.
2. Kogayev V. P., Makhutov N. A., Gusenkov A. P. Raschety detaley mashin i konstruktsiy na prochnost' i dolgovechnost' [Calculations of machine parts and structures for strength and durability]. Moscow, Mashinostroenie [Mashinostroenie], 1985, 224 p.
3. Hanschke B., Klauke T., Kühhorn A. The effect of foreign object damage on compressor blade high cycle fatigue strength. ASME Journal of engineering for gas turbines and power, 2017, vol. 7A, 9 p.
4. Weiss T., Voigt M., Schlums H., Mucke R., Becker K.H., Vogeler K. Probabilistic finite-element analyses on turbine blades. ASME Journal of engineering for gas turbines and power, 2009, GT2009-59877, pp. 1-10.
5. Castanier M.P., Pierre C. Modeling and analysis of mistuned bladed disk vibrations: status and engineering directions. Journal of propulsion and powers, 2006, vol. 122, no. 2, pp. 384-396.
6. Beck J.A.J., Brown M., Runyon B., Scott-Emuakpor O.E. Probabilistic study of integrally bladed rotor blends using geometric mistuning models. Aerospace research central AIAA 2017-0860, 2017, pp. 1-12.
7. Schlesier K.D., Scheidt L.P., Wallaschek J. Investigations on transient amplitude amplification by applying intentional mistuning. ASME Journal of engineering for gas turbines and power, 2018, vol. 7C, 9 p.
8. Repetskii O.V., Hoang D.C. Analiz prednamerennoy rasstroyki parametrov pri izmenenii tolshchiny radial'nykh lopatok turbomashin [Analysis of intentional mistuning parameters when changing the thickness of radial blades turbomachines]. Vesnik NGIEI [Bulletin of NGIEI], 2022, vol. 130, no. 3, pp. 7-23.
9. Repetskii O.V., Hoang D.C. Matematicheskoye modelirovaniye i chislennaya otsenka dolgovechnosti radial'nykh rabochikh koles turbomashin.[Mathematical modeling and numerical evaluation of the durability of radial wheels turbomachines]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering], 2022, no. 69, pp. 53-61.
10. Irretier H., Repetskii O. Vibration and life estimation of rotor structures. International federation for the promotion of mechanism and machine science (IFToMM), 1998, pp. 456-464.
11. Kaneko Y., Takemura M., Mori K., Ooyama H. Stability analysis of mistuned bladed disk of steam turbine blade. Proceedings of international gas turbine congress 2015 Tokyo, 2015, pp. 1397-1404.
12. Beck J.A., Brown J.M., Kaszynski A.A., Gillaugh D.L. Numerical methods for calculating component modes for geometric mistuning reduced-order models. J. Eng. gas turbines power, 2022, no. 3 (144), 031006, 9 p.
13. Repetskii O.V., Hoang D.C. Komp'yuternoye modelirovaniye i chislennyy analiz chuvstvitel'nosti radial'nykh koles turbomashin [Computer simulation and numerical analysis of the sensitivity of radial wheels turbomachines]. Vestnik NGIEI [Bulletin of NGIEI], 2022, vol. 134, no. 7, pp. 22-36.

14. Beirow B., Kühhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetckii O. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning. Proceed of ASME turbo expo, 2019, № 1 (141), GT2018- 76584, 8 p.
15. Castanier M.P., C. Pierre Using intentional mistuning in the design of turbomachinery rotors. AIAA J, 2002, no. 10 (40), pp. 2077-2086.
16. Repetckii O.V., Hoang D.C. Physical and mathematical modeling and computer analysis of radial impellers for chemical and power engineering, taking into account ecology. IOP conference series: earth and environmental science, 2022, vol. 990, 012044, 6 p.
17. Repetskii O.V., Hoang D.C. Analiz prednamerennoy rasstroyki parametrov pri izmenenii tolshchiny radial'nykh lopatok turbomashin [Analysis of intentional mistuning parameters when changing the thickness of radial blades turbomachines]. Vesnik NGIEI [Bulletin of NGIEI], 2022, vol. 130, no. 3, pp. 7-23.
18. Myachenkov V.I. Raschety mashinostroitel'nykh konstruktsiy metodom konechnykh elementov [Calculations of machine-building structures by the finite element method]. Moscow, Mashinostroyeniye [Mashinostroenie], 1989, 520 p.
19. Markus W., Johannes E., Oliver V., Ralf L. Automatic numerical analyses and optimization of operating maps applied to a radial compressor. ASME turbo expo 2019: turbomachinery technical conference and exposition, GT2019-91408, V02DT46A014, 12 p.
20. Do M.T. Chislennyy analiz vliyaniya rasstroyki parametrov na dinamicheskiye kharakteristiki rabochikh koles turbomashin: dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Numerical analysis of the influence of parameter mistuning on the dynamic characteristics of the wheels turbomachines: dissertation for the degree of candidate of technical sciences] / Do Man' Tung: Irkutskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet im. A.A. Yezhevskogo [Irkutsk State Agrarian University. A.A. Yezhevsky], Irkutsk, 2014, 197 p.
21. Yuan J., Schwingshackl C., Salles L., Wong C., Patsias S. Reduced order method based on an adaptive formulationand its application to fan blade system with dovetail joints. Proceedings of ASME turbo expo, 2020, GT2020-14227, pp. V011T30A004.
22. Scheidt T. L., Wallaschek J. Single nodal diameter excitation of turbine blades: experimental and theoretical study. Journal of engineering for gas turbines and power, 2021, vol. 143, no. 9, 8 p.
23. Yan Y.J., Cui P.L., Hao H.N. Vibration mechanism of a mistuned bladed disk. Journal of sound and vibration, 2008, vol. 317, p. 294-307.
24. Repetskiy O., Ryjikov I. Modeling and simulation of dynamic processes with the help of program package BLADIS+. Innovations and advanced techniques in systems, computing sciences and software engineering, 2008, pp. 219-220.
25. Repetckii O.V., Hoang D.C. Fatigue life of radial turbomachines at changing thickness blades taking into account intentional mistuning. E3S Web of conferences, 2022, vol. 363, 9 p.

Oleg V. Repetckii. *Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for International Relations, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, AuthorID: 118300, SPIN: 6232-8930, ORCID: 0000-0003-2560-2721, repetckii@igsha.ru, 664038, Russia, Irkutsk, Molodezhny settlement.*

Dinh Cuong Hoang. *Postgraduate student of the Department «Electrical power and physics», Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, AuthorID: 1132852, SPIN: 6487-4299, ORCID: 0000-0003-0232-8723, hoangcuonghd95@gmail.com, 664038, Russia, Irkutsk, Molodezhny settlement.*

Статья поступила в редакцию 19.10.2022; одобрена после рецензирования 10.02.2023; принята к публикации 09.03.2023.

The article was submitted 10/19/2022; approved after reviewing 02/10/2023; accepted for publication 03/09/2023.

УДК 519.216.3
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.005

Методология прогнозирования спроса на энергию в сегменте водного транспорта с учетом межтопливной конкуренции

Куклина Анна Константиновна
Институт энергетических исследований РАН,
Россия, Москва, *kuklinaak@eriras.ru*

Аннотация. В статье представлено описание экономико-математической модели для прогнозирования глобального спроса на энергию в сегменте водного транспорта с детализацией по странам, регионам и категориям судов. Модель сочетает в себе различные подходы к прогнозированию и моделированию, в том числе с использованием методов регрессионного анализа, и формирует прогнозирование спроса на основе выявленных устойчивых корреляций между энергоемкостью водного транспорта и экономико-демографическими показателями. Кроме того, в модели реализовано моделирование прогнозируемого межтопливного перехода с традиционных нефтяных топлив на альтернативные с учетом стоимости владения судами с различными видами топлива, цен на выбросы и других параметров. Ключевым отличием разработанной модели от существующих аналогов является возможность расчета всей мировой потребности в судовом топливе по крупным агрегатным показателям (значительная часть существующих моделей рассчитана исключительно на расчет потребности в топливе с одного судна, ближайший аналог является моделью МЭА) [1]. Разработанная в ИНЭИ РАН методика, основанная на установлении статистических связей с техническими характеристиками водного транспорта в разрезе категорий судов, позволяет не только рассчитать прогноз на несколько лет вперед, но и оценить перспективность использования альтернативных видов топлива при текущих экологических требованиях. Результаты расчетов, полученные по данной модели, могут представлять интерес для научных организаций, судовладельцев и производителей судового топлива.

Ключевые слова: межтопливная конкуренция, водный транспорт, прогнозирование, потребление топлива

Цитирование: Куклина А.К. Методология прогнозирования спроса на энергию в сегменте водного транспорта с учетом межтопливной конкуренции / А.К. Куклина // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 54-63. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.005.

Введение. Водный транспорт занимает порядка 3% в структуре конечного потребления энергоресурсов в мире по итогам 2019 г. [2]. Водный транспорт способен доставлять грузы большого объема на дальние расстояния при минимальных затратах, что делает его более востребованным в логистических цепочках поставок товара относительно прочих видов транспорта. Это способствуют ежегодному росту спроса на данный вид транспорта, благодаря чему наблюдается рост численности кораблей и, как результат, – потребления топлива.

До сегодняшнего момента основными видами судового топлива являлись мазут и дизельное топливо (ДТ) (нефтепродукты), и, как таковой, межтопливной конкуренции не наблюдалось. Однако, учитывая последние мировые тенденции в области декарбонизации экономики, в частности, ограничения по выбросам серы, введенные Международной морской организацией для большей части мировых акваторий, стимулируется развитие альтернативного топлива для морского транспорта [3, 4, 5].

В качестве альтернативы высокосернистому мазуту и ДТ мировым сообществом рассматриваются следующие более экологичные виды топлив: СПГ, водород, метанол и биотопливо [6]. Однако, переход на них должен быть обоснован не только из соображений их экологичности, но и с точки зрения экономической целесообразности для судовладельцев, что обусловливает актуальность проведения исследований по перспективам замещения нефтяных топлив альтернативными, с учетом параметров межтопливной конкуренции (стоимости владения суднами с учетом штрафов, стоимости топлив и пр.). Такие исследования актуальны как на уровне судовых компаний – в целях улучшения собственной экономики, так и на уровне макропрогнозирования в целях учета потенциальных изменений в особенно-

стях формирования топливной корзины сектора и построения глобальных топливно-энергетических балансов, прогнозов нефтяной и смежных отраслей [7].

Кроме того, важно понимать, что порядка 50% производимого мазута используется именно как судовое топливо и переход на более экологичную альтернативу в морском транспорте способен изменить структуру нефтепродуктовой корзины и, как итог, снизить рентабельность НПЗ, ориентированных на выпуск темных фракций. В связи с этим прогнозирование потребления топлива морским транспортом, а именно, структуры спроса на топливо, с учетом вводимых экологических инициатив, является способом оценить возможные риски и для нефтеперерабатывающей отрасли.

Современные подходы к прогнозированию спроса именно в морском транспорте, описанные в большинстве статей, ориентируются на машинное обучение, которое требует большого объема данных. Более того, в рассмотренных исследованиях прогнозы, зачастую, строятся для 1-2 судов, максимум на 1 рейс, и, соответственно, без учета межтопливной конкуренции [8, 9, 10]. Это позволяет заключить, что фактически на сегодняшний день отсутствуют методики оценки глобального спроса на топливо морским транспортом на длительную перспективу. Методика, представленная в данной работе, является усовершенствованным подходом к прогнозированию, так как учитывает возможность межтопливного переключения с учетом всех экологических и экономических реалий, а также позволяет рассчитать спрос по определенным категориям судов.

1. Методология. Методологически, построение прогноза потребления судового топлива, с учетом межтопливного переключения, можно разделить на 2 блока (рис. 1).

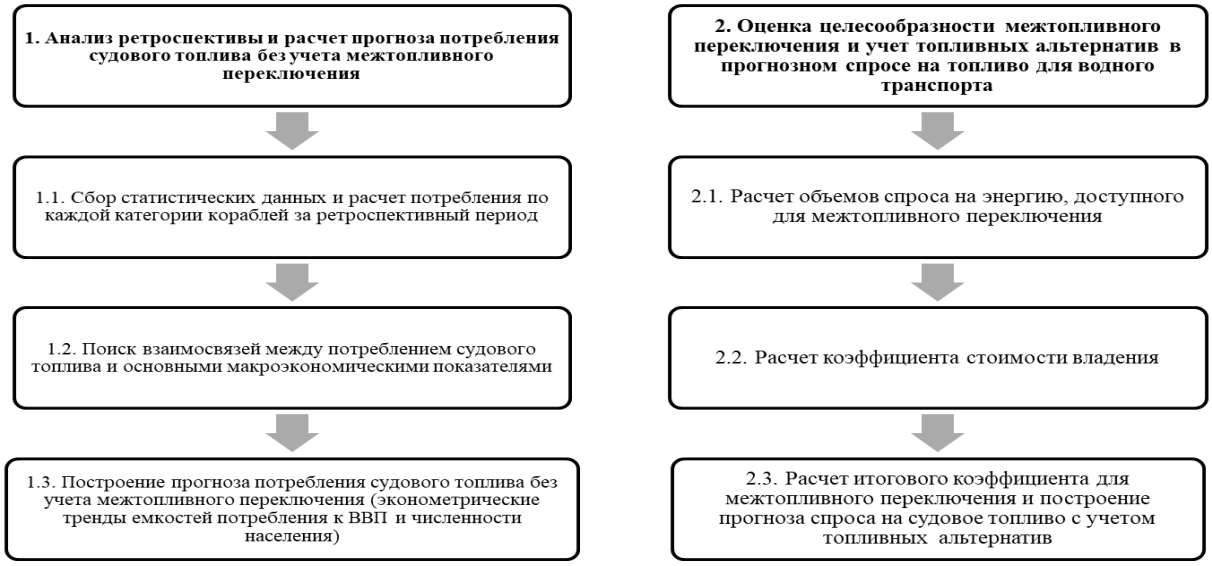


Рис. 1. Схема этапов проведения расчета прогноза спроса на энергоресурсы водным транспортом с учетом межтопливного переключения

Для реализации задач первого блока была проанализирована научная литература в области построения прогнозов потребления судового топлива. Основная часть современных работ, написанных на эту тему, затрагивает методологию машинного обучения и описывает зависимость потребления топлива от большого числа переменных, содержащихся в бортовых журналах кораблей. В частности, используются данные о скорости корабля, КПД двигателя, высоте волн, времени в пути, скорости ветра на различных участках рейса, дедвейте и пр. Учет всех этих параметров за каждые 30 мин. пребывания корабля в плавании позволяет с большей точностью определить объемы потребления топлива для будущих рейсов. Однако, очевидный минус данного подхода заключается в том, что расчет производится для единичного корабля и одного его рейса. В случае с прогнозированием глобального спроса на дли-

тельную перспективу как для отдельно взятых стран, так и для мира в целом, использование данного подхода не видится возможным из-за большого набора данных, который не предоставляется в открытом доступе.

Однако, обзор имеющейся литературы позволил также определить наиболее часто встречающиеся переменные при расчете прогноза потребления судового топлива, к которым относятся: скорость корабля, время в пути и дедвейт. На основании этого была выявлена формула (1), описывающая данный вид взаимосвязи:

$$FC = 2192{,}2 + 15{,}37 \cdot NM + 26{,}9 \cdot HRS - 1722{,}61 \cdot DWT, \quad (1)$$

где:

- FC – потребление топлива морским транспортом в литрах;
- NM – пройденное судном расстояние в морских милях;
- HRS – время судна в пути в часах;
- DWT – дедвейт судна в млн т.

Учитывая то, что каждый вид морского транспорта потребляет различные объемы топлива и для каждой категории кораблей имеются свои параметры межтопливного переключения, ретроспективное потребление судового топлива при помощи вышеописанной формулы подразделяется в соответствии с типами кораблей.

Данные по спросу на судовое топливо для каждой страны, без учета категорий кораблей, публикуются МЭА. Статистика о количестве кораблей и их дедвейте для каждой категории судов, стран и регионов, публикуется на сайте Конференции ООН по торговле и развитию (ЮНКТАД). Согласно данным ЮНКТАД, морской флот делится на следующие категории судов:

- нефтяные танкеры;
- балкеры:
- генеральный груз;
- контейнеровозы;
- прочие.

Для удобства расчетов литры, в которых считается потребление топлива, согласно вышеописанной формуле (1), переводятся в т н.э. (тонны нефтяного эквивалента). Переводной коэффициент из литров в т н.э. составляет 0,83, что соответствует среднему значению плотности судового мазута [11]. Таким образом, формируется ретроспективная величина совокупного спроса на топливо морским транспортом по каждой категории кораблей, стране и миру в целом (рис. 2).

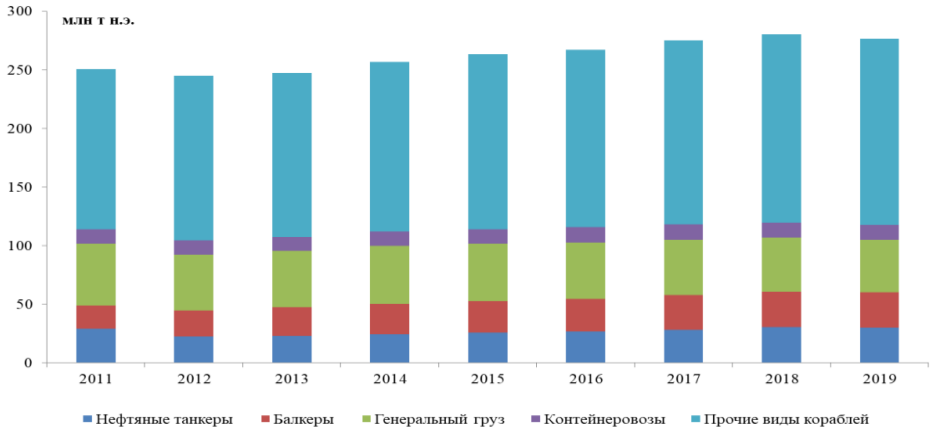


Рис. 2. Потребление энергии водным транспортом по категориям кораблей за 2011-2019 гг. по миру, млн т.н.э.

Учитывая тот факт, что на морской транспорт приходится более 90% мирового товарооборота, логично предположить, что спрос на судовое топливо, помимо технических характеристик самих кораблей, имеет зависимость от темпов экономического роста и населения в каждой стране, т.е. рост населения и его благосостояния приводит к росту потребления различного рода товаров. Для установления степени взаимосвязи потребления топлива морским транспортом с ВВП и населения производится расчет коэффициентов корреляции по каждой стране и категории кораблей. Статистика ВВП берется из отчетов Международного Валютного Фонда, населения – из прогноза ООН [12, 13].

После расчета корреляции страны и категории кораблей делятся на 2 типа: корреляция > 0,5 и корреляция < 0,5.

В том случае, когда корреляция превышает 0,5, производится расчет энергоемкости (отношение потребления топлива каждой категории кораблей, за исключением нефтяных танкеров, к ВВП) и потребления судового топлива на душу населения и определяется тренд на прогнозный период (прогноз ВВП рассчитывается ИНЭИ РАН). После этого, если коэффициенты корреляции и по ВВП, и по населению для определённой страны и категории кораблей превышают 0,5, тренды по энергоемкости и душевому потреблению совмещаются, путем поиска средневзвешенной величины спроса на судовое топливо. В случае, если значение коэффициента корреляции превышает 0,5 только в случае с ВВП либо населением, прогноз строится на основании тренда энергоемкости, либо душевого потребления, путем перемножения полученных величин энергоемкости/душевого потребления на прогноз ВВП, либо населения. Если же величина корреляции меньше 0,5, тренд протягивается от значений потребления судового топлива в ретроспективе.

Для нефтяных танкеров применяется иная методология. Изменение потребления топлива нефтяными танкерами напрямую зависит от баланса спроса и предложения нефти и нефтепродуктов на мировом рынке. В связи с этим коэффициент корреляции для данной категории кораблей определялся, исходя из зависимости между потреблением топлива танкерами и экспортом-импортом углеводородного сырья в определенную страну и регион. Минимальным значением коэффициента корреляции, для более достоверного прогнозирования, было принято 0,7.

В том случае, когда корреляция превышает 0,7, производится расчет энергоемкости экспорта и импорта и определяются тренды на прогнозный период (на основании прогноза ИНЭИ РАН по экспорту и импорту углеводородного сырья). После этого тренды по энергоемкости экспорта и импорта совмещаются путем поиска средневзвешенного коэффициента. По нему в дальнейшем рассчитывается потребление топлива.

Если же коэффициент корреляции оказывается ниже порогового значения, прогнозное потребление моделируется на основании тренда от ретроспективных показателей потребления топлива танкерами.

Таким образом, мы получаем прогнозный спрос на судовое топливо до 2060 г. без учета межтопливного переключения рис. 3.

В основе реализации задач 2-го блока методологии прогнозирования спроса на судовое топливо лежит предположение о том, что ежегодное обновление флота составляет 2% по каждой категории кораблей.

Вводимые в эксплуатацию 2% более энергоэффективны и обладают возможностью использования топливных альтернатив. Учитывая то, что потребитель на рынке теоретически рационален и каждый стремится минимизировать свои издержки (в данном контексте – стоимости владения судами), межтопливное переключение с традиционных для сектора мазута и ДТ на другие энергоносители целесообразно лишь в том случае, если альтернативные виды

транспорта являются конкурентоспособными по стоимости владения судном с традиционными [14].

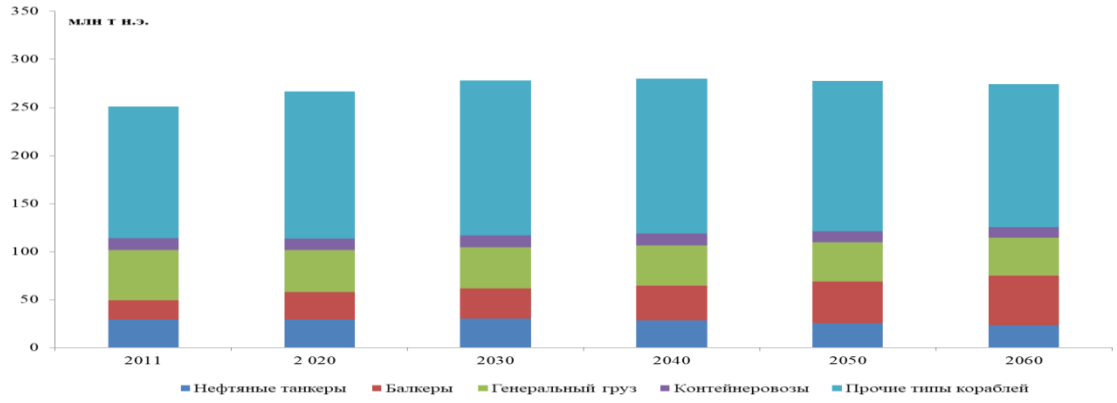


Рис. 3. Прогноз спроса на энергию на судовое топливо по категориям кораблей до 2060 г., млн т.н.э.

В данной методологии оценка межтопливной конкуренции производилась по следующим видам судового топлива:

- мазут высокосернистый;
- комбинация использования высокосернистого мазута и скруббера (система улавливания механических и химических примесей);
- дизтопливо;
- СУГ (сжиженный углеводородный газ);
- СПГ (сжиженный природный газ);
- метанол;
- водород (электроэнергия);
- атом.

Для осуществления расчета приведенной среднегодовой стоимости владения, на первом этапе все категории кораблей делятся на две группы: большие и малые. К большим кораблям отнесены нефтяные танкеры, балкеры, General Cargo и контейнеровозы, к малым – прочие категории кораблей.

Далее, для каждого типа кораблей и вида топлива производится расчет среднегодовой стоимости потребления судового топлива, затрат на двигатели и штрафов за выбросы.

Цена топлива рассчитывается, исходя из текущих рыночных цен, и прогнозируется на основании общемировых тенденций. Среднегодовая величина штрафов за выбросы определяется на основании данных об объеме выбросов по каждому виду топлива и величине платы за единицу загрязняющего вещества.

Объем выбросов приводится, для удобства расчета, к CO_2 эквиваленту по коэффициенту 100-летнего потенциала глобального потепления (ПГП) (табл. 1) [15].

Таблица 1. Выбросы в CO_2 эквиваленте 100-летнего ПГП, гр/гр.

Наименование топлива	CO_2	CH_4	NOx	PM
Мазут (высокосернистый)	3,114	0,0014	0,0477	0
Дизельное топливо	3,206	0,0014	0,0477	0
СПГ	3,03	0	0,02915	0
СУГ	2,75	1,428	2,12	0
Водород (серый)	0	0	0	0
Метанол	1,375	0	0	0
Скруббер	3,114	0,0014	0,0477	0

Плата за выбросы SO_x – это разовый штраф, максимальный размер которого достигает 1000000 долл. в Швеции. Данная величина штрафа в настоящем исследовании установлена по всем странам, которые приняли обязательства Международной морской организации по использованию судового топлива с содержанием серы, не превышающим 0,1% м/м (зоны контроля за выбросами – SECA), и равна 0 за пределами зоны контроля за выбросами в атмосферу. Стоимость CO_2 устанавливается, исходя из долгосрочных национальных планов государств по снижению выбросов в атмосферу.

Полученные данные по большим и малым кораблям подставляются в формулу, и рассчитывается приведенная среднегодовая стоимость владения (2):

$$ПССВ_{n,k} = P \cdot Q_{n,k} + P_{SOx} + P_{CO2} \cdot \left(Q_{CO2} + Q_{CH4} + Q_{NOx}\right) \cdot Q_{n,k} + \frac{CAPEX_{S(n,k)} + CAPEX_{E(n,k)}}{T_n} \quad (2)$$

где ПССВ – приведенная среднегодовая стоимость владения

- P – цена определённого вида топлива, млн долл.;
- n – тип корабля;
- k – тип топлива;
- $Q_{n,k}$ – годовой объем расхода топлива типа k, 1 кораблем категории n, млн т н.э.;
- P_{SOx} – плата за выбросы SOx, млн долл.;
- PCO_2 – плата за выбросы CO_2, млн долл.;
- QCO_2+QCH_4+QNOx – сумма объемов выбросов двуокиси углерода, метана и оксида азота в расчете гр/гр от потребления топлива определенного вида в CO_2 эквиваленте 100-летнего потенциала глобального потепления (ПГП);
- $CAPEX_{S(n,k)}$ + $CAPEX_{E(n,k)}$ – сумма капитальных затрат на установку скруббера и двигателя, корабля типа n и топлива типа k, млн долл.;
- T_n – срок эксплуатации единицы морского транспорта.

Расчет приведенной среднегодовой стоимости владения позволяет увидеть диапазон затрат определенной категории кораблей, при использовании различного вида топлива (высокосернистый мазут, дизельное топливо, СПГ, СУГ и т.д.) (рис. 4).

Этот диапазон служит основой для расчета коэффициента владения:

- из данного диапазона выбирается минимальное значение, которое выступает в роли делимого;
- в качестве делителя принимаются все значения приведенной среднегодовой стоимости владения в выбранном диапазоне, по отдельности;
- получаемое в результате арифметических вычислений частное и будет являться коэффициентом владения.

Значение расчетного коэффициента стоимости владения для каждого типа топлива лежит в интервале $0 < К_{владения} \leq 1$, где наиболее выгодным вариантом является тот вид судового топлива, которому присваивается значение коэффициента, равное 1.

Коэффициент владения рассчитывается отдельно для каждого периода, и изменения величины штрафов за выбросы, стоимости топлива и пр. условий, ведут к изменению значений коэффициента владения (табл. 2).

Завершающим этапом второго блока является расчет итогового коэффициента переключения и построение прогноза спроса на судовое топливо с учетом межтопливной конкуренции.

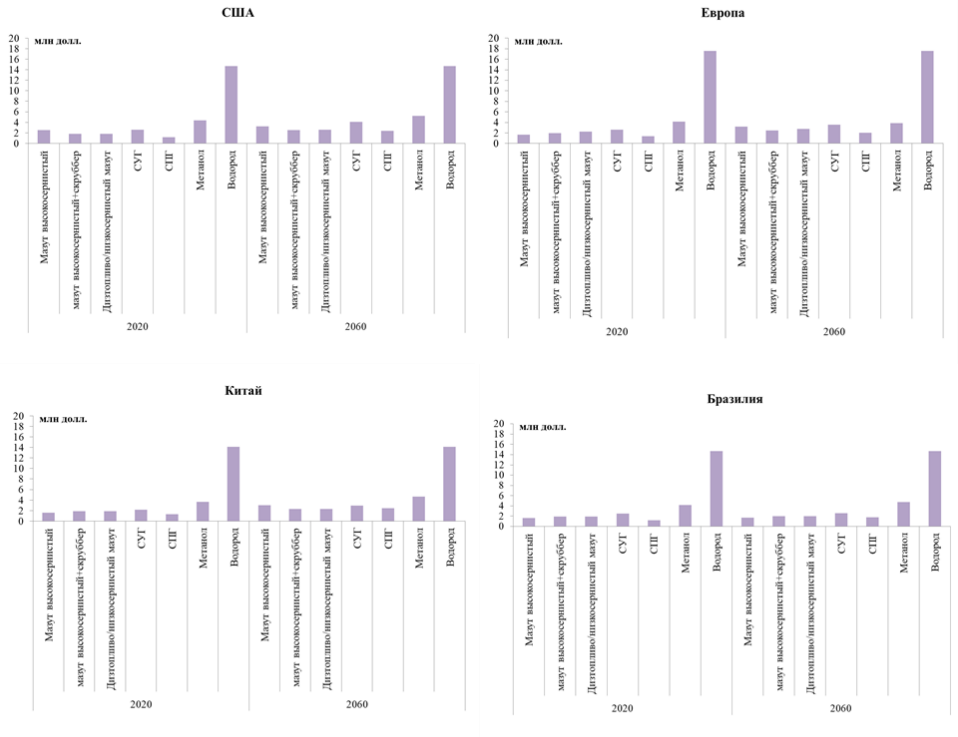


Рис. 4. Приведенная среднегодовая стоимость владения нефтяными танкерами в 2020 и 2060 гг. при условии использования различных видов судового топлива для США, Европы, Китая и Бразилии, млн долл. 2020 г.

Коэффициент переключения рассчитывается по следующей формуле (3):

$$K_{переключения} = \frac{K_{владения\ n,k}}{\sum K_{владения\ n}} \cdot K_{инфраструктуры\ k} \quad (3)$$

где

- n – категория кораблей;
- k – вид судового топлива;
- $K_{инфраструктуры}$ – коэффициент инфраструктуры топлива типа k.

Таблица. 2. Динамика коэффициентов владения за период 2020-2060 гг. на примере США для нефтяных танкеров

Нефтяные танкеры	2020	2030	2040	2050	2060
Мазут высокосернистый	0,471	0,722	0,710	0,733	0,737
мазут высокосернистый+скруббер	0,654	0,946	0,916	0,940	0,941
Дизтопливо/низкосернистый мазут	0,648	0,925	0,893	0,921	0,921
СУГ	0,448	0,605	0,577	0,587	0,584
СПГ	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Метанол	0,270	0,409	0,428	0,447	0,456
Водород	0,080	0,145	0,150	0,158	0,162

Коэффициент инфраструктуры принимает значения 1 либо 0. Фактически он отображает возможность в каждой стране и регионе использовать тот или иной вид топлива. К примеру, Норвегия начала строительство завода по производству водорода, что позволяет говорить о том, что в стране имеются инфраструктурные предпосылки для развития данного вида топлива. Соответственно, коэффициент инфраструктуры для водорода в Норвегии равен 1. В свою очередь, на момент проведения исследования, нет никаких планов строительства мощ-

ностей по производству водорода в Австрии, что соответствует коэффициенту инфраструктуры, равному нулю.

Рассчитанные коэффициенты переключения по каждой категории кораблей, всем видам топлива, странам и регионам умножаются на потребление топлива новыми кораблями в каждой стране и регионе. Таким образом, мы получаем прогноз спроса на судовое топливо с учетом межтопливной конкуренции до 2060 г.

2. Результаты и обсуждение. Произведенный расчет прогноза потребления топлива в морском транспорте позволяет наглядно продемонстрировать, что вплоть до 2060 г. нефть будет играть доминирующую роль на рынке судового топлива (рис. 5).

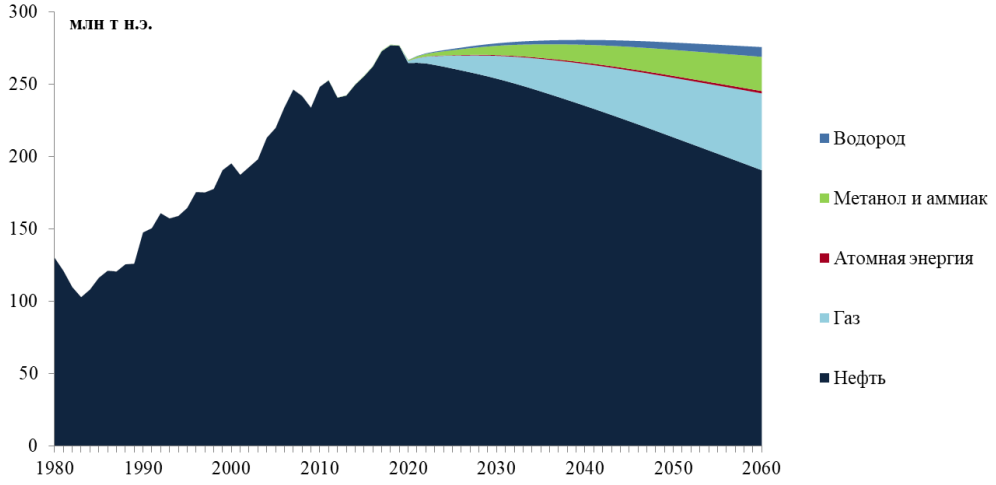


Рис. 5. Прогноз спроса на судовое топливо в разрезе до 2060 г., млн т.н.э.

Более энергоэффективные двигатели позволяют, несмотря на рост числа кораблей, снизить совокупное потребление с 277 млн т н.э. в 2019 г. до 274,2 млн т н.э. в 2060 г. Однако, за счет стран с развитой экономикой, наблюдается значительный прирост использования в качестве топлива газа и биоэнергии. За рассмотренные 40 лет доля газа растет с менее чем 1% в 2019 г. до 17% в 2060 г. Доля биотоплива так же возрастает, с менее чем 1% в 2019 г. до 16% в 2060 г. В силу высокой стоимости владения, водород является наименее конкурентоспособным: его доля в 2060 г. составляет порядка 3%.

Заключение. Основное преимущество разработанной методики заключается в том, что для составления прогноза используется незначительный набор данных, кроме того, методика позволяет учесть изменение факторов межтопливной конкуренции (через стоимости владения суднами различных категорий), влияние на потребление топлив и структуру топливного баланса сектора платы за различные загрязняющие выбросы, как за введенные штрафы за выбросы оксидов серы, так и потенциально возможные к внедрению в ряде государств: плату за выбросы оксидов углерода, азота и пр. Расчет производится путем понятных статистических, эконометрических и математических формул.

Первая расчетная апробация предложенной методики показала, что в ближайшие 40 лет нефтепродукты останутся доминирующим топливом в структуре энергобаланса сектора морской транспортировки, а среди всех имеющихся на данный момент альтернатив традиционным мазуту и дизелю, наилучшие перспективы имеют газ (в виде СПГ), а также метанол и аммиак, в то время как водород в обозримом будущем не займет значимого места в топливной корзине сектора.

Полученные результаты могут представлять интерес как для научного сообщества, так и для компаний – производителей нефтепродуктов: модель учитывает риски для нефтепродуктов и позволяет адекватно оценивать перспективы использования углеводородов в каче-

стве судового топлива, что обеспечивает более полное отображение степени межтопливной конкуренции.

Список источников

1. IEA (International energy agency. World energy model documentation, EIA, Paris, 2021, available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/932ea201-0972-4231-8d81-356300e9fc43/WEM_Documentation_WEO2021.pdf.
2. IEA (International energy agency). World energy outlook 2020, EIA, Paris, 202), available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72d8abf-de08-4385-8711-b8a062d6124a/WEO2020.pdf.
3. MEPC (Marine environment protection committee). Guidelines for calculation of reference lines for use with the energy efficiency design index (EEDI), Resolution MEPC.215(63), 2013, annex 14, pp. 1-12, available at: https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/eedi/11_231(65).pdf.
4. IEA (International energy agency). International shipping, EIA, Paris, available at: https://www.iea.org/fuels-and-technologies/international-shipping.
5. EPA (United States environmental protection agency). Port operational strategies: vessel speed reduction, EPA: office of transportation and air quality, 2021, available at: https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P10119QQ.PDF?Dockey=P10119QQ. pdf.
6. Makarov A.A., Grigoriev L.M., Mitrova T.A. Global and Russian energy outlook 2016, ERI RAS – ACRF, Moscow, 2016, ISBN 978-5-91438-025-7.
7. Wärtsilä LNG as a marine fuel boosts profitability while ensuring compliance. Services business white paper, 2017, available at: https://www.wartsila.com/insights/whitepaper/lng-as-a-marine-fuel-boosts-profitability-while-ensuring-compliance.
8. Uyanik T., Arslanoglu Y., Kalenderli O. Ship fuel consumption prediction with machine learning, 4th International Mediterranean science and engineering congress (Alanya-Antalya), 2019, pp. 757-759.
9. Kim Y-R., Jung M., Park J-B. Development of a fuel consumption prediction model based on machine learning using ship in-service data. Journal of marine science and engineering, 2021, vol. 9(2), p 137, DOI:10.3390/jmse9020137.
10. Kee K.K., Boung –Yew S. L., King-Hwa Y.R. Prediction of ship fuel consumption and speed curve by using statistical method, Journal of computer science & computational mathematics, 2018, vol. 8, issue 2 (Kuala Lumpur: SANDKRS sdn bhd), pp. 19-24, DOI: 10.20967/jcscm.2018.02.002.
11. Boye F. Development of a bunker norm for ships. Danish environmental protection agency, environmental project, no. 428, 1998, available at: https://www2.mst.dk/udgiv/Publications/1998/87-7909-173-3/html/default_eng.htm.
12. United Nations. World population prospects 2019: Highlights (ST/ESA/SER.A/423), New York: Department of economic and social affairs, Population division.
13. International monetary fund. World economic outlook, Washington, DC: International monetary fund, 2021.
14. Scott K.R. Rational habits in gasoline demand. Energy economics, 2012, vol. 34 (5), pp. 1713-1723, DOI: 10.1016/j.eneco.2012.02.007.
15. EPA (United States environmental protection agency). Understanding global warming potentials, 2019, available at: https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials.

Куклина Анна Константиновна. *Инженер отдела исследований энергетического комплекса России и мира ИНЭИ РАН, kuklinaak@eriras.ru, 117186, г. Москва, ул. Нагорная, д.31, корп.2.*

UDC 519.216.3
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.005

Methodology for forecasting marine fuel consumption taking into account inter-fuel competition

Anna K. Kuklina
Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Russia, Moscow, *kuklinaak@eriras.ru*

Abstract. The article describes an economic and mathematical model for forecasting global energy demand in the segment of water transport with specialization by countries, regions and categories of vessels. The model combines various approaches to forecasting and modeling, including using regression analysis methods, and generates demand forecasting based on the revealed stable correlations between the energy intensity of water

transport and economic and demographic indicators. In addition, the model implements modeling of the predicted inter-fuel transition from traditional oil fuels to alternative fuels, taking into account the cost of ownership of vessels with different types of fuel, emission prices and other parameters. The key difference between the developed model and existing analogues is the ability to calculate the entire global demand for marine fuel by large aggregate indicators (a significant part of the existing models are designed exclusively for calculating the fuel demand from one vessel, the closest analogue is the IEA model). The methodology developed at ERI RAS, based on the establishment of statistical links with the technical characteristics of water transport in the context of ship categories, allows not only to calculate the forecast for several years ahead, but also to assess the prospects of using alternative fuels under current environmental requirements. The results of calculations obtained using this model may be of interest to scientific organizations, shipowners and manufacturers of marine fuel.

Keywords: inter-fuel competition, water transport, forecasting, fuel consumption

References

1. IEA (International energy agency. World energy model documentation, EIA, Paris, 2021, available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/932ea201-0972-4231-8d81-356300e9fc43/WEM_Documentation_WEO2021.pdf.
2. IEA (International energy agency). World energy outlook 2020, EIA, Paris, 202), available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72d8abf-de08-4385-8711-b8a062d6124a/WEO2020.pdf.
3. MEPC (Marine environment protection committee). Guidelines for calculation of reference lines for use with the energy efficiency design index (EEDI), Resolution MEPC.215(63), 2013, annex 14, pp. 1-12, available at: https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/eedi/11_231(65).pdf.
4. IEA (International energy agency). International shipping, EIA, Paris, available at: https://www.iea.org/fuels-and-technologies/international-shipping.
5. EPA (United States environmental protection agency). Port operational strategies: vessel speed reduction, EPA: office of transportation and air quality, 2021, available at: https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P10119QQ.PDF?Dockey=P10119QQ. pdf.
6. Makarov A.A., Grigoriev L.M., Mitrova T.A. Global and Russian energy outlook 2016, ERI RAS – ACRF, Moscow, 2016, ISBN 978-5-91438-025-7.
7. Wärtsilä LNG as a marine fuel boosts profitability while ensuring compliance. Services business white paper, 2017, available at: https://www.wartsila.com/insights/whitepaper/lng-as-a-marine-fuel-boosts-profitability-while-ensuring-compliance.
8. Uyanik T., Arslanoglu Y., Kalenderli O. Ship fuel consumption prediction with machine learning, 4th International Mediterranean science and engineering congress (Alanya-Antalya), 2019, pp. 757-759.
9. Kim Y-R., Jung M., Park J-B. Development of a fuel consumption prediction model based on machine learning using ship in-service data. Journal of marine science and engineering, 2021, vol. 9(2), p 137, DOI:10.3390/jmse9020137.
10. Kee K.K., Boung –Yew S. L., King-Hwa Y.R. Prediction of ship fuel consumption and speed curve by using statistical method, Journal of computer science & computational mathematics, 2018, vol. 8, issue 2 (Kuala Lumpur: SANDKRS sdn bhd), pp. 19-24, DOI: 10.20967/jcscm.2018.02.002.
11. Boye F. Development of a bunker norm for ships. Danish environmental protection agency, environmental project, no. 428, 1998, available at: https://www2.mst.dk/udgiv/Publications/1998/87-7909-173-3/html/default_eng.htm.
12. United Nations. World population prospects 2019: Highlights (ST/ESA/SER.A/423), New York: Department of economic and social affairs, Population division.
13. International monetary fund. World economic outlook, Washington, DC : International monetary fund, 2021.
14. Scott K.R. Rational habits in gasoline demand. Energy economics, 2012, vol. 34 (5), pp. 1713-1723, DOI: 10.1016/j.eneco.2012.02.007.
15. EPA (United States environmental protection agency). Understanding global warming potentials, 2019, available at: https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials.

Kuklina Anna Konstantinovna. *Engineer of the Department of Research of Energy Complex of Russia and the World, ERI RAS, kuklinaak@eriras.ru, 117186, Russian Federation. Moscow, Nagornaya st., 31, k.2.*

Статья поступила в редакцию 05.09.2022; одобрена после рецензирования 16.09.2022; принята к публикации 20.09.2022.

The article was submitted 09/05/2022; approved after reviewing 09/16/2022; accepted for publication 09/20/2022.

УДК 681.518.3
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.006

Экспериментальный стенд для обнаружения дефектов воздухопроводов

Коробова Людмила Анатольевна, Матыцина Ирина Александровна, Калугин Виталий Александрович
Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Россия, Воронеж, *irina210390@mail.ru*

Аннотация. При исследовании функционирования технологических объектов невозможно создать реальную аварийную ситуацию, которая дает информацию о наличии дефекта. С этой целью применено физическое моделирование воздухопроводной системы. Физическая модель представлена в виде экспериментального стенда. В статье приведено описание установки, которая позволяет проводить наблюдения за функционированием замкнутой системы воздухопровода при различных внешних воздействиях: при изменении динамических характеристик рабочей среды; при появлении различного вида дефектов и т.д. Также установка дает возможность выбора способа записи этих изменений. Функционально экспериментальный стенд создан максимально приближенным к реальным условиям. Чтобы выявить повреждение контура воздухопровода, выполнена интеграция технических наработок с методом множественной классификации сигнала (MUSIC). Разработанный стенд открывает возможности для проведения практических опытов и непосредственного получения экспериментальных данных для выявления дефектов воздухопровода.

Ключевые слова: физическое моделирование, экспериментальный стенд, трубопроводная система, воздухопровод, дефект, акустическая эмиссия

Цитирование: Коробова Л.А. Экспериментальный стенд для обнаружения дефектов воздухопроводов / Л.А. Коробова, И.А. Матыцина, В.А. Калугин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 64-72. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.006.

Введение. В век развития производственных процессов на современных химических перерабатывающих предприятиях требуется диагностика всех этапов производственного процесса, а именно контроль состояния трубопроводов (технологических и магистральных). В качестве объекта исследования взят промышленный воздухопровод воронежского завода Синтезкаучук. Необходимость осуществления разработки данного стенда обосновывается потребностью в проведении ряда практических опытов, целью которых является наблюдение за изменением динамических характеристик среды при проявлении различного вида дефектов. Одним из способов диагностики трубопровода является акустическая эмиссия. Цель ее применения – выявление различных дефектов трубопроводов. При этом главный плюс проведения акустической эмиссии – нахождение не статических, а развивающихся дефектов. Именно они представляют опасность, т.к. их развитие повлечет за собой негативные последствия. Таким образом, первостепенной задачей является именно обнаружение дефекта и неважно какой причиной он вызван или к какому классу относится.

Дефекты трубопровода можно классифицировать по трем признакам:

1) технологического происхождения (вмятина, включение (загрязнение), окалина (окислы металла), трещина (узкий разрыв металла), пузырь (вздутие), раскатанный пузырь (тонкое прямолинейное нарушение), плена (отслаивание металла), расслоение несплошности в слоях внутри проката, закат (расслоение, выходящее на поверхность листа), вкат (единичное включение в металл трубы), сегрегация (скопление неметаллических включений), царапины, риска (предельная канавка), подрез (продольный порез металла);

2) механического происхождения: царапины на внешней поверхности, задиры (то же, что и царапины, но с зазубринами), забоины (повреждение с острыми краями от удара), вмятины (то же, что и забоины, но без острых краев), эрозионные повреждения внутренней поверхности трубопровода;

3) коррозийного происхождения: сплошная коррозия (коррозия, охватывающая большую поверхность металла), местная коррозия (охватывающая отдельные участки поверхности металла), линейная коррозия (коррозийные язвы, расположенные по одной линии на малом расстоянии), межкристаллическая коррозия (распространяющаяся по границам кристаллов металла).

Причины дефектов и повреждений:

- амортизационный износ конструкций;
- хрупкость металла при низких температурах;
- наличие дефектов в сварных соединениях (непровары и пр.), являющихся концентраторами напряжений;
- скопление большого числа сварных швов в отдельных узлах резервуара;
- нарушение технологии монтажа и сварки;
- неравномерные осадки (просадки) песчаных оснований;
- коррозия металла, возникающая вследствие хранения в резервуарах сернистой нефти или нефтепродуктов с повышенным содержанием серы;
- нарушение правил технической эксплуатации резервуаров из-за превышения уровня наполнения, избыточного давления или недопустимого вакуума резервуара, а также частичной вибрации стенки при закачке нефтепродуктов.

Ввиду отсутствия возможности проведения тестовых измерений непосредственно в условиях реального технологического процесса, разработка и последующее использование подобного стенда являются актуальными. Новизной исследования является функционирование экспериментального стенда, приближенного к реальным условиям, и позволяющего добиться практического решения данной проблемы. Разработанный стенд позволяет воспроизводить и исследовать процессы, протекающие в реальных промышленных воздухопроводах, вплоть до аварийных ситуаций. При этом в опытах, проводимых на стенде, по сравнению с промышленными условиями появляется возможность изменять материалы воздухопровода, давление и температуру в нем, масштаб стенда, но при этом физическая сущность исследуемого процесса остается неизменной [1].

Практическая эффективность разработанного экспериментального стенда заключается в том, что на практике место повреждения воздухопроводного контура довольно сложно локализовать, а проведение практических экспериментов на стенде позволит сымитировать этот процесс и сделать его доступным. Это достигается путем интеграции технических наработок с программным алгоритмом метода множественной классификации сигнала (MUSIC) в среде MathLab. Необходимость проведения исследования при помощи стенда возникла в ходе разработки системы обнаружения дефектов. Система должна быть универсальной и гибкой, для этого следует учесть такую особенность, как неоднородность материалов воздухопровода. Использование разработанного стенда позволит провести анализ разницы показателей для магистралей, изготовленных из разных материалов. Выявление дефектов функционирующих воздухопроводов и трубопроводов, в общем, связано со сложностью получения информации об их повреждении. Для решения такого рода проблем необходим экспериментальный стенд для их обнаружения [2].

1. Описание экспериментального стенда. Основные элементы стенда (рис. 1): компрессор, ресивер, датчики (микрофоны) и их соединения, магистраль гибкой проводки, две основные жесткие под/надземные коммуникации с наличием и отсутствием дефектов, гибкая проводка (магистраль) подачи ресурса потребителю, а также сменное соединение основных магистралей с ресивером. Разработанный компактный экспериментальный стенд (рис. 2) представляет собой уменьшенную копию контура промышленного воздухопровода.

Стенд предусматривает две параллельных магистрали, одна из которых предназначена для наблюдений и опытов при отсутствии дефектов, а другая при наличии разнообразных и множественных повреждений магистралей [2].

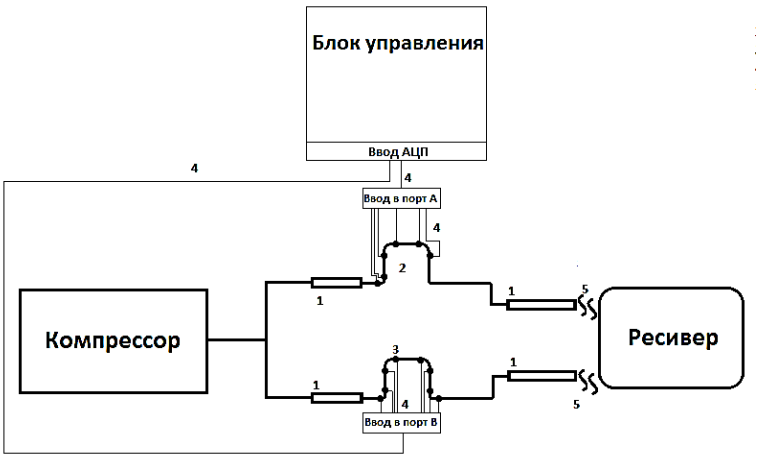


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:
1 – гибкое соединение, 2 – основная магистраль, 3 – основная магистраль с дефектом, 4 – соединения датчиков, 5 – сменное соединение, • - места установки датчиков

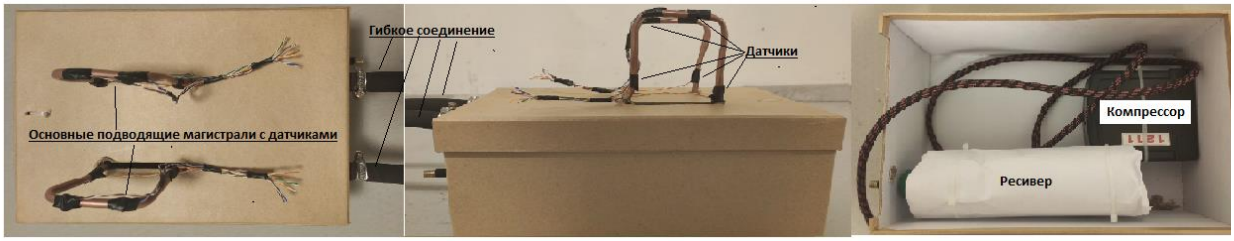


Рис. 2. Фото экспериментального стенда

Для обнаружения дефектов в системе трубопроводов могут быть использованы три способа фиксации изменений исходного сигнала:

- первый способ основан на использовании микрофонов, закрепляемых на участках трубопровода; микрофоны будут осуществлять снятие шума работы установки в постоянном режиме;
- второй способ основан на использовании вибродатчика, типа передатчик-приемник; в данном случае датчики будут генерировать ультразвуковой сигнал, и фиксировать скорость его распространения до следующего участка по трубопроводу;
- третий способ основан на методе отраженной волны; датчики, генерирующие ультразвуковой сигнал, погружены в трубопровод и передают сигнал по участку непосредственно через среду, т.е. анализируют скорость прохождения сигнала [3].

После анализа достоинств и недостатков вышеописанных способов обнаружения дефекта принято решение применить в эксперименте первый способ фиксации отклонений, т.е. метод акустической эмиссии. Основанием для выбора этого способа послужила его относительно низкая техническая сложность, а также стоимость компонентов. Применение второго или третьего способов требуют значительного увеличения размеров экспериментального стенда и повышения стоимости его разработки, а также излишнего усложнения системы, что является нецелесообразным.

Смоделированные участки магистралей технологической системы герметичны и предусматривают возможность замены элементов или незначительное изменение конструкции путем добавления новых сегментов магистралей, в том числе из различных материалов, а также объединение этих магистралей в единую систему.

Сигнал снимается методом постоянного опроса уровней напряжения датчиков (микрофонов), установленных непосредственно на участок магистрали (рисунок 1). Далее, методом проводной или беспроводной связи сигнал передается на блок управления. На следующем шаге осуществляется преобразование внутренним (или внешним) аналого-цифровым преобразователем (АЦП), после чего сигнал обрабатывается на основе метода множественной классификации сигнала (MUSIC). В результате при отклонении уровня сигнала от заданных пределов система в течение трех секунд повторяет опрос датчика с наибольшим отклонением уровня сигнала, после чего, в случае равенства уровня или увеличения его отклонения от предела, система сигнализирует о наличии дефекта [4].

Процесс фиксации динамических характеристик осуществляется посредством нескольких микрофонов, закрепленных на различных участках металлических трубок. Изгибы воздухопровода являются проблемными местами, где велика вероятность образования искажений звуковых волн, а также их наложения, при множественном проявлении дефектов [5].

Изменение давления вещества (воздуха) в системе по расчетам допускается в строгих рамках – от 3,5 атмосфер до необходимого максимум. При пониженном давлении (менее 1,5 атмосфер), ввиду изменения скорости воздушного потока, будет иметь место высокая вероятность формирования звуковых волн низкой частоты, что будет вызывать сложности в осуществлении процесса распознавания дефекта [6].

Микрофоны осуществляют снятие шума работы установки в постоянном режиме. Предварительно осуществляется калибровка, где фиксируются нормальный уровень шума и допустимые отклонения. Любые отклонения от нормы будут определяться, как дефект, а затворы на границах участка будут закрыты, отрезав проблемный участок воздухопровода. Немаловажный плюс данной установки состоит в том, что не требуются большие производственные и промышленные усилия для проведения непрерывного анализа всех участков трубопровода.

При этом спектрограмма, изображенная на рисунке 3(А), получена на прямолинейном участке воздухопровода, не имеющем в своей структуре изгибов. Спектрограмма на рисунке 3(Б) получена при расположении микрофона непосредственно в месте сгиба сегмента трубы.

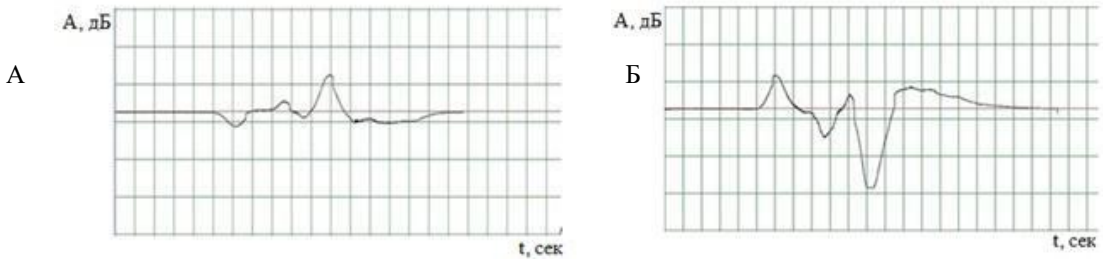


Рис. 3. Спектрограмма участка воздухопровода с дефектом
А – прямолинейный; Б – на изгибе

В процессе эксперимента выявлено, что прохождение воздушного потока через пластиковый сегмент проводит звуковые колебания с минимальной амплитудой, из-за особенностей полимерной кристаллической решетки, которая при направлении волны высокой амплитуды гасит ее на узловых точках кристаллической решетки.

Наиболее благоприятный и чистый сигнал, удобный для последующего анализа, получен при исследовании среды с металлическим сегментом. При этом, чем толще труба, тем лучше среда сопротивляется наличию фонового шума. На рисунках 4(А) и 4(Б) видно, шум компрессора все же оказывает некоторое незначительное воздействие на среду даже при отсутствии дефектов [5].

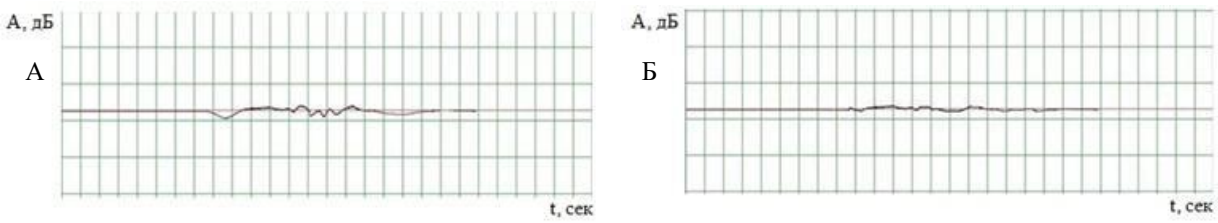


Рис. 4. Спектрограмма воздухопровода без дефекта: А – из металла; Б – из полимера

2. Математическое описание. Расчет проведен с использованием пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений – MathLab. Он позволил обработать полученные частотные характеристики от источников и провести анализ с использованием встроенной функции MUSIC. Реализация математической части функционирования модели методом множественной классификации сигнала (MUSIC) основывается на анализе собственных векторов [4]. Первостепенная задача состоит в том, чтобы найти оптимальный вектор весовых коэффициентов $\mathbf{W}_{optim}$, элементы которого задаются посредством функции P и матрицы $\mathbf{R}$ [1, 2]

$$\mathbf{W}_{optim} = \mathbf{R}^{-1}P, \quad (1)$$

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{X}\mathbf{X}^{\mathrm{T}}], \quad (2)$$

$$P = E[M\mathbf{X}], \quad (3)$$

где $\mathbf{R}$ – ковариационная матрица входных сигналов, в которой диагональные элементы будут равны среднеквадратичным значениям компонент входящего сигнала $\mathbf{X}$,
P – взаимокорреляционная функция полезного отклика и входного сигнала,
E – среднеквадратичная ошибка, M – количество источников сигнала.

Разработанный стенд является прообразом системы снабжения промышленных установок сжатым воздухом. На сегменте подобной технологической системы должно быть установлено строго определенное количество датчиков (микрофонов), которые будут осуществлять фиксацию частотных характеристик среды. Количество датчиков определяется расстоянием [3, 7] $\Delta = \lambda/2$, где λ – длина звуковой волны, генерируемой проходящим веществом по воздухопроводу. Предполагается, что каждая пара датчиков, установленная через расстояние Δ, позволит точно определить место возникновения дефекта, ввиду равномерности распространения звуковой волны во всех направлениях.

Принятый или входящий сигнал может быть представлен следующим образом [8]:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{S} + \mathbf{N}, \quad (4)$$

где $\mathbf{S}$ – матрица полезного сигнала, $\mathbf{N}$ – матрица аддитивных шумов,
$\mathbf{A}(\theta) = [\mathbf{a}(\theta_1)\cdot\exp(-j\mu n_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_i)\cdot\exp(-j\mu n_i), \dots, \mathbf{a}(\theta_M)\cdot\exp(-j\mu n_M)]$ – матрица направлений, $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_i, \dots, \theta_M\}$ – угол направлений прихода звуковой волны, n_i - номер датчика, $i = 1 \dots M$, M – количество датчиков (установленных микрофонов) на участке воздухопровода, μ – пространственная частота, j – мнимая единица [9].

Зафиксированные принимающими устройствами сигналы, характеризующие параметры среды, представляют собой набор разнообразных шумов и не дают явной информации о факте наличия и расположения дефектов [10]. Информацию о наличии дефектов можно получить, проведя расчеты по ковариационной матрице параметров среды [11, 12]

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{X}\mathbf{X}^{\mathrm{H}} = \mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^{\mathrm{H}} + \mathbf{R}_{nn}, \quad (5)$$

где $\mathbf{R}_{xx}$ – ковариационная матрица параметров среды, $\mathbf{A}$ – матрица направлений подпространства полезного сигнала, а $\mathbf{A}^{\mathrm{H}}$ – матрица направлений подпространства шума соответственно, при этом $\mathbf{R}_{ss}$ – есть ковариационная матрица исходных сигналов, $\mathbf{R}_{nn}$ – ковариационная матрица посторонних шумов [9, 13].

Далее необходимо из полученной матрицы $\mathbf{R}_{xx}$ выделить собственные вектора [2, 9]:

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{U}\boldsymbol{\Lambda}\mathbf{U}^{\mathrm{H}}, \quad (6)$$

где $\mathbf{U}$ – единичная матрица, $\mathbf{\Lambda} = diag\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M\}$ – диагональная матрица с положительными собственными значениями матрицы $\mathbf{R}_{xx}$, которые определяются как $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_M > 0$, [2, 9].

Следующий шаг – нахождение псевдоспектра MUSIC $\mathbf{P}_{\mathrm{MU}}$:

$$\mathbf{P}_{\mathrm{MU}}\left(e^{j\omega}\right) = 1\left(\sum_{i=d+1}^{M} |\mathbf{a}^{\mathrm{H}}\mathbf{u}_i|^2\right)^{-1}, \quad (7)$$

где $\mathbf{a}$ – вектор экспонент, лежащий в заданном диапазоне частоты μ, $\mathbf{a} = [1, \exp(-j\mu n_1), \dots, \exp(-j\mu n_i), \dots, \exp(-j\mu n_M)]^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{u}_i$ – собственный вектор, который принадлежит ковариационной матрице $\mathbf{R}_{xx}$ (6), i – индекс, начинающийся с (d+1), d – ранг матрицы $\mathbf{R}_{xx}$ (6).

Для начала необходимо из формулы 5 выделить ковариационную матрицу исходного сигнала $\mathbf{R}_{xx}$, а затем определить диапазон нулевого подпространства $\mathbf{U}_0$:

$$\mathbf{R}_{ss} = \mathbf{U}_s\mathbf{\Lambda}_s{\mathbf{U}_s}^{\mathrm{H}} + \mathbf{U}_0\mathbf{\Lambda}_0{\mathbf{U}_0}^{\mathrm{H}}, \quad (8)$$

где $\mathbf{\Lambda}_0 = \sigma^2\mathbf{I}$, матрица $\mathbf{\Lambda}_s$, в данном случае, будет содержать M наибольших собственных значений матрицы $\mathbf{R}_{ss}$.

Ввиду того, что все собственные вектора шума будут являться ортогональными к $\mathbf{A}$, считаем, что столбцы $\mathbf{U}_s$ – будут охватывать пространство $\mathbf{A}$, то есть подпространства сигнала, а $\mathbf{U}_0$ – будут охватывать диапазон нулевого пространства $\mathbf{A}^{\mathrm{H}}$, то есть подпространства шума.

Далее можно переходить к вычислению непосредственно псевдоспектра [14]

$$\mathbf{P}_{\mathrm{MU}}(\theta) = \mathbf{a}^{\mathrm{H}}(\theta)\mathbf{a}(\theta)/\mathbf{a}^{\mathrm{H}}(\theta)\mathbf{U}_0{\mathbf{U}_0}^{\mathrm{H}}\mathbf{a}(\theta), \quad (9)$$

Предварительно определив диапазон поиска

$$\mathbf{a}(\mu) = \begin{bmatrix} e^{-j\mu_1 n_{i-1}} & \dots & e^{-j\mu_Q n_{i-1}} \\ \dots & \dots & \dots \\ e^{-j\mu_1 n_{M-1}} & \dots & e^{-j\mu_Q n_{M-1}} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где $\mu = 2\pi F(c) \cdot (c^{-1}) \cdot \Delta\, sin\, sin\, \theta\ = 2\pi \cdot (\lambda^{-1})\Delta sin\, \theta$.

Процесс приема через массивы можно сравнить с осуществлением процесса классической дискретизации. Иными словами, принимая сигнал с определенной задержкой, каждое считывающее устройство (микрофон) будет осуществлять, по сути, функции дискретизирующего дельта импульса. Соответственно при этом количество временных отрезков будет эквивалентно значению общего числа экспериментов, в то же время, каждому источнику, в случае появления дефекта, будет соответствовать свой волновой фронт, который при спектральном анализе будет представлять определенное количество уникальных синусоид сигнала [15].

Важно заметить, что в процессе вычисления собственных векторов вектора $\mathbf{a}(\theta_i)$, принадлежащих матрице направлений $\mathbf{A}$, где $i = 1, 2, \dots, M$ собственные вектора будут являться ортогональными по отношению к подпространству шума ковариационной матрицы.

В итоге получим следующую систему уравнений:

$$\mathbf{a}(\theta_i)^{\mathrm{T}}\mathbf{U}_0 = \mathbf{0}^{\mathrm{T}}, \quad (11)$$

Решение системы уравнений 11 позволит определить корни, которые в итоге и будут являться собственными векторами. Подобный подход дает нам возможность получить не приближенные, а точные значения [16].

Заключение. Разработан экспериментальный стенд для обнаружения дефектов воздухопровода. Для выявления дефектов применен метод акустической эмиссии, в качестве датчиков использованы микрофоны. Представлено математическое описание обработки полученных сигналов.

Разработанный макет стенда открывает возможности для проведения практических опытов и непосредственного получения экспериментальных данных. Полученные данные с

датчиков (микрофонов) в виде звуковых волн раскладываются по формуле 4 на матрицу полезных сигналов и матрицу аддитивных шумов. Затем полезный сигнал обрабатывается по методу MUSIC [2, 6]. Учет данных позволит значительно продвинуть разработку системы обнаружения дефектов.

В перспективе исследования планируется преобразовать экспериментальный стенд (рисунок 1) в 3D-модель. Она позволит смоделировать различные ситуации обнаружения дефектов трубопроводных и магистральных сетей с учетом основных особенностей динамических характеристик технологической среды.

Список источников

1. Korobova L.A., Matytsina I.A., Kalugin V.A., Tolstova I.S., Mironova M.S. Description of the development of an experimental stand for the detection of defects in pipelines. Journal of Physics: Conference Series. III International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III 2022), С. 082012.
2. Калугин В.А. Моделирование процесса анализа шума при помощи метода MUSIC / В.А. Калугин, Л.А. Коробова, И.А. Матыцина // Моделирование энергоинформационных процессов. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2020. – С. 93-101. – EDN DQNISR.
3. Калугин В.А. Методика обнаружения дефектов в технологических трубопроводах / В.А. Калугин, Л.А. Коробова // Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2019. – С. 161-167. – EDN ZGJOMQ.
4. Калугин В.А. Анализ технологических данных при использовании частотных методов / В.А. Калугин, Л.А. Коробова // Проблемы и инновационные решения в химической технологии (ПИРХТ-2019). – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2019. – С. 33-34. – EDN TCZZKA.
5. Глазунов В.А. Пространственные механизмы параллельной структуры / В.А. Глазунов. – М.: Наука, 1991. – 94 с.
6. Сухов И.А. Метод повышения разрешающей способности пеленгатора с кольцевой антенной решёткой при использовании алгоритма MUSIC / И.А. Сухов, В.П. Акимов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление, 2013. – № 3 (174). – С. 19-25.
7. Петров В.П. Спектральные способы оценки направления источников сигналов в адаптивных антенных решетках / В.П. Петров, А.К. Шауэрман // Вестник СибГУТИ, 2011. – №2. – С. 53-62.
8. Ермолаев В.Т. Методы оценивания параметров источников сигналов и помех, принимаемых антенной решеткой / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флаксман // Учебное пособие. Нижний Новгород, 2007. – 98с.
9. Моделируем алгоритм Music для задач определения направления прихода электромагнитной волны. Хабр. Сообщество IT-специалистов. – URL: https://habr.com/ru/post/446674/ (дата обращения: 27.02.2022)
10. Петров В.П. Алгоритмы оценки пространственного спектра в адаптивных цифровых антенных решетках / В.П. Петров. Вестник СибГУТИ, 2014, – № 4 (28). – С. 60-70.
11. Корниенко В.В. Спектральные характеристики дифференциально-операторных уравнений / В.В. Корниенко Д.В. Корниенко. – ФЛИНТА, 2021. – С. 135.
12. Шевченко М.Е. Алгоритмы совместного обнаружения и пеленгования на основе методов сигнальных подпространств / М.Е. Шевченко. – СПб: СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. –159 с.
13. Марукович Е.И. Эмиссионный спектральный анализ / Е.И. Марукович, А.Г. Непокойчицкий // Издательский дом «Белорусская наука», 2014. – С. 309.
14. Третьяков И.А. Спектральный анализ радиосигналов в реальном времени на основе применения эхо-эффекта /И.А. Третьяков, В.В. Данилов. Вестник Астраханского государственного технического университета. Управление, вычислительная техника и информатика, 2022. – №. 1. – С. 53-59. – DOI:10.24143/2072-9502-2022-1-53-59.
15. Моделирование объектов с распределенными параметрами (спектральный метод) / Ю.А. Клевцов: Монография // КноРус, 2019. – С. 144.
16. Нестеров М.М. Информационно-физические свойства нестационарных откликов в системах обработки импульсных сигналов / М.М Нестеров, И.В. Плешаков, Я.А. Фофанов // Науч. Приборостроение, 2006. - № 16 (2). – С. 3-21.

Коробова Людмила Анатольевна. *К.т.н., доцент Воронежского государственного университета инженерных технологий, AuthorID: 351658, SPIN: 1098-6488, ORCID: 0000-0003-1349-732X, Lyudmila_korobova@mail.ru, Россия, Воронеж, пр. Революции, 19.*

Матыцина Ирина Александровна. *К.т.н., преподаватель Воронежского государственного университета инженерных технологий, AuthorID: 2166-2639, SPIN: 2166-2639, ORCID: 0000-0001-9236-9654, irina210390@mail.ru, Россия, Воронеж, пр. Революции, 19.*

Калугин Виталий Александрович. *Магистр Воронежского государственного университета инженерных технологий, AuthorID: 11006847, SPIN: 7214-5606, kaluginvit@mail.ru, Россия, Воронеж, пр. Революции, 19.*

UDC 681.518.3
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.006

Experimental stand for detecting defects in air ducts

Lyudmila A. Korobova, Irina A. Matytsina, Vitaly A. Kalugin

Voronezh State University of Engineering Technologies,
Russia, Voronezh, *irina210390@mail.ru*

Abstract. When studying the functioning of technological objects, it is impossible to create a real emergency situation that provides information about the presence of a defect. For this purpose, physical modeling of the air duct system was applied. The physical model is presented in the form of an experimental stand. The article provides a description of the installation, which allows you to monitor the functioning of a closed air duct system under various external influences: when changing the dynamic characteristics of the working environment; when various types of defects appear, etc. The installation also allows you to choose how these changes are recorded. Functionally, the experimental stand was created as close as possible to real conditions. To detect damage to the air circuit, integration of technical developments with the method of multiple signal classification (MUSIC) was performed. The developed stand opens up opportunities for practical experiments and direct obtaining of experimental data to identify defects in the air duct.

Keywords: physical modeling, experimental stand, piping system, air duct, defect, acoustic emission

References

1. Description of the development of an experimental stand for the detection of defects in pipelines Korobova L.A., Matytsina I.A., Kalugin V.A., Tolstova I.S., Mironova M.S. Journal of Physics: Conference Series. III International Scientific Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-III 2022), 082012 p.
2. Kalugin V.A., Korobova L.A., Matytsina I.A. Modelirovaniye protsessa analiza shuma pri pomoshchi metoda MUSIC [Modeling the noise analysis process using the MUSIC method]. Modelirovaniye energoinformatsionnykh protsessov [Modeling of energy information processes], Voronezh, Voronezh State University of Engineering Technologies, 2020, pp. 93-101, EDN DQNISR.
3. Kalugin V.A., Korobova L.A. Metodika obnaruzheniya defektov v tekhnologicheskikh truboprovodakh [Method for detecting defects in technological pipelines]. Optimizatsiya i modelirovaniye v avtomatizirovannykh sistemakh: Trudy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy shkoly. [Optimization and modeling in automated systems: Proceedings of the International Youth Scientific School], Voronezh, Voronezh State Technical University, 2019, pp. 161-167, EDN ZGJOMQ.
4. Kalugin V.A., Korobova L.A., Analiz tekhnologicheskikh dannykh pri ispol'zovanii chastotnykh metodov [Analysis of technological data using frequency methods]. Problemy i innovatsionnyye resheniya v khimicheskoy tekhnologii [Problems and innovative solutions in chemical technology] Voronezh, Voronezh State University of Engineering Technologies, 2019, pp. 33-34, EDN TCZZKA.
5. Glazunov, V.A. Prostranstvennyye mekhanizmy parallel'noy struktury [Spatial mechanisms of parallel structure]. M.: Nauka, 1991, 94 p.
6. Sukhov I.A. Akimov V.P. Metod povysheniya razreshayushchey sposobnosti pelengatora s kol'tsevoy antennoy reshotkoy pri ispol'zovanii algoritma MUSIC [Method for increasing the resolution of a direction finder with a ring antenna array using the MUSIC]. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye [St. Petersburg State Polytechnical University Journal Computer science. Telecommunications. Control.],2013, no. 3 (174), pp. 19-25.
7. Petrov V.P., Shauerman A.K. Spektral'nyye sposoby otsenki napravleniya istochnikov signalov v adaptivnykh antennykh reshetkakh [Spectral methods for estimating the direction of signal sources in adaptive antenna arrays]. Vestnik SibGUTI [Bulletin of SibGUTI], 2011, no. 2, pp. 53-62.
8. Ermolaev V.T., Flaksman A.G. Metody otsenivaniya parametrov istochnikov signalov i pomekh, prinimayemykh antennoy reshetkoy [Methods for estimating the parameters of signal sources and interference received by an antenna array]. Uchebnoye posobiye [Textbook], Nizhny Novgorod, 2007, 98 p.
9. Modeliruyem algoritm Music dlya zadach opredeleniya napravleniya prikhoda elektromagnitnoy volny [Modeling the Music algorithm for the tasks of determining the direction of arrival of an electromagnetic wave]. Khabr Soobshchestvo IT-spetsialistov [Habr Community of IT specialists], available at:https://habr.com/ru/post/446674/ (accessed: 02/27/2022).
10. Petrov V.P. Algoritmy otsenki prostranstvennogo spektra v adaptivnykh tsifrovykh antennykh reshetkakh [Algorithms for estimating the spatial spectrum in adaptive digital antenna arrays]. Vestnik SibGUTI [Bulletin of SibGUTI], 2014, no. 4 (28), pp. 60-70.

11. Kornienko V.V., Kornienko D.V. Spektral'nyye kharakteristiki differentsial'no-operatornykh uravneniy [Spectral characteristics of differential-operator equations]. Izd-vo: FLINTA [Publishing house FLINTA], 2021, 135 p.
12. Shevchenko M.E. Algoritmy sovmestnogo obnaruzheniya i pelengovaniya na osnove metodov signal'nykh podprostranstv [Algorithms for joint detection and direction finding based on signal subspace methods]. St. Petersburg: St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2013, 159p.
13. Marukovich E.I., Nepokoychitskiy A.G. Emissionnyy spektral'nyy analiz [Emission spectral analysis]. Izdatel'skiy dom «Belorusskaya nauka». Izdatel'skiy dom “Belorusskaya nauka” [Publishing House “Belarusian Science”], 2014, 309 p.
14. Tretyakov I.A., Danilov V.V. Spektral'nyy analiz radiosignalov v real'nom vremeni na osnove primeneniya ekho-effekta [Spectral analysis of radio signals in real time based on the use of the echo effect]. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika [Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer technology and informatics], 2022, no. 1, pp. 53-59, DOI: https://doi.org/10.24143/2072-9502-2022-1-53-59.
15. Klevtsov Yu.A. Modelirovaniye ob"yektov s raspredelennymi parametrami (spektral'nyy metod) [Modeling of objects with distributed parameters (spectral method)]. Monograph. Publishing house: KnoRus, 2019, 144 p.
16. Nesterov M. M., Pleshakov I. V., Fofanov Ya. A. Informatsionno-fizicheskiye svoystva nestatsionarnykh otklikov v sistemakh obrabotki impul'snykh signalov [Information-physical properties of nonstationary responses in impulse signal processing systems], Nauch. Priborostroyeniye [Nauch. Instrumentation], 2006, no. 16 (2), pp. 3-21.

Korobova Lyudmila Anatolyevna. *Ph.D., Associate Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, AuthorID: 351658, SPIN: 1098-6488, ORCID: 0000-0003-1349-732X, Lyudmila_korobova@mail.ru, Russia, Voronezh, Revolution Ave., 19.*

Matytsina Irina Alexandrovna. *Ph.D., Lecturer, Voronezh State University of Engineering Technologies, AuthorID: 2166-2639, SPIN: 2166 -2639, ORCID: 0000-0001-9236-9654, irina210390@mail.ru, Russia, Voronezh, Revolution Ave., 19.*

Kalugin Vitaly Alexandrovich. *Master of the Voronezh State University of Engineering Technologies, AuthorID: 11006847, SPIN: 7214-5606, kaluginvit@mail.ru, Russia, Voronezh, Revolution Ave., 19.*

Статья поступила в редакцию 18.10.2022; одобрена после рецензирования 06.03.2023; принята к публикации 20.03.2023.
The article was submitted 10/18/2022; approved after reviewing 03/06/2023; accepted for publication 03/20/2023.

УДК 62:620.9
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.007

Моделирование интегрированной фотоэлектрической системы в условиях развития частной микрогенерации

Мальцев Илья Андреевич[1], Карамов Дмитрий Николаевич[1,2]

[1] Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, *malcev.iluha@yandex.ru*

[2] Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Россия, Иркутск

Аннотация. В статье приведены результаты детального практического изучения законодательной базы Российской Федерации (на текущий момент ее реализации) по вопросу «развития микрогенерации». Выполнено исследование, включающее в себя моделирование системы электроснабжения, построенной на базе частной бытовой фотоэлектрической системы без использования накопителей энергии. Моделирование осуществляется с помощью компьютерной программы, которая учитывает климатические условия Иркутской области. На основе полученных данных даны рекомендации по совершенствованию действующих нормативно-правовых актов законодательства Российской Федерации с последующими предложениями по повышению эффективности стимулирования развития направления «микрогенерация» в России.

Ключевые слова: микрогенерация, возобновляемые источники энергии, зеленый тариф, модель энергетической системы

Цитирование: Мальцев И.А. Моделирование интегрированной фотоэлектрической системы в условиях развития частной микрогенерации / И.А. Мальцев, Д.Н. Карамов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 73-85. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.007.

Введение. Ссылаясь на подробное исследование действующей законодательной базы Российской Федерации (РФ), регулирующей деятельность возобновляемой энергетики (ВИЭ) на территории страны, проанализированной в ранее опубликованной статье [1], в данной работе была рассмотрена эффективность применения методов стимуляции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на территории РФ на основе предыдущего анализа, а также исследования возможных перспектив использования разрабатываемых программ по развитию зеленой энергии [2] и опыта зарубежных стран [3]. Полученные данные являются основой для прогнозирования потенциальных препятствий в достижении намеченных Правительством целей, и позволяют сформулировать рекомендации по повышению эффективности методов стимуляции развития зеленой энергетики в России.

Основополагающим методом анализа данных является сравнение действующих законов и проектов по развитию ВИЭ с аналогами в странах, достигнувших немалого прогресса в указанной отрасли. Согласно приведенным данным [4], страны ЕС сформулировали достаточно высокие значения доли ВИЭ в энергетическом секторе к 2030 году, в 32% от общего производимого объема электроэнергии, и демонстрируют соблюдение плановых показателей наращивания рассматриваемых энергосистем. Правительство России сформулировало показатель в 4,5% к 2024 году [5], однако «зеленая энергетика» страны демонстрирует отставание от запланированных показателей.

Более подробное рассмотрение существующих законов и проектов по стимулированию развития источников возобновляемой энергии демонстрирует тенденцию несвоевременного реагирования законодательными структурами на актуальную ситуацию в энергетическом комплексе страны. Ссылаясь на данные исследования основ регулирования развития ВИЭ [6], обосновывается необходимость создания более развитого регулирования на федеральном, региональном, муниципальном уровнях, в противном случае, возникает тенденция затухания темпа развития ВИЭ вследствие изменения таких факторов, как: актуальная цена

электроэнергии, стоимость производства и итоговая стоимость оборудования, уровень развития сетей по транспортировке и распределению электроэнергии.

Правительство России принимает ряд законодательных мер с целью создания привлекательности налогообложения как для действующих систем генерации возобновляемой энергии, так и для инвестиции в них [6], Ряд постановлений Правительства РФ регулирует основополагающие взаимоотношения на рынке сбыта производимой энергии, а также регламенты выхода на эти рынки новых участников [7-9]. Основополагающим фактором повышения привлекательности систем генерации зеленой электроэнергии является гарантия компенсации затрат на технологическое присоединение генерирующих объектов мощностью не более 25 МВт к централизованным сетям [10].

Также следует упомянуть о действиях Правительства России по регулированию распределенной генерации энергии с использованием ВИЭ [11]. Стремление потребителя снизить расходы, как на электроэнергию, так и на теплоснабжение, обусловливает периодические частичные или полные отказы от использования единой электроэнергетической системы (ЕЭС) в пользу микрогенерации. Согласно [3], основные причины появления отказов от централизованных энергетических систем следующие: безальтернативные системы на базе возобновляемой энергетики в труднодоступных регионах, высокая стоимость передачи электроэнергии в такие регионы, отсутствие высокого уровня развития распределительных систем. Все выше перечисленное вынуждает потребителя искать альтернативы. Руководство страны предпринимает законодательные меры для урегулирования неконтролируемых всплесков развития распределённой энергетики, которые могут причинить ущерб централизованному энергокомплексу, а также энергетической безопасности указанных секторов [12, 13]. Создание уравновешенного и прогнозируемого плана развития распределенной генерации энергии относительно других стран потребовало от Правительства РФ внесения ряда поправок и новых законов [14, 15]. Основная цель указанных мер по регулированию заключается в установлении взаимосвязи централизованной и распределенной генерации энергии, за счет сбыта зеленой энергии в единую сеть на основе договора с четким формулированием взаимоотношений производителей и поставщиков [16].

Тем не менее, вышеуказанные инструменты руководства страны по взаимодействию с ВИЭ оцениваются как недостаточные, отсутствие развитого производства оборудования на территории страны подстегивает рост цен на создание генерирующих систем. Согласно рассматриваемым раннее данным в работах [1, 3], ключевым путем повышения привлекательности систем ВИЭ является снижение необходимых затрат на производство единицы электроэнергии, что в итоге снизит финансовое обременение конечного потребителя. Рассматриваемый анализ ученых-юристов, специализирующихся в ядерной энергетике, показывает, что на территории России итоговая стоимость электроэнергии, производимая ВИЭ, выше, чем стоимость атомной электроэнергии, что подтверждает необходимость доработок как регулирующих законов о генерации возобновляемой энергии, так и методов субсидирования, способных установить паритет стоимости создания систем ВИЭ относительно традиционных энергосистем. Микрогенерация (она же система «зеленого тарифа») требует особого внимания, так как нововведения, связанные с ней, сопровождаются массой неточностей, которые оказывают негативный эффект на развитие ВИЭ.

Основная задача данной статьи – это обоснование необходимых изменений в законодательной базе с целью дальнейшего улучшения показателей развития распределенной генерации с использованием модели энергосистемы ВИЭ, взаимодействующей с «зелёным тарифом».

1. Модель для проверки функционирования правового поля «зеленого тарифа». Как было сказано выше, для создания стабильного уровня привлекательности процесса

внедрения распределенной генерации в централизованную сеть необходимо создание правового позитивного взаимодействия государства и граждан по вопросам развития системы «зеленого тарифа». Таким образом, необходимы изменения в законодательной базе для дальнейшего совершенствования данной системы на территории Российской Федерации. В статье рассматривается приближенная к реальным условиям виртуальная модель системы производства электроэнергии с установленной мощностью в диапазоне 5-25 кВт, построенная на возобновляемом энергетическом комплексе, подтверждающая необходимость совершенствования законодательного поля Российской Федерации в плане повышения привлекательности «микрогенерации». Нахождение оптимальной ставки «зеленого тарифа» на указанные мощности позволит найти наиболее рациональное решение по капитальным вложениям в построение системы и сроку окупаемости проекта. Ниже приведены начальные условия функционирования системы, а также описание работы с последующими результатами и выводами.

2. Исходные данные модели. Модель подразумевает построение системы на базе фотоэлектрической генерации (в диапазоне 5-25 кВт). Ее отличительными чертами являются: распространённость и доступность для приобретения, адаптация практически к любым условиям и относительно небольшие цены в сравнении с другими системами ВИЭ (к примеру, в сравнении с системой, построенной на ветроэнергетических установках одинаковой установленной мощности, где цена будет ощутимо выше). Следует учесть и тот факт, что срок службы солнечных батарей в среднем составляет 25 лет (что также превышает срок службы систем ветроэнергетических установок (ВЭУ)). Предоставленная в данной программе фотоэлектрическая система (ФЭС) функционирует без учета накопления генерируемой энергии (аккумуляторные батареи не используются в технологической цепи). Поскольку цель данной модели заключается в проверке законодательной базы, регулирующей основы микрогенерации, подразумевается, что система будет подключаться напрямую к централизованной сети (к линиям поставщика электроэнергии). Максимальный период окупаемости разных вариантов мощности ФЭС не будет превышать 25 лет. Данный срок обусловлен сроком службы основных фондов (фотоэлектрических панелей).

Система построена на базе частного домовладения. За основу расчета взят одноэтажный коттедж площадью в 100 м^2 с двухскатной плоской крышей с целью достижения максимального количества фотоэлектрических панелей и их комфортной настройки. Помимо этого, подразумевается специально выделенная перед домом территория для размещения дополнительных фотоэлектрических панелей с целью предотвращения возможной нехватки энергии, производимой фотоэлектрическими панелями, расположенными на крыше. В качестве геолокации применения модели выбрана Иркутская область с учетом всех климатических условий, которые необходимо учесть при эксплуатации ФЭС в указанном регионе. Помимо этого, взята типовая почасовая годовая электрическая нагрузка для данного дома в указанном регионе.

В качестве основного оборудования для построения системы использованы фотоэлектрические панели монокристалического типа мощностью 330 Вт, паспортные данные взяты согласно данным официального сайта производителя [17], а также инверторы сетевого типа [18], 2 варианта однофазных инверторов мощностью: 5 и 6 кВт и 5 экземпляров трехфазных инверторов мощностью: 5, 10, 15, 20, 25, 30 кВт соответственно. Данные типы панелей и инверторов являются оптимальными решениями по соотношению цена/качество. Поскольку моделируемая система находится в Иркутской области, то и ценообразование оборудования взято у официального поставщика продукции [19] с актуальными ценами в данном регионе. Для остального вспомогательного оборудования для функционирования системы (кабеля, коммутационное оборудование и т.д.), а также монтажа и доставки, было принято решение,

для удобства расчетов капиталовложений, взять все вышеописанное оборудование за 30% от итоговой стоимости суммы основных фондов (фотоэлектрических панелей и инверторов).

3. Принцип работы модели. Модель имитирует ФЭС частного дома на протяжении одного года эксплуатации с разной установленной мощностью 5 до 25 кВт с шагом 1 кВт, которая учитывает покрытие собственной нагрузки дома и генерации в общую сеть излишков энергии и потребления энергии из сети. Во внимание взят фактор законодательной части в вопросе о максимальной допустимой установленной мощности. Она не должна превышать 15 кВт, однако для того, чтобы дать наилучшую рекомендательную характеристику для законодательной базы и найти оптимальную ставку «зеленого тарифа» на электроэнергию с точки зрения окупаемости, диапазон увеличен до 25 кВт.

Программа состоит из четырех основных блоков:

1. Рассчитывает рабочие характеристики для функционирования ФЭС.
2. Выполняет экономические расчеты по оборудованию ФЭС (стоимости, издержки).
3. Рассчитывает чистую приведенную стоимость состава оборудования и период окупаемости системы.
4. Вычисляет, на основании результатов предыдущих блоков, а также геолокационных данных, годовой электрической нагрузки домовладения и разных тарифов на электроэнергию, необходимую зависимость между сроком окупаемости систем и ставкой «зеленого тарифа».

На рис.1 приведена блок схема работы описываемой программы.

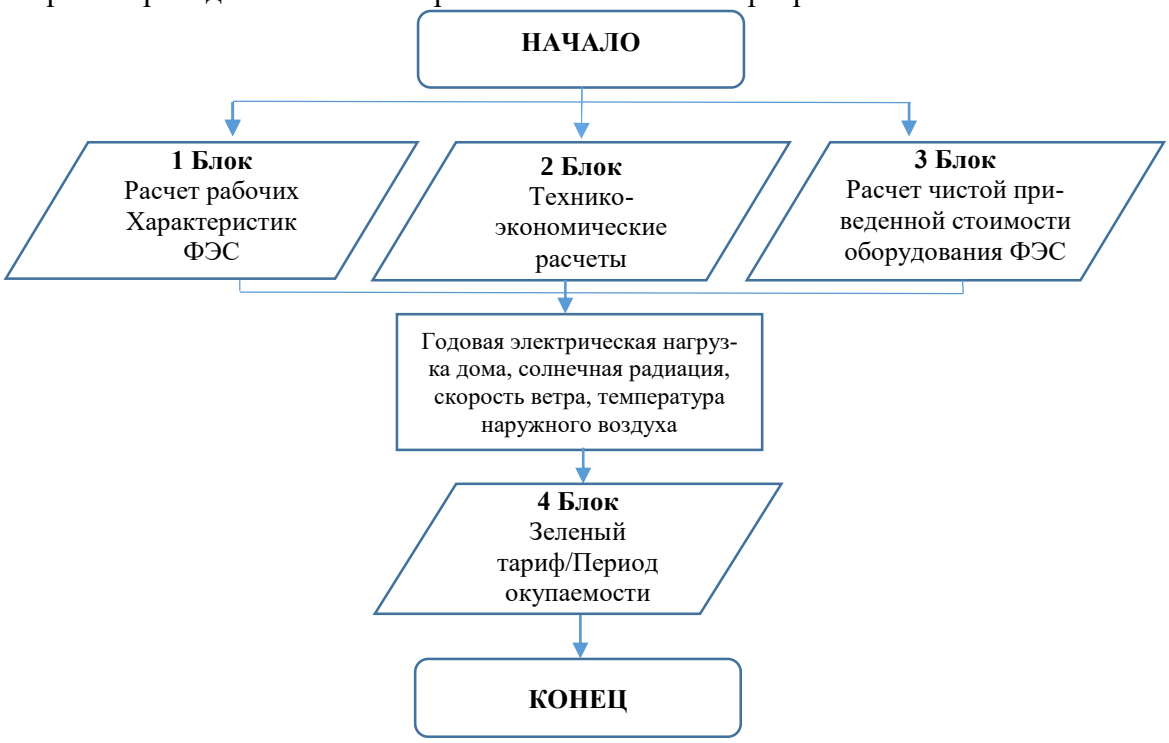


Рис. 1. Блок схема модели работы ФЭС

Комментарий к рис. 1. Каждый блок включает в себя определенное количество расчетных формул, таблиц с данными (массивов) и условий для выполнения тех или иных команд.

Рассмотрим работу блоков подробнее.

Первый блок вычисляет все характеристики, связанные с работой фотоэлектрических панелей и инверторов, а именно: необходимое количество солнечных панелей и инверторов в электростанции, установленную мощность сетевых инверторов и их капиталовложения, генерируемую мощность системы с учетом необходимого оборудования, а также с учетом проявляющихся потерь, максимальную генерацию ФЭС. Также следует учесть и температу-

ру солнечных панелей с учетом скорости ветра и КПД солнечной панели с учетом изменения рабочей температуры. Данный блок является особенно важным в данной модели, поскольку такие характеристики, как генерируемая мощность, выходные ток и напряжение, температура солнечных панелей и КПД, являются основополагающими. Без них дальнейшие расчеты в рамках модели невозможны. Данные выражения применяются в работе [20]:

$$P_{pv}\,(t) = I_A(t) \cdot \eta(t) \cdot A \cdot k_L, \tag{1}$$

где $I_A(t)$ – солнечная радиация, приходящая на наклонную поверхность фотоэлектрической панели, Вт/м2; А – установленная площадь фотоэлектрических модулей м2; k_L – коэффициент, учитывающий потери в диодах и из-за загрязнения и принимается равным 0,85-0,95 о.е.

Эффективность фотоэлектрического преобразователя пересчитывается в зависимости от уровня солнечной радиации (используются годовые показатели по Иркутской области имеются), температуры наружного воздуха, рабочей температуры солнечной панели и скорости ветра. Вычисление выполняется по формуле (2) (о.е).

$$\eta(t) = \bar{\eta} \cdot [1 - \beta \cdot (T_{PV}(t) - 48)], \tag{2}$$

где вычисление рабочей температуры фотоэлектрического преобразователя имеет следующий вид:

$$T_{PV}(\mathrm{t}) = T_a(t) + \frac{\bar{I}_A(t)}{k_0 + k_1 \cdot V_w(t)}, \tag{3}$$

где $\bar{\eta}$ – паспортное значение КПД фотоэлектрического преобразователя, о.е; Ta(t) – температура наружного воздуха, °С; β – температурный коэффициент для кремниевых фотоэлектрических преобразователей (0,004-0,006), о.е./°С; k_0, k_1 – корреляционные коэффициенты Koehl (30,02 и 6,28) [20]; $V_w(t)$ – скорость ветра на поверхности Земли, м/с.

На следующем этапе рассчитывается фототок, (А).

$$I_{PH}(\mathrm{t}) = \frac{\bar{I}_A(t)}{1000} \cdot [I_{SC} + k_1 \cdot (T_{PV}(t) - 25)], \tag{4}$$

где температурный коэффициент для тока принимается равным 0,0038 о.е./ °С.

Наконец, определяется выходное напряжение (В).

$$U_{PV}(\mathrm{t}) = P_{PV}(t)/P_{PH}(t). \tag{5}$$

Данные выражения необходимы для определения основных параметров ФЭС.

Второй блок на основании данных, полученных от первого блока, ведет технико-экономические расчёты, определяя стоимости всех солнечных панелей и сетевых инверторов ФЭС. Помимо этого, учитываются ежегодные издержки на обслуживание оборудования и суммарные капиталовложения в оборудование с учетом доставки и установки на объекте для каждой из приведённых мощностей.

Третий блок рассчитывает чистую приведенную стоимость (NPV) оборудования ФЭС на основании результатов расчетов двух предыдущих блоков, основываясь на показателях суммарных капитальных вложений в систему. NPV позволяет оценить ФЭС с точки зрения инвестиций, другими словами, показывает, стоит ли инвестировать средства для реализации генерирующей электросистемы дома. Также с использованием полученных данных NPV третий блок рассчитывает период окупаемости всей ФЭС, основываясь на разных ставках тарифа на электроэнергию.

Четвертый блок запускает предыдущие 3 блока системы, взяв за основу расчета массивы данных по годовой температуре наружного воздуха и скорости ветра на рассматриваемой территории в регионе, а также учитывая годовые замеры солнечной радиации. На основании годовой нагрузки потребителя (домовладения) блок выполняет расчеты различных вариантов ставок тарифа на электроэнергию в диапазоне 6-13 руб. за кВт/ч, тем самым демон-

стрируя результат взаимодействия изменяемых ставок тарифа различных сроков окупаемости при изменяемой установленной мощности системы ФЭС в диапазоне 5-25 кВт (рис. 2) при которых обосновывается целесообразность использования той или иной ставки «зеленого тарифа» для установленных мощностей ФЭС. Помимо этого, модель, на основании формул из первого блока, определяет суммарные капиталовложения для установки системы, годовую генерацию и перетоки электрической энергии из ФЭС в централизованную сеть и наоборот, по всем представленным вариантам мощности.

4. Результаты исследования. Как уже упоминалось в предыдущем разделе, основная задача расчетов по модели – находить оптимальную ставку тарифа на электричество для продажи в централизованную сеть по системе «зеленого тарифа», отталкиваясь от срока окупаемости. На рис. 2 приведены графики сроков окупаемости системы мощностей в диапазоне от 5 до 25 кВт с шагом 0,5-1 рубль за киловатт-часы, при разных ставках тарифа:

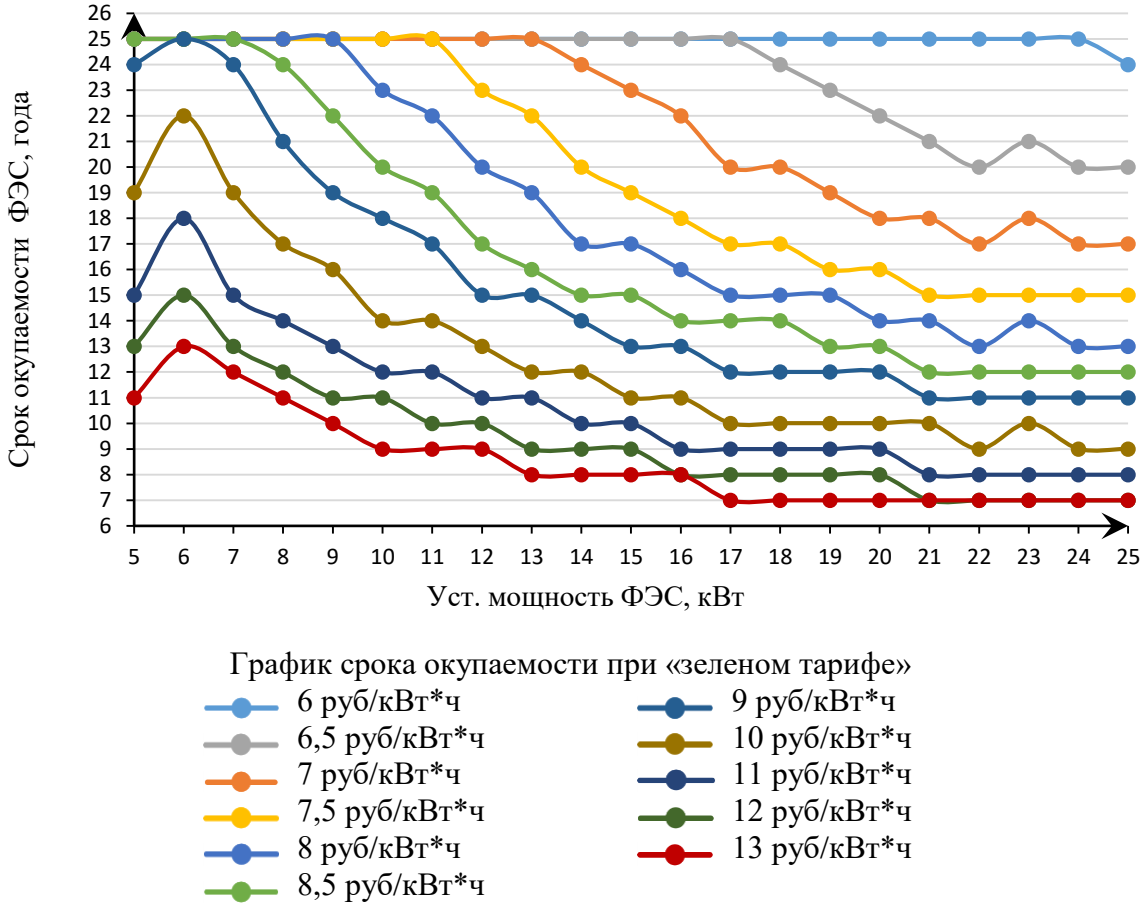


Рис. 2. График изменения срока окупаемости от величины «зеленого тарифа» и установленной мощности ФЭС

Комментарий к рис. 2. Как видно из рисунка, при тарифе в 6 рублей/кВт·ч минимального срока окупаемости можно достичь только при установленной мощности ФЭС в 25 кВт. По этой причине нет целесообразности анализировать ставки ниже описанного тарифа. Не следует превышать данный показатель и выше 13 рублей/кВт·ч, поскольку, хотя последующее увеличение ставки будет снижать срок окупаемости системы, тарифная ставка будет постоянно расти, превышая все мыслимые пороги с экономической точки зрения, например, согласно данным [21] в Чукотском автономном округе тариф на электроэнергию (наивысший по РФ) составляет 8,42 рублей/кВт·ч, что почти на 4,5 рубля меньше предложенного варианта. Так же по полученным данным можно сделать вывод, что при увеличении установленной

мощности станции срок окупаемости падает, так как увеличение генерации ФЭС позволяет покрывать собственную нагрузку (домовладения) и передавать излишки генерируемой электроэнергии в общую сеть.

Основываясь на законодательной базе по «зеленому тарифу», интересующий диапазон мощностей варьируется от 5 до 15 кВт. Например, для того, чтобы положить начало окупаемости системы в 5 кВт при наилучшем выборе оборудования, необходимо, чтобы в централизованную сеть электроэнергия продавалась по тарифу не менее 9 рублей за кВт/час. Тариф при системе в 10 кВт должен составлять не меньше 8 рублей за кВт/ч, а при установленном максимуме в 15 кВт мощности ФЭС данный показатель должен быть равен 7 рублям за кВт/ч.

Кроме этого, стоит упомянуть результаты технико-экономических расчетов и показатели потребления и генерации ФЭС. Если рассматривать мощность системы в правовом диапазоне (5-15 кВт), то суммарные капиталовложения в систему будут составлять 422-1173 тыс. руб. с учетом доставки и установки; ежегодные издержки на обслуживание ФЭС будут составлять 6-18 тыс. руб., при этом рабочие характеристики ФЭС в данном диапазоне при потреблении и генерации электроэнергии следующие: годовая генерация всей ФЭС составляет 9,54-23,65 тыс. кВт·ч, из которых на собственное покрытие годовой нагрузки уходит 5,04 - 7,00 тыс. кВт·ч, а переток энергии из частной системы в централизованную систему составляет 4,50-16,65 тыс. кВт·ч. Потребляемая же энергия из централизованной системы на собственные нужды в момент, когда не хватает генерации частной ФЭС, равна 14,70-12,74 тыс. кВт·ч соответственно.

Относительно установленных мощностей ФЭС свыше 15 кВт, которые не подлежат развитию с точки зрения «зеленого тарифа» в диапазоне 16-25 кВт, получены следующие характеристики: суммарные капиталовложения 1235-1867 тыс. руб., издержки на обслуживание 19-30 тыс. руб. Годовая генерация всей ФЭС – 24,98-37,94 тыс. кВт·ч, годовой переток энергии из ФЭС в общую систему 17,90-30,36 тыс. кВт·ч, потребление собственной генерируемой энергии 7,08-7,58 тыс. кВт·ч, потребляемая электрическая энергия из централизованной системы будет составлять 12,16-12,66 тыс. кВт·ч.

В целом, анализируя полученные графики, экономические и рабочие расчеты, наблюдаем практически линейную зависимость от рассматриваемых характеристик (не считая срока окупаемости в ряде рассматриваемых в модели систем установленной мощностью 6 кВт. Это связано с несколько завышенной ценой инвертора на 6 кВт, согласно [18], при увеличении установленной мощности ФЭС значительно растут показатели по генерируемой мощности и падают значения потребления электроэнергии в/из централизованной сети. Также растут капиталовложения и издержки ФЭС, тем не менее, если рассматривать соотношение генерации и капиталовложений, варианты систем с большей мощностью более привлекательны в реализации.

На основании полученных рабочих характеристик системы, а именно, данных по потребляемой мощности из централизованной системы и потребляемой генерируемой энергии ФЭС на собственные нужды дома, построен график (рис. 3), иллюстрирующий точку баланса системы.

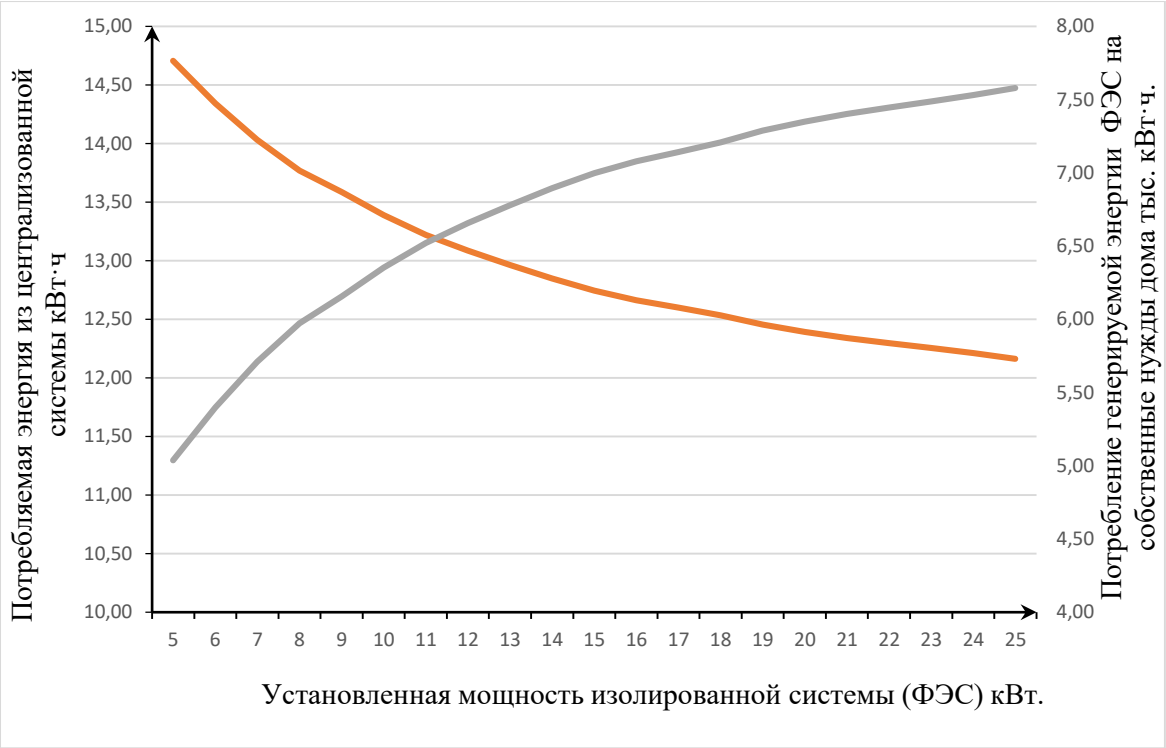


Рис. 3. График зависимости энергии, потребляемой домом из централизованной системы, и собственной генерируемой энергии от установленной мощности ФЭС

Комментарий к рис. 3. Данный рисунок иллюстрирует точку баланса перетоков электрической энергии между ФЭС и общей сетью поставщика электроэнергии. Она позволяет найти оптимальную мощность системы с точки зрения капиталовложений и окупаемости в рассматриваемом регионе. Согласно полученным данным, она равна 11,75 кВт ≈ 12 кВт.

Заключение. Таким образом, с использованием модели, приближенной к реальным условиям эксплуатации, имитирующей работу, на территории Иркутской области с учетом климатических особенностей, системы электроснабжения, построенной на базе фотоэлектрической системы частного домовладения, были получены данные, описывающие всевозможные варианты поведения установки на базе ВИЭ в рамках требуемых затрат, возможных выгод и других условий. С 2017 г. со стороны Правительства РФ делаются первые шаги, касающиеся поддержки возобновляемого энергетического комплекса. В частности, с 2019 г. появились первые действия, направленные на поддержку развития микрогенерации. Однако, давая оценку на основе проведенной работы, можно сделать вывод, что текущих мер по развитию системы «зеленого тарифа» на территории РФ недостаточно. Акцентируя внимание на реалиях Иркутской области, в частности, низкого тарифа на электроэнергию (0,819 кВт·ч согласно данным [21]) и учитывая, что сбыт электроэнергии, производимой ФЭС, в общие сети осуществляется в рамках «зеленого тарифа», по средневзвешенной цене, то соответственно, тариф на электроэнергию, при которой участник сможет продавать электроэнергию в централизованную сеть, будет в значительной мере ниже вышеупомянутого тарифа. Это создает для участника программы высокий порог требуемых вложений, а также иррациональный срок окупаемости для создания подобной системы. Таким образом, реализация текущих планов по стимулированию развитию ВИЭ невозможна в Иркутской области, а также малоперспективна в других регионах России.

Для решения описанных выше проблем рекомендуется рассмотреть ряд мер по улучшению условий реализации проектов и повышению доходности в целом, ранее упомянутых в [1]:

1. Предоставить участникам программы «микрогенерации» некоторую компенсацию затрат или предоставить субсидии на приобретение и установку генерирующих систем, поскольку описанная выше модель позволяет оценить влияние на рентабельность изменений ценообразующих составляющих ФЭС.
2. Предоставить возможность приобретения оборудования по специальной льготной цене или кредитной программе, а также отсрочку от первых платежей на длительный срок по данному кредиту.
3. Установить гарантированный (фиксированный) тариф, который обеспечит привлекательность работы с ВИЭ как для собственника генерирующей системы, так и для энергосбытовых компаний (централизованных сетей).
4. Создать специальный льготный тариф, который позволит владельцам объектов микрогенерации покупать электроэнергию в централизованных сетях по привлекательной цене.
5. Используя опыт других стран по стимулированию развития ВИЭ с помощью системы стандарта портфеля возобновляемых источников энергии [2], обязать энергосбытовые компании приобретать сертификаты на электроэнергию, произведенную ВИЭ, тем самым создавая дополнительный спрос на зеленую энергию и повышая рентабельность проектов ВИЭ в целом.
6. Повысить лимит на максимальную мощность системы, которая бы проходила в рамках правового поля; данная мера положительно скажется на скорости окупаемости проекта.

ВИЭ становятся одним из основных инструментов по генерации электроэнергии и борьбе с ухудшением климатической обстановки в мире. Кроме этого, возобновляемая энергетика зарекомендовала себя как эффективный метод снижения нагрузки на традиционный сектор производства энергии. Опыт зарубежных стран по стимулированию развития возобновляемой энергетики от лица государственных структур показывает, что поддержка возобновляемого энергетического сектора является одним из самых приоритетных направлений в сфере электроэнергетики.

Представляется, что основным принципом регулирования развития ВИЭ на территории России является своевременное принятие новых мер, которые позволят взаимодействовать с возобновляемым энергетическим сектором, исходя из актуальных событий в стране. Применение выше упомянутой модели уже позволяет оценить важность применяемых нововведений. Даже такие меры, как повышение ставки на электроэнергию, позволяют увеличить рентабельность проектов и повысить участие в их развитии. При отсутствии постоянных нововведений в регулирующие инструменты законодательной базы темп развития ВИЭ будет демонстрировать отставание и стагнацию от запланированных Правительством показателей.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0002) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

Список источников

1. Карамов Д.Н. Анализ мирового опыта стимулирования развития возобновляемой энергетики и возможностей его применения в России / Д.Н. Карамов, И.А. Мальцев, П.В. Илюшин, К.В. Суслов, В.В. Скутельник, Е.П. Емельянова // Энергетик, 2022. – № 9. – С. 39-49. – DOI: 10.34831/EP.2022.14.92.009
2. Karamov D.N., Maltsev I.A., Tsyrendorzhiev B.B. Analysis of world practices for stimulating the development of renewable energy sources. A case study for Russian conditions. E3S Web of Conferences, 2021, vol. 289, 01017, DOI: 10.1051/e3sconf/202128901017.
3. Символоков О.А. Договоры в электроэнергетике: проблемы теории и практики: монография / О.А. Символоков. – Москва: Инфотропик Медиа, 2021. – С. 143-168. – ISBN 978-5-9998-0361-0.

4. Директива 2018/2001 Европейского парламента и Совета от 11.12.2018 о содействии использованию энергии из возобновляемых источников // EU: Journal of the European Union. L 328/82 N. – URL: EUR-Lex - 32018L2001 - EN - EUR-Lex (europa.eu) (дата обращения: 19.10.2022).
5. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 8 января 2009 г. N 1-р «Об основных направлениях государственной политики в области повышения энергоэффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии». на период до 2035 года». – URL: http://government.ru/docs/all/66930/ (дата обращения: 20.10.2022).
6. Постановление Правительства Российской Федерации от 17 июня 2015 г. № 600 «Об утверждении перечня объектов и технологий, относящихся к объектам и технологиям высокой энергоэффективности». – URL: http://government.ru/docs/all/102323/ (дата обращения: 26.10.2022).
7. Постановление Правительства Российской Федерации от 27 декабря 2010 г. № 1172 «Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности». – URL: http://government.ru/docs/all/76726/ (дата обращения: 26.10.2022).
8. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 мая 2013 г. № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности» (вместе с «Правилами определения цены на мощность генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии»). – URL: http://government.ru/docs/all/87499/ (дата обращения: 26.10.2022).
9. Постановление Правительства Российской Федерации от 10 ноября 2015 г. № 1210 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности». – URL: http://government.ru/docs/all/104143/ (дата обращения: 26.10.2022).
10. Приказ Минэнерго России от 22 июля 2013 г. № 380 «Об утверждении правил предоставления из федерального бюджета субсидий в порядке компенсации стоимости технологического присоединения генерирующих объектов с установленной генерирующей мощностью не более 25 мвт, признанных квалифицированными объектами, функционирующими на основе использования возобновляемых источников энергии, юридическим лицам, которым такие объекты принадлежат на праве собственности или на ином законном основании» – URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70400104/ (дата обращения: 26.10.2022).
11. Указ Президента Российской Федерации от 13 мая 2019 г. № 216 «Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации». – URL: http://government.ru/docs/all/121866/ (дата обращения: 11.10.2022).
12. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 февраля 2019 г. № 207-р «Об утверждении Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года». – URL: http://government.ru/docs/all/120647/ (дата обращения: 11.10.2022).
13. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30 сентября 2018 г. N 2101-р «Об утверждении комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры на период до 2024 г.». – URL: http://government.ru/docs/all/118785/ (дата обращения: 11.10.2022).
14. Федеральный закон Российской Федерации от 27 июля 2010 г. № 190-ФЗ «О теплоснабжении». – URL: http://government.ru/docs/all/99596/ (дата обращения: 11.10.2022).
15. Федеральный закон Российской Федерации от 27 декабря 2019 г. № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» в части развития микрогенерации». – URL: http://government.ru/docs/all/125447/ (дата обращения: 11.10.2022).
16. Приказ Минпромторга России от 22 февраля 2011 г. № 206 «Об утверждении Стратегии развития энергомашиностроения Российской Федерации на 2010 - 2020 годы и на перспективу до 2030 года». – URL: https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minpromtorga-Rossii-ot-22.02.2011-N-206/ (дата обращения: 11.10.2022).
17. Официальный сайт производителя солнечных батарей «SILA». – URL: https://sila-solarpanel.ru/mono-panels (дата обращения: 15.10.2022).
18. Официальный сайт производителя Инверторов для фотоэлектрических систем «SofarSolar». – URL: https://www.sofarsolar.com (дата обращения: 15.10.2022).
19. Официальный поставщик оборудования для фотоэлектрических систем в Иркутской области «Технолайн»». – URL: https://e-solarpower.ru (дата обращения: 15.10.2022).

20. Карамов Д.Н. Моделирование солнечной электростанции с учётом изменения параметров окружающей среды / Д.Н. Карамов, И.В. Наумов // Электрические станции, 2020. – № 6 (1067). – С. 21-28, – DOI: 10.34831/EP.2020.1067.6.004.
21. Тарифы на электроэнергию в разных регионах РФ. – URL: https://energo-24.ru/tariffs/electro.html (дата обращения: 15.10.2022).

Карамов Дмитрий Николаевич. *Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826, dmitriy.karamov@mail.ru, 664033, Иркутская обл., Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия.*

Мальцев Илья Андреевич. *Аспирант, инженер-исследователь Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, SPIN: 6134-2190, malcev.iluha@yandex.ru, 664033, Иркутская обл., г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия.*

UDC 62:620.9
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.007

Modelling of an integrated photovoltaic system in the conditions of development of private microgeneration

Ilia A. Maltsev[1], Dmitriy N. Karamov[1,2]

[1]Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, *malcev.iluha@yandex.ru*

[2]Irkutsk National Research Technical University, Russia, Irkutsk

Abstract. The article presents the results of a detailed practical study of the legislative framework of the Russian Federation (at the current moment of its implementation) on the issue of “development of microgeneration”. A study has been carried out, including the modeling of a power supply system built on the basis of a private household photovoltaic system without the use of energy storage devices. Modeling is carried out using a computer program that takes into account the climatic conditions of the Irkutsk region.

Based on the data obtained, recommendations are given for improving the current regulatory legal acts of the legislation of the Russian Federation with subsequent proposals for increasing the effectiveness of stimulating the development of the “microgeneration” direction in Russia.

Keywords: microgeneration, renewable energy sources, feed in tariff, photovoltaic system, energy system model

Acknowledgments: The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0002) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 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.CKP.21.0038).

References

1. Karamov D.N., Maltsev I.A., Ilyshin P.V., Suslov K.V., Skutelnik V.V., Emelyanova E.P. Analiz mirovogo opyta stimulirovaniya razvitiya vozobnovlyayemoy energetiki i vozmozhnostey yego primeneniya v Rossii [World experience analysis in stimulation of renewable energy development and the possibilities of its application in Russia]. Energetik, 2022, no. 9, pp. 39-49, DOI: 10.34831/EP.2022.14.92.009 (in Russian).
2. Karamov D.N., Maltsev I.A., Tsyrendorzhiev B.B. Analysis of world practices for stimulating the development of renewable energy sources. A case study for Russian conditions. E3S Web of Conferences, 2021, vol. 289, 01017, DOI: 10.1051/e3sconf/202128901017.
3. Simvolokov O.A. Dogovori v elektroenergetike: problemi teorii i praktiki_ monografiya [Contracts in the electric power industry: problems of theory and practice]. Infotropik Media, 2021, pp. 143-168, ISBN 978-5-9998-0361-0 (in Russian).
4. Directive 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 12/11/2018 on promoting the use of energy from renewable sources. EU: Journal of the European Union. L 328/82 N. – URL: EUR-Lex - 32018L2001 - EN - EUR-Lex (europa.eu) (accessed: 10/19/2022).

5. Rasporyazhenie Pravitelstva Rossijskoj Federacii ot 08.01.2009 N 1-r “Ob osnovnih napravleniyah gosudarstvennoi politiki v oblasti povisheniya energoeffektivnosti elektroenergetiki na osnove ispolzovaniya vozobnovlyaemih istochnikov energii” na period do 2035 goda” [Order of the Government of the Russian Federation of January 8, 2009 No. 1-r “On the main directions of state policy in the field of increasing the energy efficiency of the electric power industry based on the use of renewable energy sources” for the period up to 2035”], available at: http://government.ru/docs/all/66930/ (accessed: 10/20/2022) (in Russian).
6. Postanovlenie Pravitelstva Rossijskoj Federacii ot 17.06.2015 no. 600 “Ob utverzhdenii perechnya ob"ektov i tekhnologij, otnosyashchihsya k ob"ektam i tekhnologiyam vysokoj energoeffektivnosti” [Resolution of the Government of the Russian Federation of June 17, 2015 no. 600 “On approval of the list of facilities and technologies related to high energy efficiency facilities and technologies"], available at: http://government.ru/docs/all/102323/ (accessed: 10/26/2022) (in Russian).
7. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 27.12.2010 no. 1172 “Ob utverzhdenii Pravil optovogo rynka jelektricheskoj jenergii i moshhnosti i o vnesenii izmenenij v nekotorye akty Pravitel'stva Rossijskoj Federacii po voprosam organizacii funkcionirovanija optovogo rynka jelektricheskoj jenergii i moshhnosti” [Resolution of the Government of the Russian Federation of December 27, 2010 no. 1172 “on approval of the rules of the wholesale market of electric energy and capacity and on amendments to certain acts of the Government of the Russian Federation on the organization of the functioning of the wholesale market of electric energy and capacity”], available at: http://government.ru/docs/all/76726/ (accessed: 10/26/2022) (in Russian).
8. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 28.05.2013 no. 449 “O mehanizme stimulirovanija ispol'zovanija vozobnovljaemyh istochnikov jenergii na optovom rynke jelektricheskoj jenergii i moshhnosti” [Resolution of the Government of the Russian Federation of May 28, 2013 no. 449 “On the mechanism for stimulating the use of renewable energy sources in the wholesale electricity and capacity market”], available at: http://government.ru/docs/all/87499/ (accessed: 10/26/2022) (in Russian).
9. Postanovlenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 10.11. 2015 no. 1210 “O vnesenii izmenenij v nekotorye akty Pravitel'stva Rossijskoj Federacii po voprosam ispol'zovanija vozobnovljaemyh istochnikov jenergii na optovom rynke jelektricheskoj jenergii i moshhnosti” [Resolution of the Government of the Russian Federation of November 10, 2015 no. 1210 “On amendments to certain acts of the Government of the Russian Federation on the use of renewable energy sources in the wholesale electricity and capacity market”], available at: http://government.ru/docs/all/104143/ (accessed: 10/26/2022) (in Russian).
10. Prikaz Minjenergo Rossii ot 22.07.2013 no. 380 “Ob utverzhdenii pravil predostavlenija iz federal'nogo bjudzheta subsidij v porjadke kompensacii stoimosti tehnologicheskogo prisoedinenija generirujushhih ob"ektov s ustanovlennoj generirujushhej moshhnost'ju ne bolee 25 mvt, priznannyh kvalificirovannymi ob"ektami, funkcionirujushhimi na osnove ispol'zovanija vozobnovljaemyh istochnikov jenergii, juridicheskim licam, kotorym takie ob"ekty prinadlezhat na prave sobstvennosti ili na inom zakonnom osnovanii” [Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of July 22, 2013 no. 380 “On approval of the rules for granting subsidies from the federal budget in order to compensate for the cost of technological connection of generating facilities with an installed generating capacity of no more than 25 MW, recognized as qualified facilities operating on the basis of the use of renewable energy sources, to legal entities to which such facilities belong by right of ownership or on another legal basis], available at: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70400104/ (accessed: 10/26/2022) (in Russian).
11. Ukaz Prezidenta Rossijskoj Federacii ot 13.05.2019 no. 216 “Ob utverzhdenii Doktriny jenergeticheskoj bezopasnosti Rossijskoj Federacii” [Decree of the President of the Russian Federation of May 13, 2019 no. 216 “On approval of the energy security doctrine of the Russian Federation”], available at: http://government.ru/docs/all/121866/ (accessed: 10/11/2022) (in Russian).
12. Rasporjazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 13.02.2019 no. 207-r “Ob utverzhdenii Strategii prostranstvennogo razvitija Rossijskoj Federacii na period do 2025 goda” [Order of the Government of the Russian Federation of February 13, 2019 no. 207-r “On approval of the spatial development Strategy of the Russian Federation for the period up to 2025], available at: http://government.ru/docs/all/120647/ (accessed: 10/11/2022) (in Russian).
13. Rasporjazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 30.09.2018 no. 2101-r “Ob utverzhdenii kompleksnogo plana modernizacii i rasshirenija magistral'noj infrastruktury na period do 2024” [Order of the Government of the Russian Federation of September 30, 2018 no. 2101-r “On approval of a comprehensive plan for modernization and expansion of the trunk infrastructure for the period up to 2024”], available at: http://government.ru/docs/all/118785/ (accessed: 10/11/2022) (in Russian).
14. Federal'nyj zakon Rossijskoj Federacii ot 27.07.2010 no. 190-FZ “O teplosnabzhenii” [Federal Law of the Russian Federation of July 27, 2010 no. 190-FZ “On heat supply”], available at: http://government.ru/docs/all/99596/ (accessed: 10/11/2022) (in Russian).

15. Federal'nyj zakon Rossijskoj Federacii ot 27.12. 2019 no. 471-FZ “O vnesenii izmenenij v Federal'nyj zakon «Ob jelektrojenergetike» v chasti razvitija mikrogeneracii” [Federal Law of the Russian Federation of December 27, 2019 no. 471-FZ “On amendments to the Federal Law “On electric power industry” regarding the development of microgeneration”], available at: http://government.ru/docs/all/125447/ (accessed: 10/11/2022) (in Russian).
16. Prikaz Minpromtorga Rossii ot 22.02.2011 no. 206 “Ob utverzhdenii Strategii razvitija jenergomashinostroenija Rossijskoj Federacii na 2010 - 2020 gody i na perspektivu do 2030 goda” [Order of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation of February 22, 2011 no. 206 “On approval of the Strategy for the development of power engineering of the Russian Federation for 2010-2020 and for the future until 2030”], available at: https://rulaws.ru/acts/Prikaz-Minpromtorga-Rossii-ot-22.02.2011-N-206/ (accessed: 10/11/2022) (in Russian).
17. Official site of “SILA” company, available at: https://sila-solarpanel.ru/mono-panels (accessed: 10/15/2022) (in Russian).
18. Official site of “SofarSolar” company, available at: https://www.sofarsolar.com (accessed: 10/15/2022)
19. Official site of “TechnoLine” company, available at: https://e-solarpower.ru (accessed: 10/15/2022) (in Russian).
20. Karamov D.N., Naumov I.V. Modelirovanie solnechnoj elektrostancii s uchyotom izmeneniya parametrov okruzhayushchej sredy [Modelling of a photovoltaic system in the context of varying weather conditions]. Elektricheskiye stantsii [Electrical stations], 2020, no. 6 (1067), pp. 21-28, DOI: 10.34831/EP.2020.1067.6.004 (in Russian).
21. Tarify na elektroenergiyu v raznyh regionah RF [Tariffs for electricity in different regions of the Russian Federation], available at: https://energo-24.ru/tariffs/electro.html (accessed: 10/15/2022) (in Russian).

Karamov Dmitriy Nikolaevich. *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826, dmitriy.karamov@mail.ru, 664033, Irkutsk, st. Lermontov, 130, Russia.*

Maltsev Ilya Andreevich. *Postgraduate student and research engineer at the Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, SPIN: 6134-2190, malcev.iluha@yandex.ru, 664033, Irkutsk, st. Lermontov, 130, Russia.*

Статья поступила в редакцию 13.12.2022; одобрена после рецензирования 14.03.2023; принята к публикации 20.03.2023.
The article was submitted 12/13/2022; approved after reviewing 03/14/2023; accepted for publication 03/20/2023.

Математические и информационные технологии в энергетике, экономике и экологии

УДК 620.9
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.008

Анализ электроемкости ВВП Республики Беларусь при прогнозировании электропотребления

Зорина Татьяна Геннадьевна[1,2], Юркевич Ольга Ивановна[2]
[1] Институт энергетики национальной академии наук Беларуси,
[2] Белорусский государственный экономический университет,
Республика Беларусь, Минск, *tanyazorina@tut.by*

Аннотация. В статье проведен анализ электроемкости ВВП Республики Беларусь: исследована динамика с учетом различных подходов к отражению показателей, проведено сопоставление со странами Евразийского экономического союза (далее – ЕАЭС), проведен анализ по отраслям экономики и областям республики, исследовано влияние изменения тарифов на электроэнергию и электропотребления населения, оценены факторы, оказывающие влияние на изменение электроемкости ВВП. Анализ позволил сделать выводы о существенной взаимосвязи между объемом ВВП и электропотреблением, определить показатель энергетической эластичности, на основании которого возможно прогнозировать изменение электропотребления. Отмечено, что, при сопоставимом уровне электроемкости, в Республике Беларусь наиболее высокий уровень тарифов в сравнении со странами ЕАЭС и Европейского союза, который оказывает значительное влияние на конкурентоспособность национальной экономики. Определено, что наиболее высокий уровень электроемкости в республике можно отметить в областях, в которых расположена большая часть промышленных производств, наибольшей электроемкостью характеризуется горнодобывающая промышленность. Отмечено наличие незначительной отрицательной взаимосвязи между тарифом на электроэнергию и ее потреблением организациями, и общая тенденция к росту электропотребления организациями при снижении уровня тарифа. При этом определена зависимость между этими показателями по отдельным группам потребителей, по данным группам потребителей построены регрессионные модели влияния тарифа на объем потребления электроэнергии. Исследование, рассмотренное в статье, позволяет сделать вывод о том, что наращивание объемов ВВП является действенным механизмом увеличения электропотребления, что весьма актуально с учетом необходимости роста объемов потребления электроэнергии в условиях интеграции БелАЭС в энергосистему Республики Беларусь.

Ключевые слова: электроемкость ВВП, электроэнергетика, потребление электроэнергии, конкурентоспособность национальной экономики, энергетика Беларуси

Цитирование: Зорина Т.Г. Анализ электроемкости ВВП Республики Беларусь при прогнозировании электропотребления / Т.Г. Зорина, О.И. Юркевич // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 86-98. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.008.

Введение. Вне зависимости от отраслевой специфики экономики любой страны мира, ее размеров и климато-географического положения, основной долей из всех потребляемых энергоресурсов является электрическая энергия. Ввод БелАЭС в энергосистему Республики Беларусь приводит к необходимости увеличения объемов потребления электроэнергии, в связи с чем вопросы прогнозирования электропотребления становятся весьма актуальными.

К основным факторам, которые могут влиять на уровень конечного электропотребления, могут быть отнесены темпы роста ВВП и структурные трансформации в экономике, в связи с чем с целью прогнозирования объемов электропотребления целесообразно использовать показатель электроемкости ВВП. Исследование электроемкости ВВП и факторов, оказывающих влияние на данный показатель, позволит определить возможности прогнозирования электропотребления на основе данного параметра.

В общем виде электроемкость ВВП – макроэкономический параметр, производный от множества факторов: состава и объемов производства различных видов продукции, роста

экономики и трансформации ее структуры, развития электроемких видов экономической деятельности и особенностей связанных с ними технологических процессов, технического состояния основных средств и проведения модернизации изношенного оборудования, совершенствования технологии производства, влияния климатических и погодных условий и др. [1]. Показатель электроемкости ВВП характеризует количественный расход электрической энергии, затрачиваемый на единицу ВВП, и определяется отношением потребления электрической энергии к стоимостному значению ВВП [2].

1. Методы прогнозирования электропотребления. Существующие методы прогнозирования электропотребления можно разделить на основные группы: экстраполяционные, корреляционные, адаптивные и смешанные.

Метод экстраполяции связан с подбором аппроксимирующих зависимостей для ретроспективных данных, отражающих тенденцию изменения электропотребления. Полученную зависимость можно экстраполировать на желаемый интервал времени в будущем. При оценке параметров зависимостей наиболее распространенными являются метод наименьших квадратов, метод экспоненциального сглаживания временных рядов, метод скользящей средней и другие [3].

Корреляционно-регрессионный метод прогнозирует поведение переменной величины, исходя из временной взаимосвязи между ней и другой переменной, которая может быть выражена в виде статистической зависимости, называемой регрессией или корреляцией. Данные методы дают возможность установить зависимость изменения одной переменной в случае изменения другой на определенную величину.

В основе адаптивных методов прогнозирования лежит модель рекурсивного гармонического процесса, предложенная Дж. Юлом. Первоначальное построение прогнозной модели выполняется по нескольким первым наблюдениям объекта, составляется прогноз, который сравнивается с фактическими данными. По результатам прогноза происходит корректировка модели, затем составляется прогноз по следующим наблюдениям и так до исчерпания всех наблюдений, таким образом, адаптация осуществляется итеративно с получением каждой новой фактической точки ряда. Оценивание коэффициентов адаптивной модели осуществляется на основе рекуррентного метода, который отличается от метода наименьших квадратов, метода максимального правдоподобия и других методов тем, что не требует повторения всего объема вычислений при появлении новых данных. Однако в настоящее время не существует методики, вычисляющей достаточный объем исходной информации для таких моделей, что значительно усложняет процесс их реализации.

К смешанным методам можно отнести комплексы экономико-математических моделей, учитывающие сложные, меняющиеся взаимосвязи между объёмами энергопотребления, условиями и уровнем развития экономики и топливно-энергетическим комплексом в целом. Примером может служить французская имитационная модель MEDEE, позволяющая оценивать влияние на энергопотребление таких факторов, как структура и темпы промышленного производства, уровень жизни населения, политика энергосбережения в отдельных секторах и так далее [4]. При этом потребности в электроэнергии рассчитываются как для производственный, так и для непроизводственной сфер экономики.

При исследовании влияния электроемкости ВВП на электропотребление в данной статье использован метод корреляционно-регрессионного анализа.

2. Электроемкость ВВП Республики Беларусь. По данным Национального статистического комитета Республики Беларусь [5] показатель электроемкости ВВП рассчитывается по ВВП в ценах 2005 г. Динамика данного показателя представлена на рис. 1.

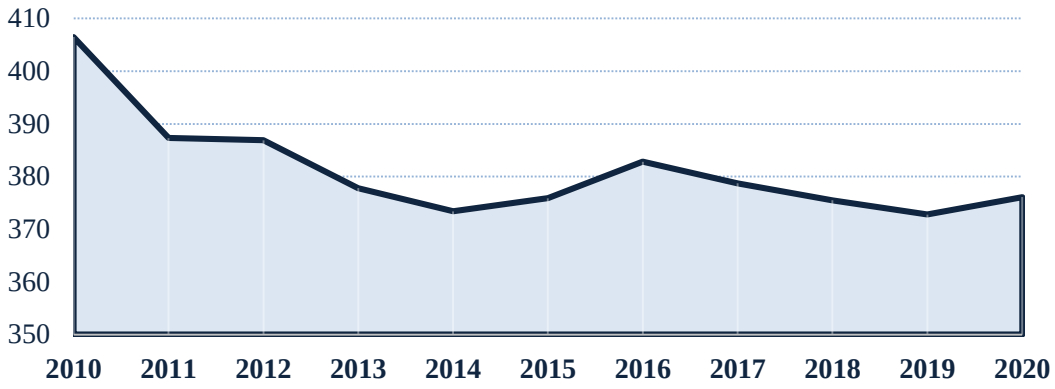


Рис. 1. Электроемкость ВВП Республики Беларусь (ВВП в ценах 2005 г.), кВт ч / млн. руб.

С 2010 по 2020 год электроемкость ВВП Республики Беларусь снизилась на 7,5% до уровня 376,1 кВт ч / млн. руб. К основным факторам, оказывающим влияние на снижение данного показателя, можно отнести изменение структуры производства (доля сферы услуг в Республике Беларусь в последние годы неизменно растет – энергопотребление в сфере услуг значительно ниже, чем в промышленном секторе), а также изменение уровня технологического развития различных отраслей промышленности. Однако, несмотря на общую тенденцию к снижению электроемкости, за исследуемый период этот показатель дважды увеличивался – в 2016 и 2020 годах.

Необходимо отметить, что в научных публикациях ведется полемика о том, как представлять ВВП для наиболее корректной оценки энергоемкости: по паритету покупательной способности (далее – ППС) или валютному курсу, в текущих ценах или ценах базового года, в национальной валюте или долларах. Представление показателя электроемкости ВВП в различных единицах измерения приводит к значительному его разбросу, особенно для стран с переходной экономикой, в том числе это относится и к Беларуси (рис. 2).

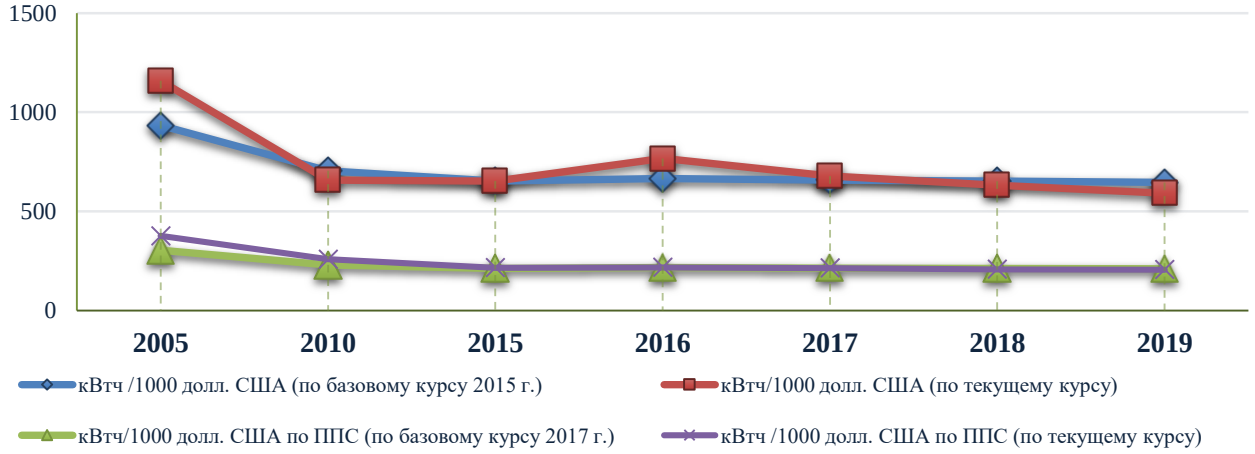


Рис. 2. Разброс значений электроемкости ВВП при различном представлении показателя

В данной статье при проведении анализа внутри страны будет принят ВВП по валютному курсу, а при проведении межстрановых сопоставлений, в целях устранения влияния диспаритета цен и сопоставимого измерения объема национального продукта, пересчет ВВП различных стран будет произведен по паритету покупательской способности (далее – ППС). При этом необходимо отметить, что расчет по ППС, как правило, повышает величину ВВП стран с низкими и средними доходами и понижает значение этого показателя для стран с высокими доходами [6].

Объёмы ВВП и объемы электропотребления в Республике Беларусь за 2010-2020 годы представлены на рис. 3.

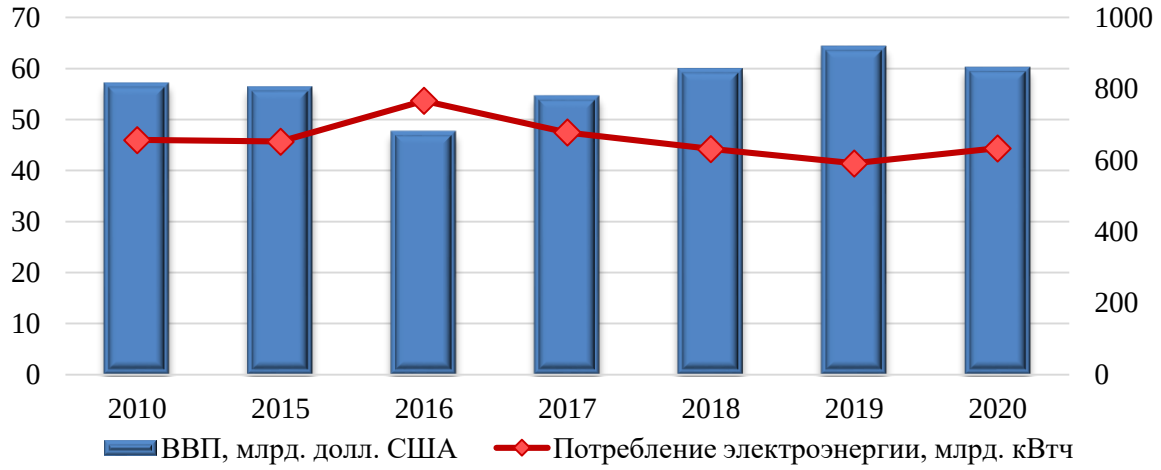


Рис. 3. Объём ВВП и объемы электропотребления в Республике Беларусь за 2010-2020 гг.

Необходимо отметить существенную взаимосвязь между электропотреблением и объемом ВВП: коэффициент корреляции составляет 0,96, что свидетельствует о возможности прогнозирования электропотребления на основании прогноза изменения ВВП.

При этом для прогнозирования электропотребления больше подходит показатель энергетической эластичности, отражающей процентное изменение потребления энергии для достижения одного процента изменения в национальном ВВП, поскольку он освобожден от стоимостных оценок. За 2005-2020 гг. усредненное значение коэффициента эластичности электропотребления по ВВП составило 0,1: это означает, что на 1% относительного прироста ВВП приходится 0,1% прироста электропотребления.

2.1. Сравнение электроемкости ВВП Республики Беларусь со странами ЕАЭС. Сравнение электроемкости ВВП Республики Беларусь со странами Евразийского экономического союза (далее – ЕАЭС) и Европейского Союза (далее – ЕС), представленное на рис. 4, показывает, что уровень электроемкости ВВП Республики Беларусь (0,19 кВт ч/долл. США) значительно ниже, чем в большинстве стран ЕАЭС (в частности, на 24% ниже Российской Федерации, на 9,5% ниже Республики Казахстан).

Однако несмотря на значительное снижение электроемкости за последние годы, данный показатель в Республике Беларусь на 18,7% выше стран Европейского союза в целом (0,16 кВт ч/долл. США).

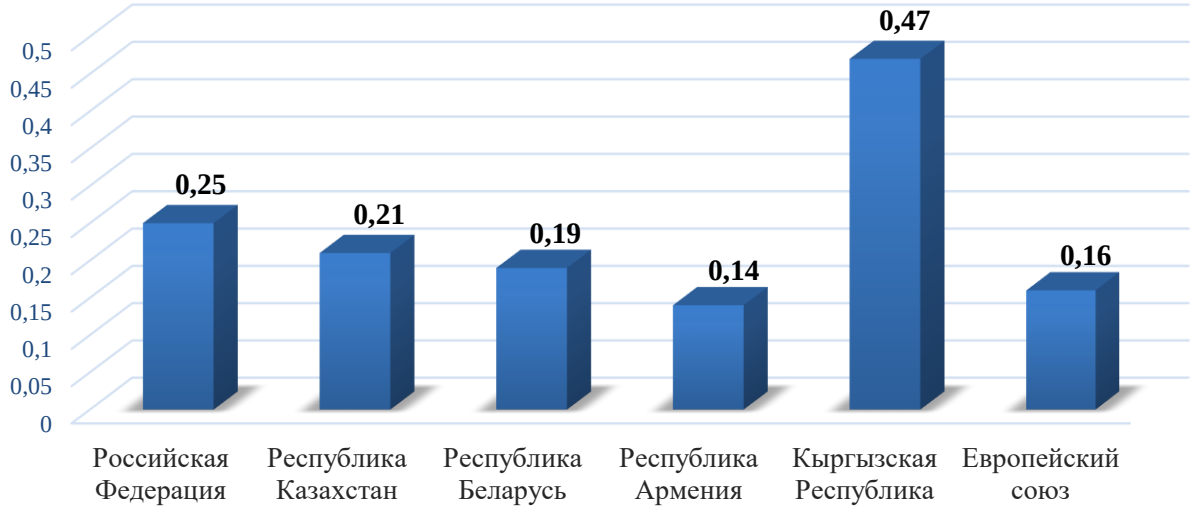


Рис. 4. Уровень электроемкости ВВП стран ЕАЭС и Европейского союза, рассчитанный по паритету покупательской способности, кВт ч / долл. США (по данным [7])

К основным факторам, определяющим более высокое значение электроемкости ВВП для Республики Беларусь в сравнении со странами ЕС, можно отнести следующие:

– структура производства: доля сферы услуг, в которой электропотребление значительно ниже, чем в промышленном секторе, в Республике Беларусь составляет 49,1%, в Европейском союзе – 64,5%;
– климатический фактор: низкие температуры и их значительные колебания приводят к дополнительному потреблению электроэнергии;
– технологический фактор: для стран с развитой экономикой характерно использование более современного и высокотехнологичного оборудования.

Схожими факторами отличаются и другие страны ЕАЭС, например, Российская Федерация [8].

Необходимо отметить, что, несмотря на практически сопоставимый уровень электроемкости ВВП, уровень тарифов на электрическую энергию для промышленности в Республике Беларусь значительно выше, чем странах Европы и странах ЕАЭС (рис. 5), что существенно ограничивает конкурентоспособность национальной промышленности [9].

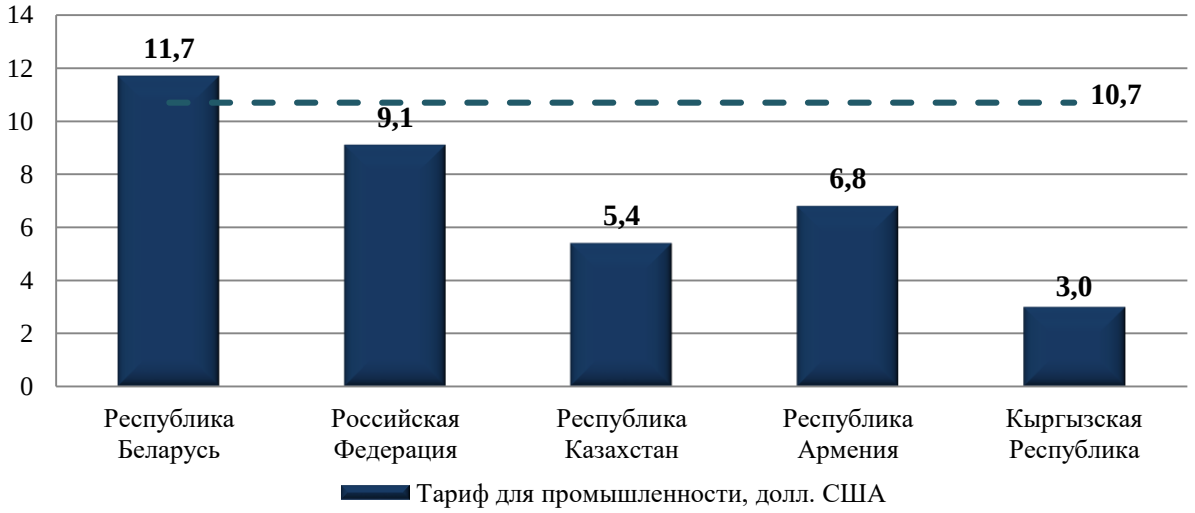


Рис. 5. Уровень тарифов на электроэнергию для промышленности стран ЕАЭС и Европейского союза, кВтч (по данным [10])

Снижение электроемкости ВВП для стран ЕАЭС и Республики Беларусь, в частности, остается довольно актуальной задачей и с учетом обозначенных факторов возможно за счет внедрения новых энергоэффективных технологий во всех отраслях экономики и отдельных технологических процессах. При этом обязательным условием для развития промышленности является установление сбалансированных тарифов на энергоресурсы, обеспечивающий конкурентоспособность продукции [11].

2.2. Электроемкость ВВП по регионам Республики Беларусь. Можно отметить довольно схожую тенденцию изменения электроемкости по областям Республики Беларусь (рис. 6).

Наиболее низкие показатели электроемкости ВВП отмечены по Минской области, наиболее высокие – по Гомельской и Витебской, что обусловлено расположением в данных областях большей части промышленных производств [12].

При этом, при общем росте электроемкости ВВП Республики Беларусь в 2016 году на 17,8% к уровню предыдущего года, прирост по Гомельской области составил 23,4%. Данное явление обусловлено общим снижение потребления электроэнергии в Гомельской области в 2016 году на 109 млн. кВт ч, или 1,5%, и снижением ВРП на 936,2 млн. долл., или на 20%, в том числе за счет снижения объемов производства в обрабатывающей промышленности на

26%.

В 2020 году при общем росте электроемкости ВВП по республике на 5,0% к уровню предыдущего года, прирост электроемкости по Брестской области составил 6,8%. Общее потребление электроэнергии по области увеличилось в абсолютном выражении на 141 млн. кВт ч, или на 4,3%, при снижении ВРП (валовой региональный продукт) на 2,6% за счет роста производств обрабатывающей промышленности на 103,3%.

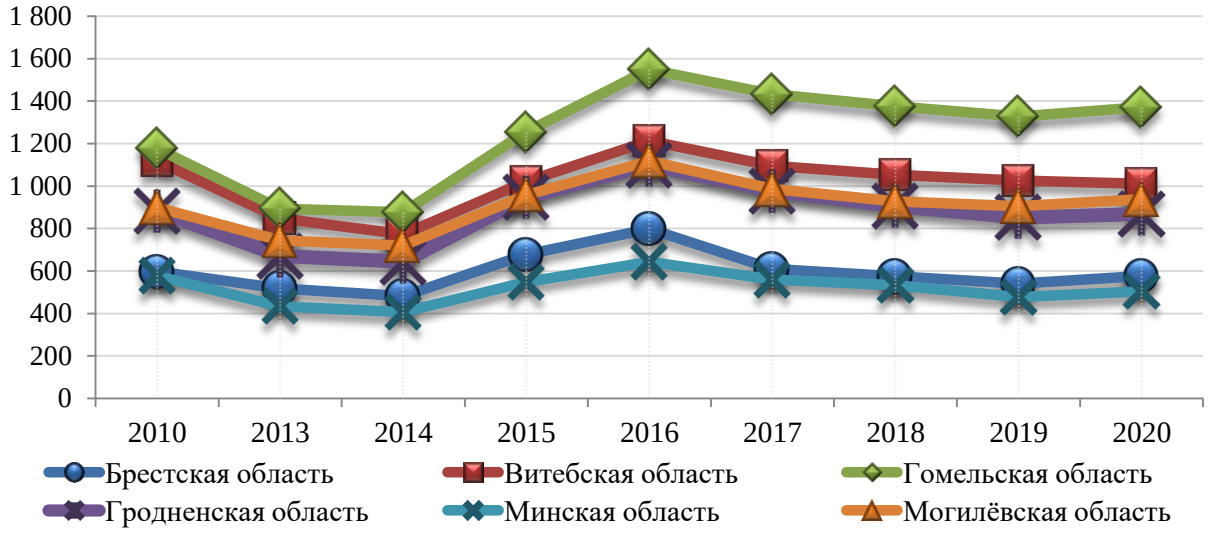


Рис. 6. Электроемкость ВВП Республики Беларусь по областям, кВт ч / 1000 долл. США

Также следует отметить, что в 2020 году при росте электроемкости по республике снижение по Витебской области составило 1,4%: потребление электроэнергии в Витебской области в абсолютном выражении уменьшилось на 76 млн. кВт ч, или 0,25% при незначительном изменении ВРП (100,4% к уровню 2019 года).

2.3. Электроемкость ВВП Республики Беларусь по отраслям народного хозяйства. Электропотребление в отрасли промышленности практически в 1,5 раза выше энергопотребления в сфере услуг и примерно в 2 раза выше, чем потребление энергии населением (рис. 7).

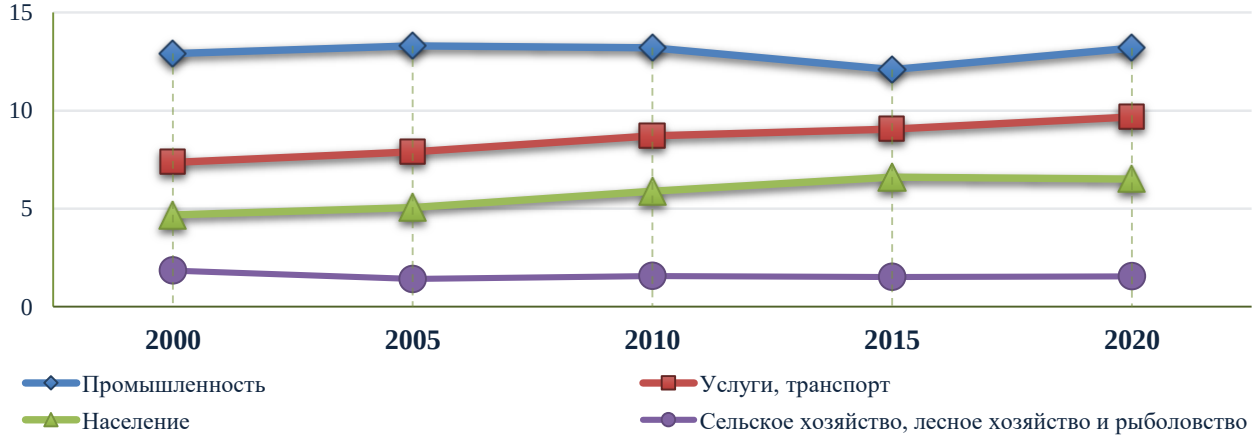


Рис. 7. Электропотребление в разрезе отраслей экономики, млн. кВтч

В связи с этим, рассматривая показатель электроемкости в разрезе отраслей экономики, можно отметить, что основное снижение электроемкости ВВП Республики Беларусь достигнуто за счет снижения электроемкости промышленности (рис. 8).

За последние 15 лет электроемкость промышленности (включая строительство) снизилась на 30,6%: с 549 кВт ч/1000 $ до 381 кВт ч/1000 $, что при наращивании объемов ВВП свидетельствует о повышении эффективности использования энергии, улучшении технической базы производств с внедрением энергоэффективных технологий и оборудования, по-

вышении уровня организации производства.

В отрасли сельского, лесного и рыбного хозяйства за период с 2005 по 2020 год электроемкость снизилась на 39,9%, однако основное снижение произошло более 15 лет назад, за последние 5 лет электроемкость в данной отрасли возросла на 3,6%.

В отрасли услуг и транспорта также при снижении электроемкости в рассматриваемом периоде на 50,5%, основное снижение произошло до 2010 года, за последние 5 лет электроемкость возросла на 5,6%, что может свидетельствовать о повышении использования электроэнергии в данных неэлектроемких отраслях, в том числе за счет развития электрифицированного транспорта.

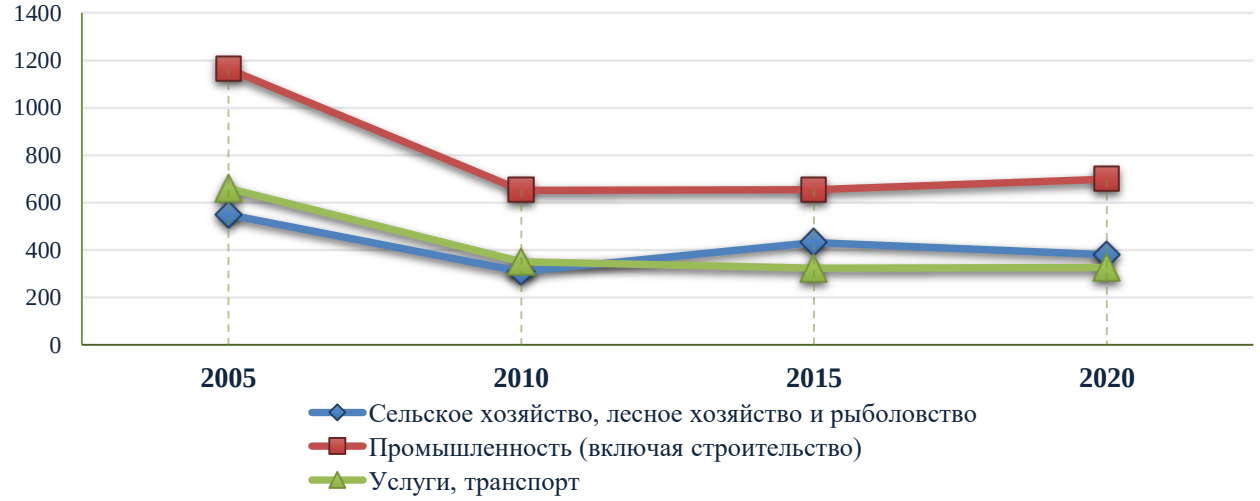


Рис. 8. Динамика электроемкости ВВП в разрезе отраслей экономики

При этом анализируя рост электроемкости ВВП в 2020 году, можно отметить следующее:

- за счет промышленности электроемкость увеличилась на 10,1 кВтч / 1000 долл. США, при этом снижение объема производства промышленности привело к увеличению на 15,6 кВт ч/1000 долл. США, снижение электропотребления в промышленности привело к снижению электроемкости ВВП на 5,5 кВт ч/1000 долл. США;
- за счет сферы услуг и транспорта электроемкость выросла на 18,1 кВт ч/1000 долл. США, в том числе на 15,9 кВт ч/1000 долл. США за счет роста объема производства и на 2,2 кВт ч/1000 долл. США за счет роста электропотребления данной сферы;
- за счет сферы сельского, лесного и рыбного хозяйства электроемкость увеличилась на 3,0 кВт ч/1000 долл. США, в том числе на 2,6 кВт ч/1000 долл. США за счет объема производства и на 0,4 кВт ч/1000 долл. США за счет роста потребления энергии;
- за счет роста потребления населением электроемкость возросла на 3,4 кВт ч/1000 долл. США.

Если рассматривать количество электроэнергии, затраченной на производство одной единицы ВВП по отраслям промышленности (рис. 9), то наибольшей электроёмкостью обладает горнодобывающая промышленность (993,6 кВт ч/1000 долл. США) а наименьшей – строительство.

В разрезе обрабатывающей промышленности наиболее высокой электроемкостью обладает производство химической продукции (885,9 кВт ч/1000 долл. США), металлургия (684,7 кВт ч/1000 долл. США) и производство резиновых и пластмассовых изделий (484,0 кВт ч/1000 долл. США), наименее высокой – пищевая промышленность (140,7 кВт ч/1000 долл. США) – рис. 10.

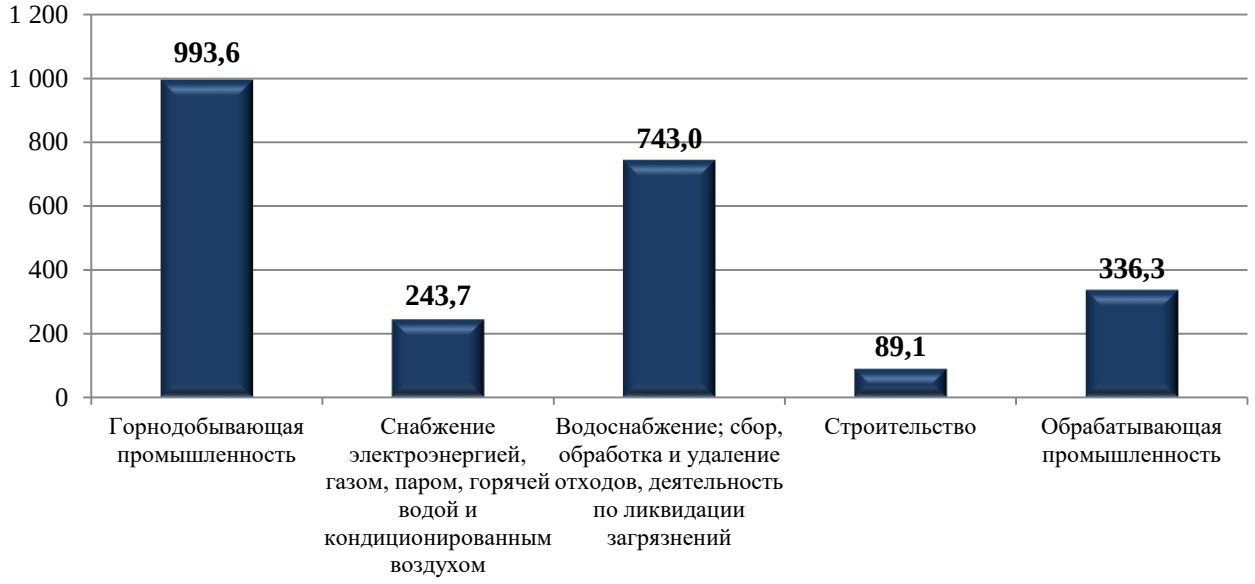


Рис. 9. Электроемкость ВВП в разрезе отраслей промышленности, кВт ч/1000 долл. США

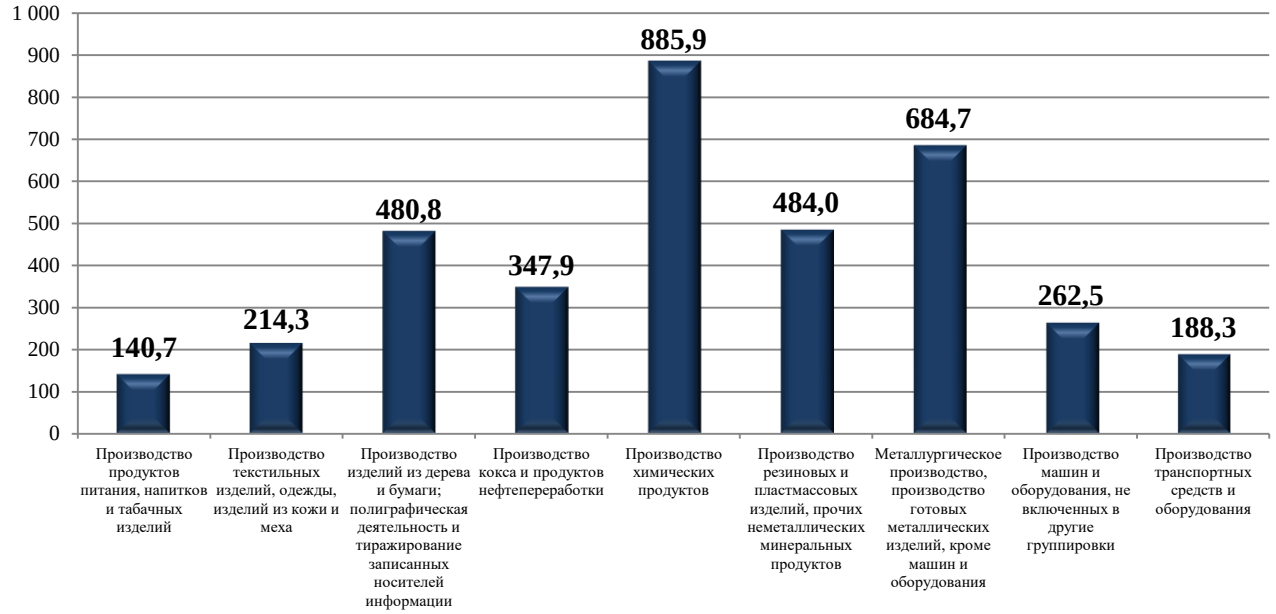


Рис. 10. Электроемкость обрабатывающей промышленности по видам деятельности, кВт ч/1000 долл. США

2.4. Влияние на электроемкость ВВП электропотребления населения. При анализе электроемкости необходимо отметить влияние на данный показатель потребления электроэнергии населением, поскольку в общем виде электроемкость учитывает весь объем потребленной электроэнергии в стране. В 2020 году за счет увеличения потребления электроэнергии населением на 218 млн. кВтч, или на 3,3% к предыдущему году, рост показателя электроемкости составил 3,4 кВтч/1000 долл. США.

Необходимо отметить существующую тенденцию к росту потребления электроэнергии населением: динамика потребления электроэнергии на душу населения представлена на рис. 11. За последние 10 лет на потребление на 1 человека увеличилось на 15,6%, при незначительной тенденции к росту с 2013 по 2019 год (2,4% за весь период) за последний год на электропотребление увеличилось 3,8%.

Данное явление можно объяснить введением с 1 января 2019 года льготных тарифов для населения на электрическую энергию для нужд отопления и горячего водоснабжения в

жилых домах, не оборудованных в установленном порядке системами централизованного тепло- и газоснабжения, с последующим переходом граждан на электрообогрев жилых домов.

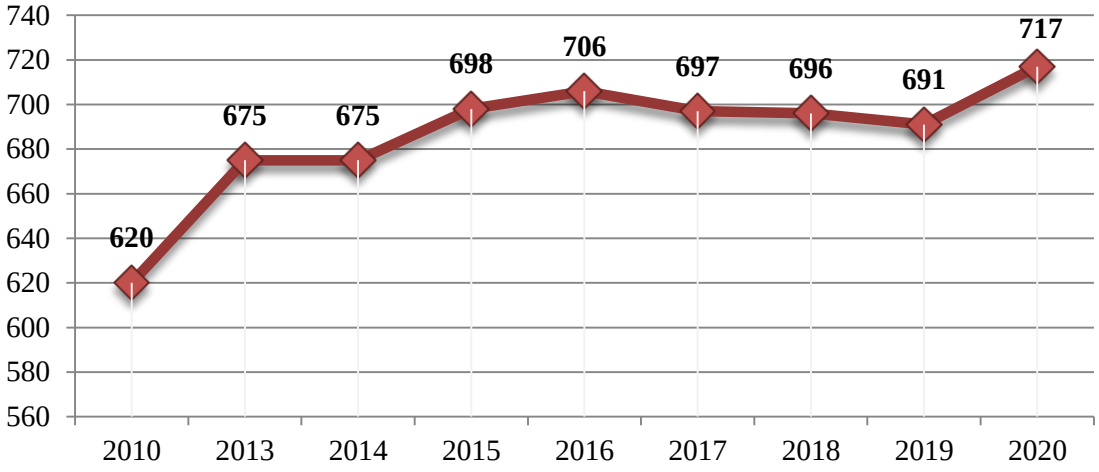


Рис. 11. Потребление электроэнергии на душу населения, млн. кВт ч

2.5. Роль ценового фактора в изменении электропотребления. Для получения обобщенного представления о влиянии тарифов на электроэнергию на изменение электропотребления было проанализировано соотношение фактического среднего тарифа и полезного потребления электроэнергии по организациям.

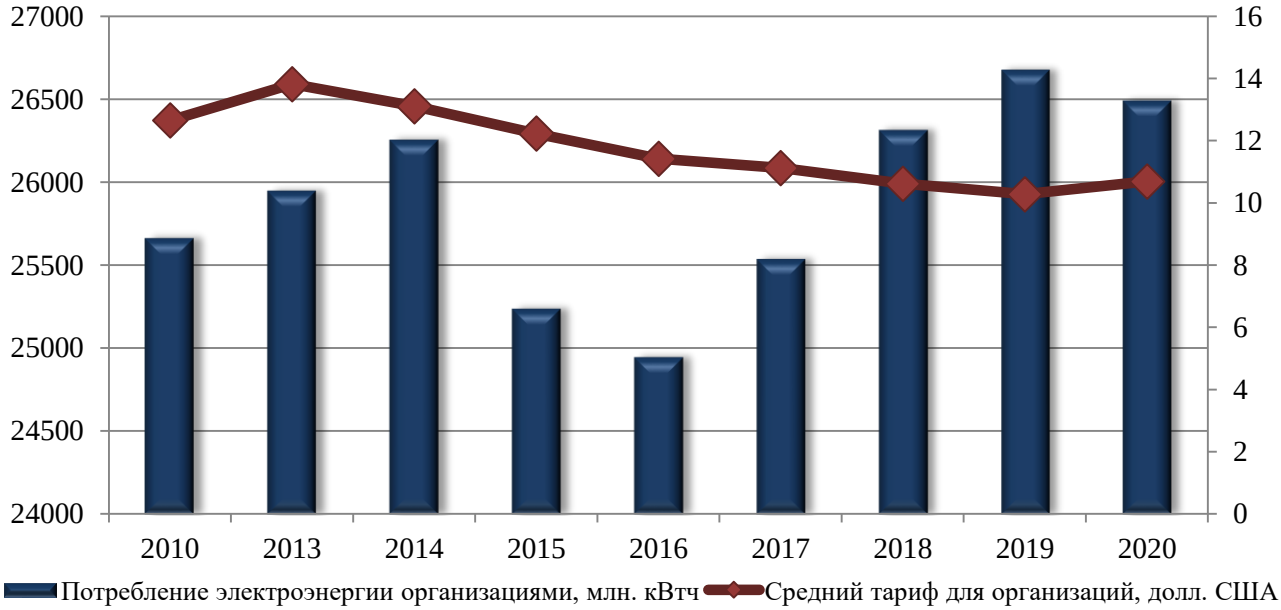


Рис. 12. Динамика полезного потребления электроэнергии по организациям и среднего тарифа на электроэнергию для организаций

Анализ показал наличие незначительной отрицательной взаимосвязи между тарифом на электроэнергию и ее потреблением организациями в Республике Беларусь. Коэффициент корреляции составляет -0,28 (рис. 12).

При этом необходимо отметить, что за рассматриваемый период прослеживается общая тенденция к росту электропотребления организациями при снижении уровня тарифа.

С учетом дифференциации тарифов по группам потребителей был проведен аналогичный анализ по группам потребителей. Наиболее высокие коэффициенты корреляции были отмечены по группам «Непромышленные потребители» и «Промышленные и приравненные к ним потребители с присоединенной мощностью до 750 кВ×А» – 0,898 и 0,815 соответ-

ственно, т.е. по группам, которые наиболее оперативно могут изменять условия хозяйствования, в т.ч. энергопотребление.

Наличие тесной взаимосвязи между показателями позволяет построить регрессионные модели влияния тарифов на объем потребления электроэнергии.

Для группы «Непромышленные потребители» модель будет иметь вид:

$$y = 12012x + 1265{,}1,\ R^2 = 0{,}8068, \quad (1)$$

где y – объем потребления электроэнергии, млн. кВтч;

x – средний тариф, $/кВтч;

R^2 – коэффициент детерминации.

Для группы «Промышленные и приравненные к ним потребители с присоединенной мощностью до 750 кВ×А» модель будет иметь вид:

$$y = 4414{,}4x + 1743{,}4,\ R^2 = 0{,}6636 \quad (2)$$

Анализ полученных моделей позволяет сделать вывод, что 80,68% вариации потребления электроэнергии непромышленными потребителями (1) и 66,36% вариации потребления электроэнергии промышленными и приравненными к ним потребителями с присоединенной мощностью до 750 кВ×А (2) объясняется размером тарифа.

Следует отметить, что отсутствие тесной зависимости между тарифом и электропотреблением по крупным промышленным потребителям является признаком отсутствия конкуренции на рынке электроэнергии.

При общей тенденции к снижению электропотребления при росте тарифа на электроэнергию в 2010-2016 можно отметить отсутствие тесной зависимости между электропотреблением населения и тарифом на электроэнергию (рис. 13), о чем свидетельствует достаточно низкий коэффициент корреляции (0,17). Это свидетельствует о том, что существующий довольно низкий уровень тарифов для населения не стимулирует население к энергосбережению (при среднем уровне тарифов для населения 20,8$ в ЕС, средний тариф для населения в Республике Беларусь составляет 8,5$ за 1 кВтч).

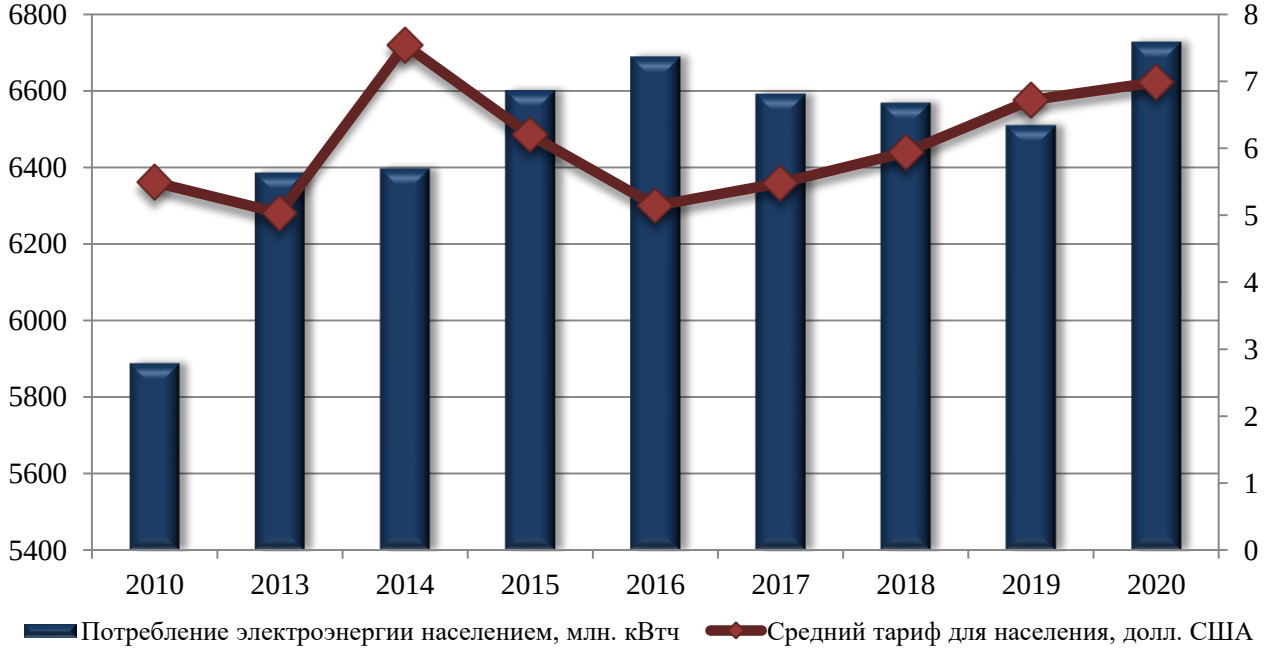


Рис. 13. Динамика полезного потребления электроэнергии населением и среднего тарифа на электроэнергию для населения

Заключение. Проведенный анализ электроемкости ВВП позволил сделать выводы о существенной взаимосвязи между объемом ВВП и электропотреблением, определить показатель энергетической эластичности, на основании которого возможно прогнозировать изме-

нение электропотребления. Поскольку ввод БелАЭС в энергосистему Республики Беларусь приводит к необходимости увеличения объемов потребления электроэнергии, действенным механизмом государственной политики повышения потребления электроэнергии будет наращивание объемов ВВП. Отмечены группы потребителей, на потребление электроэнергии которыми оказывает влияние тариф на электроэнергию, что целесообразно учитывать при формировании тарифной политики.

Результаты проведенного исследования особенностей электроемкости ВВП могут быть использованы при дальнейшем формировании энергетической политики Республики Беларусь. Прирост внутреннего потребления электроэнергии может быть обеспечен за счет создания новых электроемких производств, развития электрофицированного транспорта и зарядной инфраструктуры для него. При этом обязательным условием для развития промышленности, производства и последующего экспорта энергоемкой продукции является установление сбалансированных тарифов на энергоресурсы, стимулирующих рост потребления и обеспечивающих конкурентоспособность продукции.

Список источников

1. Антонов Н.В. Динамика электроемкости России в 2006-2007 гг. в поле прогнозирования электропотребления / Н.В. Антонов, Л.И. Татевосова // Проблемы прогнозирования, 2009. – №3 (104). – С. 77-91.
2. Баев И.А. Региональные резервы энергоэффективности / И.А. Баев, И.А. Соловьева, А.П. Дзюба // Экономика региона, 2013. – №3. – С. 180-189.
3. Орлов Д.В. Методы прогнозирования электропотребления / Д.В. Орлов, А.В. Таран, Е.В. Зиновьев, Д.Г. Мумладзе // Евразийский Союз Ученых, 2015. – №4-4 (13). – С. 168-171.
4. Старкова Г. Методы и модели прогнозирования электропотребления на региональном уровне / Г. Старкова // Information theories and applications, 2012. – №19 (4). – С. 378-383.
5. Энергетический баланс Республики Беларусь: статистический сборник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 2021. – 147 с.
6. Нигматулин Б.И. Электроемкость ВВП. Цены на электроэнергию для конечных потребителей и на шинах АЭС в России и США. Сравнение в среднем с Миром, ОЭСР, США, Китаем и другими странами / Б.И. Нигматулин // Известия РАН. Энергетика, 2019. – №6. – С. 19-42.
7. Электроэнергетика Содружества Независимых Государств 2010-2020: ежегодный сборник / Исполнительный комитет Электроэнергетического совета СНГ. – Москва, 2021. – 186 с.
8. Мельник А.Н. Оценка влияния энергетического фактора на развитие отечественной экономики в кризисных условиях / А.Н. Мельник, Т.Ю. Анисимова // Вестник Томского государственного университета, 2010. – №11. – С.199-206.
9. Зорина Т.Г. Тарифная политика на энергоресурсы в странах ЕАЭС / Т.Г. Зорина, О.И. Юркевич // Научные труды Белорусского государственного экономического университета. – Минск: БГЭУ, 2022. – Вып. 15. – С. 182-189.
10. Рейтинг стран Европы по доступности электроэнергии для населения – URL: https://riarating.ru/.
11. Зорина Т.Г. Формирование комплексной тарифной политики на энергоресурсы в Беларуси / Т.Г. Зорина, С.Г. Прусов // Белорусский экономический журнал, 2019. – № 4. – С. 86-99.
12. Жигальская Л.О. Устойчивое развитие энергетического сектора Республики Беларусь: региональные особенности / Л.О. Жигальская // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием Шестые Максаковские чтения, 2021. – С. 49-56.

Зорина Татьяна Геннадьевна. *Профессор по специальности экономика, заведующая сектором Экономики энергетики Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, AuthorID: 84240, SPIN: 1455-9834, ORCID: 0000-0001-9665-2756, tanyazorina@tut.by.*

Юркевич Ольга Ивановна. *Аспирант Белорусского государственного экономического университета по специальности экономика и управление народным хозяйством, oi.yurkevich@yandex.by.*

UDC 620.9
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.008

Analysis of electricity intensity of GDP of the Republic of Belarus in the field of electricity consumption forecasting

Tatsiana G. Zorina[1,2], Olga I. Yurkevich[2]
[1]Institute of Power Engineering of NAS of Belarus,
[2]Belarus State Economic University, Belarus, Minsk, *tanyazorina@tut.by*

Abstract. The article analyzes the electricity intensity of the GDP of the Republic of Belarus: the dynamics was studied taking into account different approaches to the reflection of indicators, a comparison with the countries of the Eurasian Economic Union (hereinafter - EAEU) was carried out, the analysis by sectors of the economy and regions of the Republic was conducted, the impact of changes in electricity tariffs and electricity consumption of the population was studied, the factors influencing the change in the electricity intensity of GDP were estimated. The analysis allowed to make conclusions about essential interrelation between the volume of GDP and electricity consumption, to determine the index of energy elasticity, on the basis of which it is possible to forecast the change of electricity consumption. It was noted that with a comparable level of electricity intensity, the Republic of Belarus has the highest level of tariffs compared to the EEU and European Union countries, which has a significant impact on the competitiveness of the national economy. It was determined that the highest level of electricity intensity in the Republic can be noted in the areas where most of the industrial production is located, the highest electricity intensity is characterized by the mining industry. It was noted that there is no direct correlation between the tariff and the volume of electric power consumption, with a general trend towards the growth of electric power consumption by organizations with a decrease in the tariff level, indicating the absence of competition on the electric power market in the republic. At the same time the dependence between these indicators for separate groups of consumers was determined, regression models of influence of tariff for electric power on the volume of its consumption were built for these groups of consumers. The research carried out in the article leads to the conclusion that increasing the volume of GDP is an effective mechanism to increase electricity consumption, which is very relevant taking into account the need to increase the volume of electricity consumption under the conditions of integration of BelNPP into the energy system of the Republic of Belarus.

Keywords: electricity intensity of GDP, electric power industry, electricity consumption, competitiveness of the national economy, energy industry of Belarus

References

1. Antonov N. V., Tatevosova L. I. Dinamika elektroemkosti Rossii v 2006-2007 gg. v pole prognozirovaniya elektropotrebleniya [The dynamics of electricity intensity of the Russian economy in 2006-2007]. Problemy prognozirovaniya [Problems of Forecasting], 2009, no. 3, pp. 77-91.
2. Baev I.A., Solovyova I.A., Dzyuba A.P. Regional'nye rezervy energoeffektivnosti [Regional reserves of energy efficiency]. Ekonomika regiona [Economics of the region], 2013, no. 3, pp. 180-189.
3. Orlov D.V., Taran A.V. Metody prognozirovaniya elektropotrebleniya [Methods for forecasting power consumption]. Evrazijskij Soyuz Uchenyh [Eurasian Union of Scientists], 2015, no. 4-4 (13), pp. 168-171.
4. Starkova G. Metody i modeli prognozirovaniya elektropotrebleniya na regional'nom urovne [Methods and models for forecasting electricity consumption at the regional level]. Information Theories and Applications, Minsk, 2012, no. 19 (4), pp. 378-383.
5. Energeticheskij balans Respubliki Belarus': statisticheskij sbornik [Energy balance of the Republic of Belarus: statistical collection]. Nacional'nyj statisticheskij komitet Respubliki Belarus' [National Statistical Committee of the Republic of Belarus], 2021, 147 p.
6. Nigmatulin B. I. Elektroemkost' VVP. Ceny na elektroenergiyu dlya konechnyh potrebitelej i na shinah AES v Rossii i SSHA. Sravnenie v srednem s Mirom, OESR, SSHA, Kitaem i drugimi stranami [Electricity intensity of GDP. Electricity tarifs for end consumers. Electricity prices at nuclear power plants in Russia and USA. Comparison with the World, OECD, USA, China and other countries]. Izvestiya RAN. Energetika [Bulletin of the RAS. Energy], 2019, no. 6, pp. 19-42.
7. Elektroenergetika Sodruzhestva Nezavisimyh Gosudarstv 2010-2020: ezhegodnyj sbornik [Electric power industry of the Commonwealth of Independent States 2010-2020: Annual collection]. Moscow Executive Committee of the CIS Electric Power Council, 2021, 186 p.

8. Melnik A.N., Anisimova T.Y. Ocenka vliyaniya energeticheskogo faktora na razvitie otechestvennoj ekonomiki v krizisnyh usloviyah [Evaluation of energetic factor influence on development of domestic economics in crisis conditions]. Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta [Bulletin of the Tomsk State University], 2010, no. 11, pp. 199-206.
9. Zorina T.G., Yurkevich O.I. Tarifnaya politika na energoresursy v stranah EAES [Tariff policy for energy resources in the EAEU countries]. Nauchnye trudy Belorusskogo Gosudarstvennogo Ekonomicheskogo Universiteta [Scientific works of the Belarusian State Economic University], 2022, vol. 15, pp. 182-89.
10. Rejting stran Evropy po dostupnosti elektroenergii dlya naseleniya [Rating of European countries on the availability of electricity for the population], available at: https://riarating.ru.
11. Zorina T.G., Prusov S.G. Formirovanie kompleksnoj tarifnoj politiki na energoresursy v Belarusi [Formation of a comprehensive tariff policy for energy resources in Belarus]. Belorusskij ekonomicheskij zhurnal [Belarusian Economic Journal], 2019, no. 4, pp. 86-99.
12. Zhigalskaya L.O. Ustojchivoe razvitie energeticheskogo sektora Respubliki Belarus': regional'nye osobennosti [Sustainable development of the energy sector of the Republic of Belarus: regional features]. Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem SHestye Maksakovskie chteniya [Materials of the All-Russian Scientific-Practical Conference with International Participation Sixth Maksakov Readings], 2021, pp. 49-56.

Zorina Tatsiana Gennadievna. *Professor in the specialty Economic, head of the sector "Energy Economics" of the Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus, AuthorID: 84240, SPIN: 1455-9834, ORCID: 0000-0001-9665-2756, tanyazorina@tut.by.*

Yurkevich Olga Ivanovna. *Postgraduate student of the Belarusian State Economic University with a degree in economics and management of the national economy, oi.yurkevich@yandex.by.*

Статья поступила в редакцию 09.09.2022; одобрена после рецензирования 20.02.2023; принята к публикации 20.02.2023.

The article was submitted 09/09/2022; approved after reviewing 02/20/2023; accepted for publication 02/20/2023.

УДК 620.9: 338.27
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.009

Риски и угрозы энергетической безопасности Республики Беларусь

Панасюк Василий Васильевич
Академия управления при Президенте Республики Беларусь,
Республика Беларусь, Минск, *panasiukvasili@ya.ru*

Аннотация. В статье рассмотрены угрозы и риски энергетической безопасности Республики Беларусь с учетом их значимости на всех этапах энергетического производства, с классификацией их на риски производственного, финансового и информационного характера. В данном исследовании основанием для оценки уровня угроз являлся письменный экспертный опрос специалистов областных энергосистем страны. Специалисты провели ранжирование видов рисков (производственные, финансовые, информационные) и конкретных рисков, которые относятся к соответствующему виду на каждой стадии энергетического производства. В работе проведена классификация существующих рисков энергобезопасности в региональном разрезе по критериям стадий энергетического производства и источникам рисков.

Ключевые слова: энергосистема, энергетическая безопасность, экспертный опрос, классификация рисков, ранжирование рисков

Цитирование: Панасюк В.В. Риски и угрозы энергетической безопасности Республики Беларусь / В.В. Панасюк // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 99-110. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.009.

Введение. Обеспечение энергетической безопасности является важным фактором развития экономики страны и особо значимо как составляющая национальной безопасности государства.

Вопросам обеспечения энергетической безопасности уделяют особое внимание международные организации, органы государственной власти, научное сообщество. Так, Мировой энергетический совет считает, что энергия уверенно должна иметься в том количестве и необходимого качества, которые востребованы конкретными экономическими условиями [1], стабильное энергообеспечение должно осуществляться по «разумной цене» [2] и по заявлению Всемирного банка, энергетическая безопасность должна быть основана на равенстве доступа и экологической устойчивости [3].

Проблемы энергетической безопасности постоянно исследуются отечественными и зарубежными учеными. Заслуживают внимания работы, проводимые Институтом экономики Уральского отделения РАН, по оценке энергетической безопасности территории с акцентами на вопросы финансово-экономического и экологического характера [4]. Уделено особое внимание электроэнергетической системе в подходах, разработанных А.Г.Воробьевым, Е.А.Мякотой, А.В.Путиловым [5]. В работах Института систем энергетики им. Л.А.Мелентьева СО РАН представлена онтологическая модель угроз энергетической безопасности [6] и разработаны показатели, характеризующие состояние энергетической безопасности при сравнении вариантов развития энергетики [7]. Рассмотрена зависимость энергетической безопасности от баланса традиционных и возобновляемых источников энергии [8]. В Российской Федерации с большим количеством регионов предложена методика оценки уровня энергетической безопасности отдельных регионов страны [9], а также сформулированы важнейшие индикаторы энергетической безопасности, используемые для проведения такого анализа [10]. В мировой практике существуют различные подходы к оценке энергетической безопасности [11], ряд зарубежных исследователей считают, что энергетическая безопасность не является новым понятием с новой концепцией, но, ввиду появления новых проблем, требуется более широкий подход к рассмотрению вопроса в соотношении спроса и предложения, с учетом избыточности и нехватки энергии, при этом необходимо учитывать, как частные проявления, так и государственные формы регулирования в данной области [12].

В работах, проводимых Институтом энергетики НАН Беларуси, рассматривались основные методы оценки и формирования системы угроз энергетической безопасности, где белорусские ученые группируют их в блоки энергетической самостоятельности, диверсификации видов и надежности поставок энергоресурсов и энергетической эффективности их конечного потребления [13-15]. Согласно работам белорусских ученых Т.Г. Зориной, Б.И. Попова, О.А. Любчик при исследовании проблемы энергетической безопасности предложен индикативный подход с предварительным определением и классификацией угроз энергобезопасности и их оценкой посредством отдельных показателей и интегральных индексов, где угрозы сгруппированы в блоки энергетической самостоятельности, диверсификации видов и надежности поставок энергоресурсов, а также энергетической эффективности их конечного потребления [16].

Следует отметить, что различные угрозы являются основой рисков энергетической безопасности и, с учетом особенностей выявленных основных рисков, предлагается идентифицировать их с классификацией на риски производственного, финансового и информационного характера на всех этапах энергетического производства.

1. Классификация рисков энергобезопасности. В целях эффективной разработки направлений по формированию региональной политики энергетической безопасности страны предлагается рассмотреть угрозы и риски энергобезопасности с учетом их значимости на всех этапах энергетического производства, с классификацией их на риски производственного, финансового и информационного характера, с оценкой их влияния на устойчивое социально-экономическое развитие регионов Республики Беларусь.

Для реализации данной цели была выполнена классификация существующих рисков энергетической безопасности Республики Беларусь по двум критериям: стадии энергетического производства и источники рисков, где источники рисков на каждой стадии энергетического производства (генерация, передача, распределение) были объединены в группы (виды):

- производственные риски;
- финансовые риски;
- риски использования информационных технологий (информационные риски).

Следует отметить, что различные источники рисков (технологический процесс, финансовая деятельность, применение информационных технологий) на каждой стадии энергопроизводства приводят к различным рискам.

Для оценки уровня угроз энергетической безопасности был проведен письменный экспертный опрос среди около 30 специалистов подразделений 6-и областных энергосистем республиканских унитарных предприятий (далее РУП «Облэнерго»), где специалисты провели на каждой стадии энергопроизводства ранжирование видов рисков (производственные, финансовые, информационные) и конкретных рисков, относящихся к соответствующему виду. При проведении опроса обращено внимание влияния на энергобезопасность страны вводимой на полную мощность Белорусской атомной стации (далее БелАЭС) [17-18].

По результатам анализа информации, полученной в ходе экспертного опроса, все риски были систематизированы на основе выделенных критериев.

2. Риски энергетической безопасности на стадии технологического процесса «Генерация». Основополагающим этапом энергетического производства является производство электроэнергии путем преобразования ее из других видов энергии как традиционными, так и альтернативными генерирующими техническими устройствами.

В таблице 1 представлена классификация рисков энергетической безопасности на стадии технологического процесса «Генерация».

Таблица 1. Классификация рисков энергетической безопасности по источникам рисков на стадии «Генерация»

Вид риска	Риск
1. Производственные риски	1.1. Износ основных средств.
	1.2. Снижение загрузки собственных генерирующих мощностей в связи с вводом БелАЭС и отсутствием экспорта электроэнергии в сопредельные страны.
	1.3. Необходимость поддержания резервов мощности в связи с вводом БелАЭС.
	1.4. Несвоевременный ввод объектов резервирования мощностей при внеплановом останове БелАЭС.
	1.5. Создание потребителями собственной генерации и привлечение их к регулированию нагрузок.
	1.6. Снижение надежности работы оборудования (увеличение отказов).
	1.7. Аварии и отказы в работе оборудования в связи с ошибочными действиями персонала.
	1.8. Низкий коэффициент использования установленной мощности по районным котельным.
	1.9. Диверсии и террористические акты.
	1.10. Негативное воздействие на окружающую среду.
2. Финансовые риски	2.1. Рост стоимости основных топливно-энергетических ресурсов.
	2.2. Снижение прибыльности РУП «Облэнерго» ввиду уменьшения загрузки собственных генерирующих мощностей.
	2.3. Дефицит оборотных средств и инвестиций.
	2.4. Различная рентабельность областных энергосистем.
	2.5. Рост стоимости ремонтных работ подрядных организаций.
	2.6. Рост себестоимости валового отпуска из-за снижения объемов выработки электроэнергии от собственных источников областных энергосистем в связи с вводом БелАЭС.
	2.7. Высокие затраты на содержание вспомогательных ремонтных цехов.
	2.8. Высокие затраты на содержание автотранспорта и спецмеханизмов.
3. Информационные риски	3.1. Низкий уровень информатизации (цифровизации) управления генерирующим оборудованием.
	3.2. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих генерирующим оборудованием.
	3.3. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих оборудованием распределительных устройств электростанций.
	3.4. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих энергообъектами центральной диспетчерской службой.
	3.5. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих оборудованием контроля вредных выбросов в атмосферу.
	3.6. Разнородность использования программных и аппаратных средств во вновь построенных автоматизированных системах управления технологическими процессами (далее – АСУ ТП).
	3.7. Цифровая зависимость от технологий и от поставщиков этих технологий.
	3.8. Несовместимость срока эксплуатации технических средств АСУ ТП и основного технологического оборудования.
	3.9. Несоответствие средств информационной безопасности внедренным информационным решениям.
	3.10. Некачественное исполнение проекта по первичной разработке алгоритма управления техпроцессом.
	3.11. Хакерские кибератаки.

	3.12. Недостаточный уровень квалификации персонала.
	3.13. Отсутствие на предприятиях энергетики специализированных подразделений, непосредственно отвечающих за информационную безопасность.

Результаты анализа значимости рисков энергетической безопасности РУП «Облэнерго» на стадии «Генерация» представлены на рисунке 1.

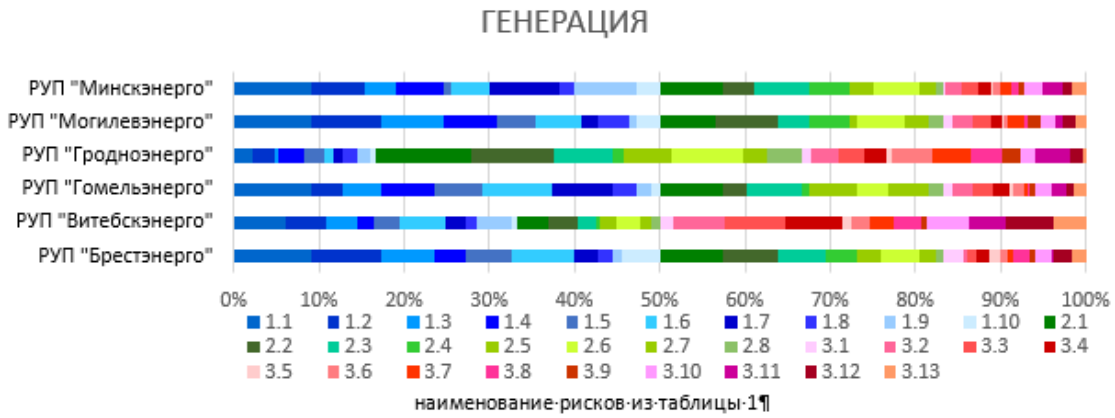


Рис. 1. Важность рисков энергетической безопасности областных энергосистем Республики Беларусь на стадии «Генерация»

Как видно на рисунке 1, наиболее важными на стадии «Генерация» для большинства областных энергосистем, по мнению экспертов, являются производственные риски энергобезопасности. Особо значимыми являются – риск повышенного износа основных производственных средств и снижение загрузки собственных генерирующих мощностей в связи с вводом БелАЭС, где в первом случае при увеличении износа выше 45% данный риск оказывает негативное влияние на надежность поставок энергии потребителям республики, а во втором случае могут увеличиться удельные расходы топлива на производство тепловой и электрической энергии из-за неоптимального режима работы генерирующего оборудования. К наименее важным производственным рискам эксперты отнесли низкий коэффициент использования установленной мощности по районным котельным ввиду сокращения промышленных потребителей тепловой энергии и создания децентрализованных источников теплоснабжения, обусловленных трансформацией белорусской энергосистемы.

Результат анализа значимости финансовых рисков на данной стадии энергопроизводства показал, что данному виду рисков особое значение придают в РУП «Гродноэнерго», а наиболее важными рисками для всех областных энергосистем являются рост стоимости основных топливно-энергетических ресурсов, которые составляют 70 - 80% в затратах на топливо, что может привести к повышению тарифов для реального сектора экономики и неконкурентоспособности энергоемких предприятий республики, а также провоцировать появление производственного риска в части создания потребителями собственной генерации. К наиболее важным отнесены, кроме РУП «Гомельэнерго» и РУП «Минскэнерго», снижение прибыльности РУП «Облэнерго» ввиду уменьшения загрузки собственных генерирующих мощностей и отсутствия экспорта электроэнергии в сопредельные страны, а также неокупаемость ранее введенных объектов в связи с вводом БелАЭС. Незначительными финансовыми рисками признаны высокие затраты на содержание вспомогательных ремонтных цехов, автотранспорта и спецмеханизмов.

РУП «Витебскэнерго» на данном этапе энергопроизводства считает группу рисков, связанных с применением информационных технологий, наиболее важной, где особую значимость определяют отказы и сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих генерирующим оборудованием и оборудованием распределительных устройств электростанций, приводящие к недоотпуску электроэнергии потребителям рес-

публики. К незначительным информационным рискам отнесены, кроме РУП «Брестэнерго», отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих оборудованием контроля вредных выбросов в атмосферу.

3. Риски энергетической безопасности на стадии технологического процесса «Передача». Важной стадией энергетического производства является транспорт энергии через линии электропередачи высокого напряжения.

В таблице 2 представлена классификация выявленных рисков энергетической безопасности на стадии технологического процесса «Передача».

Таблица 2. Классификация рисков энергетической безопасности по источникам рисков на стадии «Передача»

Вид риска	Риск
1. Производственные риски	1.1. Износ основных средств.
	1.2. Увеличение необходимых резервов установленной мощности связи с выходом БелАЭС на проектную мощность.
	1.3. Необходимость дополнительного электросетевого строительства межсистемных связей (по причинам п. п. 2.1.2.).
	1.4. Низкий уровень автоматизации (цифровизации) сетей.
	1.5. Аварии и отказы в работе оборудования в связи с ошибочными действиями персонала.
	1.6. Увеличение доли потерь в случае снижения объемов промышленного производства.
	1.7. Снижение надежности работы сети из-за погодных условий.
	1.8. Недостаточный уровень резервирования наиболее крупных источников генерации в регионе.
	1.9. Рост нагрузочных потерь при транспортировке электроэнергии.
	1.10. Диверсии и террористические акты.
2. Финансовые риски	2.1. Различная рентабельность областных энергосистем.
	2.2. Дефицит оборотных средств и инвестиций.
	2.3. Отсутствие источников финансирования на реконструкцию тепловых сетей.
	2.4. Рост стоимости ремонтных работ подрядных организаций.
	2.5. Высокие затраты на содержание вспомогательных ремонтных цехов.
	2.6. Высокие затраты на содержание автотранспорта и спецмеханизмов.
3. Информационные риски	3.1. Низкий уровень цифровизации сети.
	3.2. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющего оборудованием подстанций.
	3.3. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих энергообъектами центральной диспетчерской службой.
	3.4. Разнородность использования программных и аппаратных средств во вновь построенных АСУ ТП.
	3.5. Цифровая зависимость от технологий и от поставщиков этих технологий.
	3.6. Несовместимость срока эксплуатации технических средств АСУ ТП и основного технологического оборудования.
	3.7. Несоответствие средств информационной безопасности внедренным информационным решения.
	3.8. Некачественное исполнение проекта по первичной разработке алгоритма управления техпроцессом.
	3.9. Хакерские кибератаки.
	3.10. Недостаточный уровень квалификации персонала.
	3.11. Отсутствие на предприятиях энергетики специализированных подразделений, непосредственно отвечающих за информационную безопасность.

На рисунке 2 представлены результаты анализа значимости рисков энергобезопасности РУП «Облэнерго» на этапе «Передача».

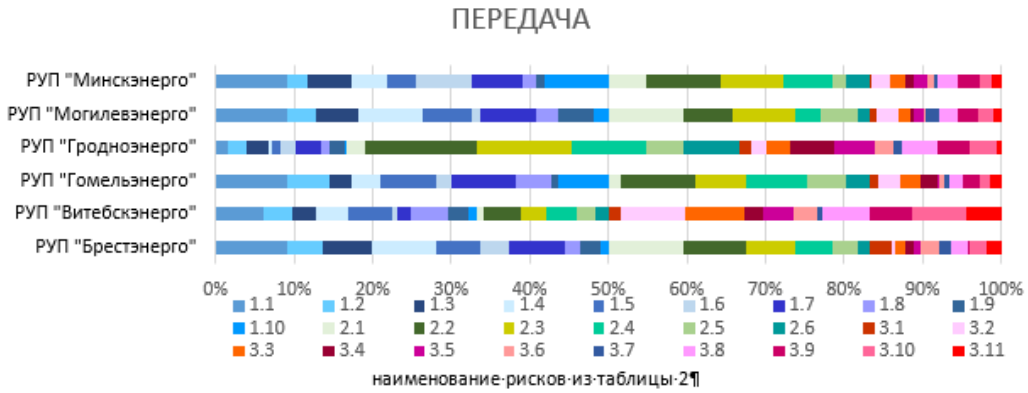


Рис. 2. Важность рисков энергетической безопасности областных энергосистем Республики Беларусь на стадии «Передача»

Как видно на рисунке 2, наиболее важными рисками энергобезопасности на стадии «Передача» как и на стадии «Генерация» для областных энергосистем, кроме РУП «Гродноэнерго», являются производственные риски, из которых наиболее важный – износ основных средств. РУП «Гродноэнерго» считает особо важным необходимость дополнительного электросетевого строительства межсистемных связей между ОЭС Беларуси и ЕЭС России в связи с выходом на проектную мощность БелАЭС, которая находится на территории Гродненской области. РУП «Облэнерго» считают также наиболее важными снижение надежности работы сети из-за погодных условий и риск аварий и отказов в работе оборудования в связи с ошибочными действиями персонала ввиду низкого уровня его квалификации, отток высококвалифицированных кадров ввиду неконкурентоспособности уровня заработной платы в конкретном регионе. Данные риски приводят к ухудшению значений показателей надежности, выражающихся в функции обеспечения бесперебойности поставок электроэнергии потребителям по показателям: SAIFI, SAIDI, CAIDI, а также показателю предельного экономического ущерба от нарушения электроснабжения потребителя. РУП «Витебскэнерго» на данном этапе энергопроизводства считает важным риск по недостаточному уровню резервирования наиболее крупных источников генерации в регионе с учетом пропускной способности межсистемных связей региона с соседними и низкий уровень автоматизации (цифровизации) сетей, что приводит к ухудшению значений показателей надежности, выражающихся в функции обеспечения бесперебойности поставок электроэнергии потребителям по показателям: SAIFI, SAIDI, CAIDI, а также по показателю предельного экономического ущерба от нарушения электроснабжения потребителей.

К важным финансовым рискам на данной стадии технологического процесса областными энергосистемами отнесены дефицит оборотных средств и инвестиций (в том числе внешних) как на модернизацию объектов электросетевой инфраструктуры, так и по расчету на ранее реализованные проекты за счет иностранных кредитных линий (в том числе валютные колебания курсов), а также рост стоимости ремонтных работ подрядных организаций, в том числе ввиду снижения объемов экспорта ремонтных услуг подрядными организациями. Наименее важными финансовыми рисками признаны высокие затраты на содержание вспомогательных ремонтных цехов, автотранспорта и спецмеханизмов.

Информационными рисками высокого уровня на данной стадии энергопроизводства областные энергосистемы, кроме РУП «Брестэнерго» и РУП «Гродноэнерго», определили отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих оборудованием подстанций и управляющих энергообъектами центральной диспетчерской служ-

бой. К наименее важным информационным рискам относятся разнородность использования программных и аппаратных средств во вновь построенным АСУ ТП и несоответствие средств информационной безопасности внедренным информационным решениям.

4. Риски энергетической безопасности на стадии технологического процесса «Распределение». Значимой стадией энергетического производства является доведение электрической энергии до конечного потребителя через распределительные электрические сети с обеспечением достоверного учета потребляемой электроэнергии и установлением самоокупаемых тарифов на энергию.

В таблице 3 представлена классификация выявленных рисков энергетической безопасности на стадии технологического процесса «Распределение».

Таблица 3. Классификация рисков энергетической безопасности по источникам рисков на стадии «Распределение»

Вид риска	Риск
1. Производственные риски	1.1. Отключения, приводящие к нарушению функционирования объектов обеспечения жизнедеятельности населения.
	1.2. Износ основных средств.
	1.3. Недостаточность мощностей электросети 0,4-10кВ.
	1.4. Необходимость масштабной реконструкции и строительства электросети 0,4-10кВ.
	1.5. Высокий уровень затрат на обслуживание распределительной сети.
	1.6. Аварии и отказы в работе оборудования в связи с ошибочными действиями персонала.
	1.7. Снижение надежности работы распределительной сети из-за погодных условий.
	1.8. Прием на баланс по «фактическому состоянию» изношенных сетей от других субъектов хозяйствования.
	1.9. Высокий уровень потерь в сети 6кВ.
	1.10. Увеличение технологического расхода электроэнергии на транспорт с учетом работы электрокотлов.
	1.11. Отсутствие 100% покрытия электронными приборами учета потребителей.
	1.12. Диверсии и террористические акты.
2. Финансовые риски	2.1. Дефицит оборотных средств и инвестиций.
	2.2. Недостаточность источников финансирования по модернизации приборного парка учета электроэнергии.
	2.3. Предоставление значительному количеству субъектов хозяйствования скидок с тарифов.
	2.4. Снижение платежеспособности потребителей в регионе.
	2.5. Рост тарифов на покупку электроэнергии от блок-станций (электростанций других ведомств).
	2.6. Рост цен на комплектные трансформаторные подстанции (далее - КТП) и мачтовые трансформаторные подстанции (далее – МТП), электронные приборы учета, сплит-системы.
	2.7. Отсутствие влияния областных энергосистем на уровень установленных тарифов (естественная монополия).
	2.8. Рост стоимости ремонтных работ подрядных организаций.
	2.9. Высокие затраты на содержание вспомогательных ремонтных цехов.
	2.10. Высокие затраты на содержание автотранспорта и спецмеханизмов.
3. Информационные риски	3.1. Низкий уровень автоматизации (цифровизации) распределительной сети.
	3.2. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих оборудованием подстанций.
	3.3. Отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих энергообъектами центральной диспетчерской службой (если

	такие имеются).
	3.4. Разнородность использования программных и аппаратных средств во вновь построенных АСУ ТП.
	3.5. Цифровая зависимость от технологий (особенно иностранных) и от поставщиков этих технологий.
	3.6. Несовместимость срока эксплуатации технических средств АСУ ТП и основного технологического оборудования.
	3.7. Несоответствие средств информационной безопасности внедренным информационным решениям.
	3.8. Некачественное исполнение проекта по первичной разработке алгоритма управления техпроцессом.
	3.9. Хакерские кибератаки.
	3.10. Недостаточный уровень квалификации персонала.
	3.11. Отсутствие на предприятиях энергетики специализированных подразделений, непосредственно отвечающих за информационную безопасность.

Рассмотрим результаты анализа значимости рисков энергетической безопасности для областных энергосистем на стадии «Распределение», которые представлены на рисунке 3.

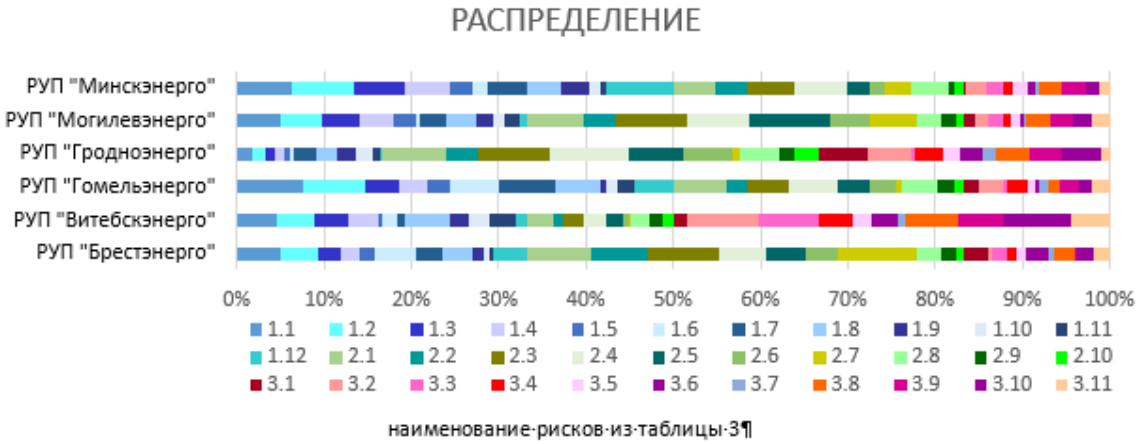


Рис. 3. Важность рисков энергетической безопасности областных энергосистем Республики Беларусь на стадии «Распределение»

Как видно на рисунке 3, на этой стадии технологического процесса для областных региональных энергосистем наиболее важными производственными рисками энергобезопасности являются отключения, приводящие к нарушению функционирования объектов обеспечения жизнедеятельности населения (водо-, газо-, тепло-, электроснабжения, водоотведения) – социальный аспект риска, а также риск износа основных средств, который признавался значимым на предыдущих этапах энергопроизводства. Отключения, приводящие к нарушению функционирования объектов обеспечения жизнедеятельности населения, могут привести к нарушению электроснабжения потребителей 1 группы, к значительным экономическим, социальным и производственным ущербам, отсутствию у населения основных жилищно-коммунальных услуг и, соответственно, социальных благ.

РУП «Минскэнерго» и РУП «Брестэнерго» считают важным риск – диверсии и террористические акты. Риск «диверсии и террористические акты» проявляется достаточно серьезно в случае его реализации, поскольку объекты энергетической отрасли, как базовые инфраструктурные объекты жизнедеятельности любого государства, являются приоритетными целями для вывода из строя. Нивелирование данного риска может быть осуществлено только за счет дополнительной защиты данных объектов. К наименее важным производственным рискам отнесены отсутствие 100% покрытия электронными приборами учета потребителей и высокий уровень затрат на обслуживание распределительной сети.

Согласно представленным данным по финансовым рискам, экспертов энергосистемы больше всего беспокоит дефицит оборотных средств и инвестиций (в том числе внешних) на модернизацию объектов распределительной электросетевой инфраструктуры, снижение платежеспособности потребителей в регионе, предоставление значительному количеству субъектов хозяйствования скидок с тарифов. РУП «Брестэнерго» придает особое значение риску – отсутствие влияния областных энергосистем на уровень установленных тарифов (естественная монополия), а РУП «Витебскэнерго» придает данному риску минимальное значение.

К наименее важным финансовым рискам также отнесены, как и на предыдущих стадиях энергопроизводства, высокие затраты на содержание автотранспорта и спецмеханизмов с относительно низкими коэффициентами выпуска и сезонности использования некоторых групп подвижного состава и высокие затраты на содержание вспомогательных ремонтных цехов при моральном и физическом старении их производственных мощностей и применяемых технологий.

Согласно рисунку 3, к наиболее важным рискам, связанным с применением информационных технологий, на стадии «Распределение» в большинстве областных энергосистем отнесены отказы или сбои в работе объектов информатизации, непосредственно управляющих оборудованием подстанций (КТП, РП). РУП «Минскэнерго» и РУП «Могилевэнерго» считают важными информационными рисками хакерские кибератаки (взлом, внедрение вредоносных программ-шифровальщиков и блокировок, шантаж), некачественное исполнение проекта по первичной разработке алгоритма управления техпроцессом с последующей увязкой с ПТК управления. РУП «Витебскэнерго» считает важным информационным риском недостаточный уровень квалификации персонала, отсутствие заинтересованности сотрудников во внедрении ИТ, приводящие к отказам, ошибкам и сбоям в работе оборудования по вине ИТ-персонала.

Наименее важным информационным риском большинство областных энергосистем считают цифровую зависимость от технологий (особенно иностранных) и от поставщиков этих технологий (отказы в работе оборудования в связи с непредоставлением поставщиком ПТК соответствующих паролей для доступа к ПО, возможность удаленного контроля и влияния на работу оборудования, снятие данных поставщиком, промышленный шпионаж).

Обращает на себя внимание высокий рейтинг информационного риска – отсутствие на предприятиях энергетики специализированных подразделений (отделов) персонала, непосредственно отвечающих за информационную безопасность.

Следует отметить, как показал анализ предоставленных региональными экспертами данных, подходы по определению значимости групп рисков схожи, а оценки значимости конкретных рисков в группах могут отличаться с учетом особенностей функционирования областных энергосистем страны.

Заключение. В рамках данного исследования проведена классификация существующих рисков энергетической безопасности в Республике Беларусь в региональном разрезе на основе критериев: стадии технологического процесса энергетического производства (генерация, передача, распределение) и неизменные источники рисков, которые объединены в группы производственных, финансовых и информационных рисков. Основой классификации послужили систематизированные по вышеназванным критериям результаты анализа, полученные в ходе экспертного опроса специалистов РУП «Облэнерго» и государственного производственного объединения ГПО «Белэнерго».

Предлагаемая классификация угроз и ранжирование рисков энергобезопасности с учетом их значимости на всех этапах энергетического производства могут быть использованы

для формирования региональной политики энергобезопасности страны и оценки их влияния на социально-экономическое развитие регионов Республики Беларусь.

Список источников

1. World energy trilemma index. World energy council, available at: https://www.worldenergy.org/assets/downloads (accessed: 02/24/2022).
2. Energy dictionary. World Energy council, Paris, Jouve SI, 1992, 635 p.
3. Energy security issues. World bank group, available at: https://documents.worldbank.org (accessed: 02/24/2022).
4. Борталевич С.И. Методические основы оценки энергетической безопасности регионов / С.И. Борталевич // Экономический анализ: теория и практика, 2019. – № 38(293). – С. 33-37.
5. Воробьев А.Г. Подходы к оценке энергетической безопасности региона (на примере Челябинской области) / А.Г. Воробьев, Е.А. Мякота, А.В. Путилов // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз, 2020. – № 4(12). – С. 71-80.
6. Ворожцова Т.Н. Онтологическая модель угроз энергетической безопасности / Т.Н. Ворожцова, Н.И. Пяткова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2017. – № 3(7). – С. 35-41.
7. Кононов Ю.Д. Особенности учета состояния энергетической безопасности при многокритериальной оценке вариантов развития топливно-энергетического комплекса / Ю.Д. Кононов, Д.Ю. Кононов // Национальные интересы: приоритеты и безопасность, 2022. – Т.18, – № 5. – С. 977-990.
8. Ремизова Т.С. Устойчивое развитие электроэнергетики России на основе балансатрадиционных и возобновляемых источников как основа безопасности национальной энергосистемы / Т.С. Ремизова, Д.Б. Кошелев // Национальные интересы: приоритеты и безопасность, 2022. – Т.18, – № 5. – С. 991-1008.
9. Сендеров С.М. Методика мониторинга состояния энергетической безопасности России на региональном уровне / С.М. Сендеров, Н.И. Пяткова, В.И. Рабчук, Г.Б Славин [и др.]. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2014. – С. 146.
10. Сендеров С.М. Оценка уровня энергетической безопасности регионов России и основные принципы создания системы мониторинга энергетической безопасности / С.М. Сендеров // Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса, 2012. – № 1(1). – С. 125-130.
11. Gasser P.A. Review on Energy Security Indices to Compare Country Performances. Energy Policy 2020, 139, 111339.
12. Блюм Х. Сложная экономика энергетической безопасности: обеспечение энергетических выгод в поддержку устойчивого развития / Х. Блюм, Луис Ф.Л. Легей // Экономика энергетики, 2012. – Том 34В.– С. 1982-1989.
13. Михалевич А.А. Состояние и перспективы развития энергетики в мире и Беларуси / А.А. Михалевич // Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь – состояние и перспективы, 2020. – С.44-51.
14. Богдан И.Т. Стратегия устойчивого развития энергетики Республики Беларусь / И.Т. Богдан, Т.Г. Зорина // Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь-состояние и перспективы: сб. ст. Междунар. научн. конф., 2020 г. – С.104-112.
15. Корсак Е.П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь / Е.П. Корсак // Энергетика. Изв.высш.учеб. заведений и энерг.объединений СНГ, 2019. – Т.62. – №4. С. 388-398.
16. Попов Б.И. Многокритериальный анализ решений как метод оценки уровня энергетической безопасности Республики Беларусь / Б.И. Попов, Т.Г. Зорина, О.А. Любчик // Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь – состояние и перспективы: сб. ст. Междунар. научн. конф., Минск, 2020. – С. 287-295.
17. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 1 марта 2016 г. №169 «Об утверждении комплексного плана развития электроэнергетической сферы до 2025 года с учетом ввода Белорусской атомной электростанции» // Министерство энергетики Республики Беларусь. – URL: https://minenergo.gov.by/uploads/files// (дата обращения: 24.02.2022).
18. Концепция развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года // Министерство энергетики Республики Беларусь. – URL: https://minenergo.gov.by/ (дата обращения: 25.02.2022).

Панасюк Василий Васильевич. *Соискатель кафедры «Экономического развития и менеджмента» Академии управления при Президенте Республики Беларусь, заместитель председателя Постоянной комиссии Палаты представителей Национального собрания Республики Беларусь по промышленности, топливно-энергетическому комплексу, транспорту и связи. Направление исследований: формирование региональной политики энергетической безопасности Республики Беларусь. ORCID: 0000-0002-7852-4432, panasiukvasili@yandex.ru, 220007, г. Минск, ул. Московская, д. 17.*

UDC 620.9: 338.27
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.009

Risks and threats to energy security of the Republic of Belarus

Vasiliy V. Panasyuk
Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus,
the Republic of Belarus, Minsk, *panasiukvasili@ya.ru*

Abstract. The article considers the threats and risks to the energy security of the Republic of Belarus, taking into account their significance at all stages of energy production, with their classification into risks of an industrial, financial and informational nature. In this study, the basis for assessing the level of threats was a written expert survey of specialists from the regional energy systems of the country. Specialists ranked the types of risks (production, financial, informational) and specific risks that belong to the corresponding type at each stage of energy production.

Keywords: energy system, energy security, expert survey, risk classification, risk ranking

References

1. World energy trilemma index. World energy council, available at: https://www.worldenergy.org /assets/downloads (accessed: 02/24/2022).
2. Energy dictionary. World Energy council, Paris: Jouve SI, 1992, 635 p.
3. Energy security issues. World bank group, available at: https://documents.worldbank.org (accessed: 02/24/2022).
4. Bortalevich S.I. Metodicheskiye osnovy otsenki energeticheskoy bezopasnosti regionov [Methodological bases for assessing the energy security of regions]. Ekonomicheskiy analiz: teoriya i praktika [Economic analysis: theory and practice], 2019, no. 38 (293), pp. 33-37.
5. Vorobyov A.G., Myakota E.A., Putilov A.V. Podkhody k otsenke energeticheskoy bezopasnosti regiona (na primere Chelyabinskoy oblasti) [Approaches to assessing the energy security of the region (on the example of the Chelyabinsk region)]. Ekonomicheskiye i sotsial'nyye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz [Economic and social changes: facts, trends, forecast], 2020, no. 4(12), pp. 71-80.
6. Vorozhtsova T.N., Pyatkova N.I. Ontologicheskaya model' ugroz energeticheskoy bezopasnosti [Ontological model of energy security threats]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical nechnologies in science and management], 2017, no. 3(7), pp. 35-41.
7. Kononov Yu.D., Kononov D.Yu. Osobennosti ucheta sostoyaniya energeticheskoy bezopasnosti pri mnogokriterial'noy otsenke variantov razvitiya toplivno-energeticheskogo kompleksa [Features of accounting for the state of energy security in the multi-criteria assessment of options for the development of the fuel and energy complex]. Natsional'nyye interesy: prioritety i bezopasnost' [National interests: priorities and security], 2022, vol. 18, iss. 5, pp. 977-990.
8. Remizova T.S., Koshelev D.B. Ustoychivoye razvitiye elektroenergetiki Rossii na osnove balansatraditsionnykh i vozobnovlyayemykh istochnikov kak osnova bezopasnosti natsional'noy energosistemy [Sustainable development of the electric power industry in Russia based on the balance of traditional and renewable sources as a basis for the security of the national energy system]. Natsional'nyye interesy: prioritety i bezopasnost' [National Interests: Priorities and Security], 2022, vol. 18, iss. 5, pp. 991-1008.
9. Senderov S.M., Pyatkova N.I., Rabchuk V.I., Slavin G.B., Vorob'yev S.V., Smirnova Ye.M. Metodika monitoringa sostoyaniya energeticheskoy bezopasnosti Rossii na regional'nom urovne [Methodology for monitoring the state of Russia's energy security at the regional level], Irkutsk: ISEM SO RAN, 2014, 146 p.
10. Senderov S.M. Otsenka urovnya energeticheskoy bezopasnosti regionov Rossii i osnovnyye printsipy sozdaniya sistemy monitoringa energeticheskoy bezopasnosti [Assessment of the level of energy security of Russian regions and the main principles of creating a system for monitoring energy security]. Bezopasnost' ob"yektov toplivno-energeticheskogo kompleksa [Safety of objects of the fuel and energy complex], 2012, no. 1(1), pp. 125-130.
11. Gasser P. A. Review on Energy Security Indices to Compare Country Performances. Energy Policy 2020, 139, 111339.
12. Blum X, Legay Louis F.L. Slozhnaya ekonomika energeticheskoy bezopasnosti: obespecheniye energeticheskikh vygod v podderzhku ustoychivogo razvitiya [Complex economics of energy security: ensuring energy benefits in support of sustainable development tconomics of energy], 2012, vol. 34 B6, pp. 1982-1989.
13. Mikhalevich A.A. Sostoyaniye i perspektivy razvitiya energetiki v mire i Belarusi [Status and prospects for the development of energy in the world and Belarus]. Ustoychivoye razvitiye energetiki Respubliki Belarus'- sos-

toyaniye i perspektivy [Sustainable development of energy in the Republic of Belarus - status and prospects], 2020, pp. 44-51.

14. Bogdan I.T., Zorina T.G. Strategiya ustoychivogo razvitiya energetiki Respubliki Belarus' [Strategy for sustainable development of the energy sector of the Republic of Belarus]. Ustoychivoye razvitiye energetiki Respubliki Belarus'- sostoyaniye i perspektivy [Sustainable development of energy in the Republic of Belarus - status and prospects], 2020, pp. 104-112.
15. Korsak E.P. Formirovaniye sistemy ugroz energeticheskoy bezopasnosti Respubliki Belarus' [Formation of a system of threats to the energy security of the Republic of Belarus Energy]. Energetika. Izv.vyssh.ucheb. zavedeniy i energ.ob"yedineniy SNG, [Izv.vyssh.uch. establishments and energy associations of the CIS], 2019, vol 62, no. 4, pp. 388-398.
16. Popov B.I., Zorina T.G. Lyubchik O.A. Mnogokriterial'nyy analiz resheniy kak metod otsenki urovnya energeticheskoy bezopasnosti Respubliki Belarus' [Multi-criteria decision analysis as a method for assessing the level of energy security of the Republic of Belarus]. Ustoychivoye razvitiye energetiki Respubliki Belarus'- sostoyaniye i perspektivy [Sustainable development of energy in the Republic of Belarus - status and prospects], 2020, pp 287-295.
17. Postanovleniye Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 1 marta 2016 g. №169 “Ob utverzhdenii kompleksnogo plana razvitiya elektroenergeticheskoy sfery do 2025 goda s uchetom vvoda Belorusskoy atomnoy elektrostantsii” [Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated March 1, 2016 No. 169 “On approval of a comprehensive plan for the development of the electric power sector until 2025, taking into account the commissioning of the Belarusian nuclear power plant”]. Ministerstvo energetiki Respubliki Belarus' [Ministry of Energy of the Republic of Belarus], available at: https://minenergo.gov.by/uploads/files (accessed: 02/25/2022).
18. Kontseptsiya razvitiya elektrogeneriruyushchikh moshchnostey i elektricheskikh setey na period do 2030 goda [The concept of development of power generating capacities and electrical networks for the period up to 2030]. Ministerstvo energetiki Respubliki Belarus' [Ministry of Energy of the Republic of Belarus], available at: https://minenergo.gov.by (accessed: 02/25/2022).

Panasyuk Vasiliy Vasilievich. *Competitor of the Department of “Economic Development and Management” of the Academy of Management under the President of the Republic of Belarus, deputy Chairman of the Standing Commission of the House of Representatives of the National Assembly of the Republic of Belarus on Industry, Fuel-Energy Complex, Transport and Communications. Direction of research: formation of a regional energy security policy of the Republic of Belarus. ORCID: 0000-0002-7852-4432, panasiukvasili@ya.ru, Republic of Belarus, Minsk, 220089, 17 Moskovskaya str.*

Статья поступила в редакцию 15.09.2022; одобрена после рецензирования 25.10.2022; принята к публикации 06.02.2023.
The article was submitted 09/15/2022; approved after reviewing 10/25/2022; accepted for publication 02/06/2023.

УДК 004.9: (504.03 + 620.9)
DOI: 10.38028/ESI.2023.29.1.010

Технология оценки загрязнений окружающей среды объектами энергетики с применением информационно-вычислительной системы WICS

Кузьмин Владимир Русланович
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, *kuzmin_vr@isem.irk.ru*

Аннотация. В статье рассмотрено развитие технологии оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики с применением информационно-вычислительной системы (ИВС) WICS, основанной на авторских методическом подходе и инструментальных средствах. Описан предложенный оригинальный алгоритм пост-обработки результатов расчёта рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Представлена подсистема IS EDC, предназначенная для проведения оценки экономического ущерба окружающей среде, наносимого в результате выбросов объектов энергетики в атмосферу В статье также описаны результаты развития встроенных в ИВС WICS средств визуализации полученных результатов.

Ключевые слова: информационно-вычислительная система, объекты энергетики, окружающая среда, оценка загрязнений, визуализация

Цитирование: Кузьмин В.Р. Технология оценки загрязнений окружающей среды объектами энергетики с применением информационно-вычислительной системы WICS / В.Р. Кузьмин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 111-122. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.010.

Введение. В отделе Систем искусственного интеллекта в энергетике ИСЭМ СО РАН в рамках работы по интеграции исследований устойчивости энергетических, экологических и социальных систем ведётся разработка информационно-вычислительной системы ИВС WICS для оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики и поддержки принятия решений по снижению их вредного воздействия. Предложена технология оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики и поддержки принятия решений по снижению их вредного воздействия с применением ИВС WICS, основанной на авторском методическом подходе, интегрирующем разрозненные методики с применением семантических технологий, который был подробно описан в [1]. Под объектами энергетики в статье понимаются энергоисточники, работающие на органическом топливе.

В 2022 году было выполнено развитие технологии, основанное на продолжении разработки ИВС WICS. Одним из результатов стал алгоритм пост-обработки результатов расчётов рассеивания. Разработка этого алгоритма потребовалась в связи с тем, что используемая методика для расчёта рассеивания загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферном воздухе позволяет рассчитать максимальную разовую концентрацию ЗВ, а также рассчитать среднепериодную концентрацию ЗВ в атмосферном воздухе, однако, в ней отсутствуют методы для построения полей концентрации ЗВ от источников выбросов в течение временного промежутка. Разработанный алгоритм позволяет решить эту проблему.

При оценке загрязнения окружающей среды объектами энергетики важно не только выполнить расчёты количественных показателей выбросов ЗВ и рассчитать их рассеивание в атмосферном воздухе, но и оценить экономический ущерб, наносимый окружающей среде. С этой целью в ИВС WICS был добавлен компонент IS EDC, который позволяет оценить экономический ущерб, нанесённый окружающей среде, а именно, атмосферному воздуху, на основе количественных показателей выбросов ЗВ с использованием утверждённых нормативных методик.

В прошедшем году также велось улучшение средств визуализации полученных результатов с использованием картографических сервисов. В связи с выявленными проблемами,

которые подробно описаны в соответствующем разделе статьи, была выполнена замена картографического сервиса Яндекс.Карты с модулем «Тепловая карта» на сервис OpenStreetMap с использованием библиотеки с открытым исходным кодом OpenLayers. Смена картографического сервиса позволила улучшить как качество, так и информативность визуализации результатов. Также в компонент IS SMP, отвечающего за работу с результатами анализа проб снега, была добавлена поддержка интерполяции результатов. Необходимость интерполяции связана с тем, что процесс снегосъёмки является затратным как с точки зрения времени, так и финансов. Таким образом, для оценки загрязнения окружающей среды представляется разумным использование методов интерполяции полученных результатов.

Алгоритм пост-обработки результатов расчётов рассеивания. Одним из компонентов ИВС WICS является подсистема IS EMS. IS EMS предназначена для расчёта рассеивания ЗВ в атмосферном воздухе на основе результатов, полученных с использованием подсистемы IS PEF, отвечающей за расчёт количественных показателей выбросов от объектов энергетики. Работа IS EMS основана на утверждённой нормативной методике МРР-2017 [2]. Однако, как было сказано во введении, в МРР-2017 отсутствуют методы для построения полей концентрации ЗВ от источников выбросов в течение временного промежутка. Необходимость наличия такого инструмента объясняется тем, что хотя МРР-2017 и обладает средствами для расчёта полей долгопериодных средних концентраций, при расчёте долгопериодных концентраций используются «… осредненная мощность M выброса ЗВ, осредненная скорость w_0 выхода ГВС из устья источника и ее вертикальной составляющей w_S, объемного расхода V_1 ГВС и осредненный перегрев ГВС относительно окружающего атмосферного воздуха ΔT», а направление ветра в рассматриваемый период берется в виде розы ветров. Использование усредненных значений может привести к некорректным итоговым значениям полей, поэтому для построения полей концентрации ЗВ от источников выбросов в течение временного промежутка был предложен алгоритм пост-обработки результатов расчётов рассеивания ЗВ в атмосферном воздухе (рис. 1).

Концентрации загрязняющих веществ агрегируются в рамках одного загрязняющего вещества, то есть агрегация концентраций загрязняющих веществ различных типов (например, оксида азота и оксида серы) не проводится. Рассмотрим алгоритм (рис. 1) подробнее на примере одного загрязняющего вещества.

Алгоритм включает тройной цикл. Сначала инициализируется массив итоговых результатов (*total_result_elements*), в который в процессе заносятся результаты пост-обработки. В цикле первого уровня выполняется последовательный обход всех элементов результата расчёта рассеивания (массив *result_elements*). Элемент результата содержит в себе информацию о типе загрязняющего вещества и массив с результатами расчёта концентрации загрязняющего вещества на различном расстоянии от объекта (обозначим как *cmu_datum*).

В цикле второго уровня выполняется последовательный перебор массива *cmu_datum* (обозначим элемент как *cmu_data*). Если значение концентрации в точке *cmu_data* не превышает минимальное значение загрязняющего вещества (обозначаемого как $\varepsilon_{MIN_CONC_I}$), то такое значение отбрасывается как незначительное и выполняется переход к следующему значению. Значение $\varepsilon_{MIN_CONC_I}$ задаётся при создании расчёта (по умолчанию устанавливается равным 0.00001 мг/м^3).

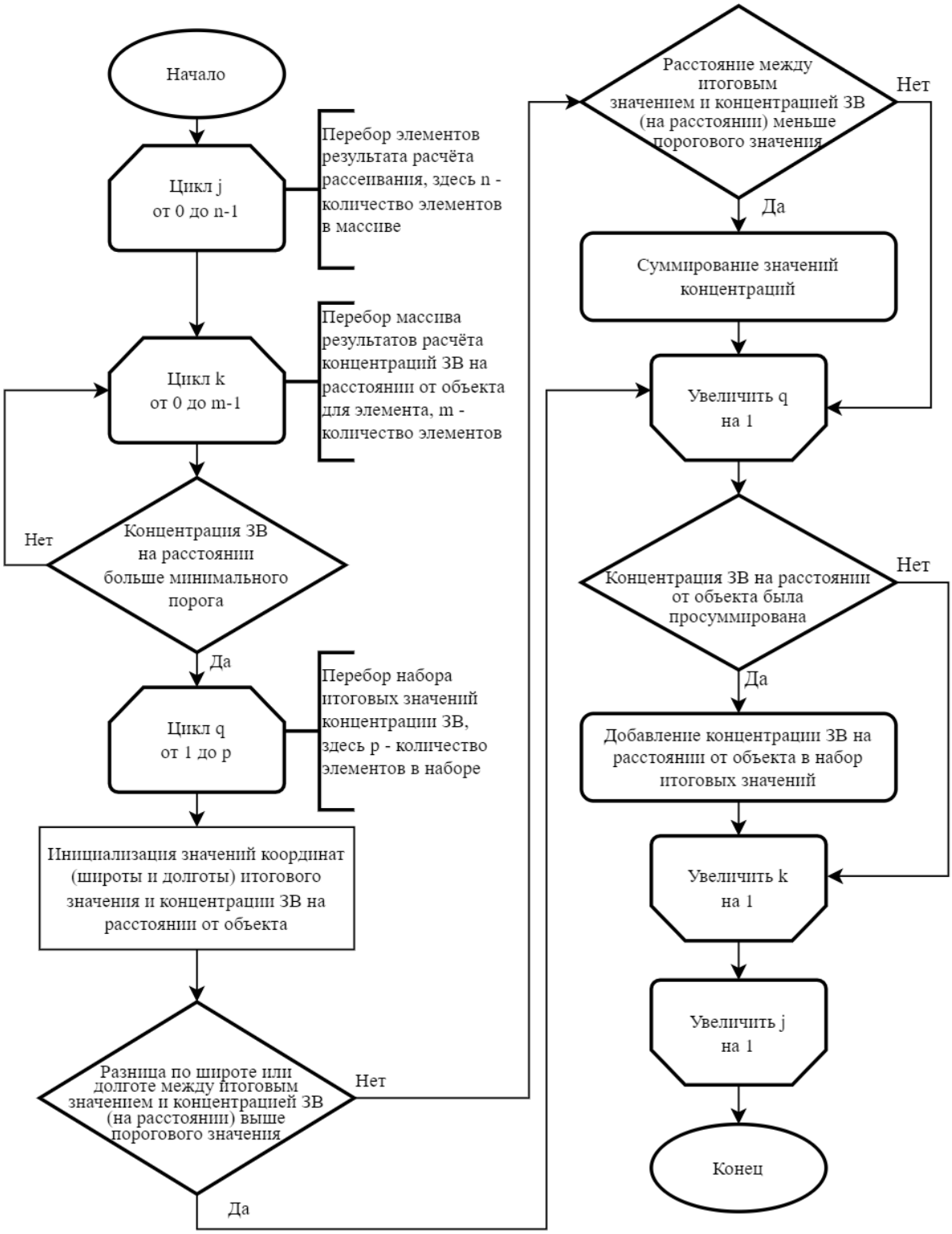


Рис. 1. Блок-схема алгоритма пост-обработки результатов расчётов рассеивания

В цикле третьего уровня выполняется обход массива *total_result_elements* (обозначим элемент как *total_result_element*). На данном этапе выполняется оценка возможности агрегации результатов расчёта в точке. Для этого точка должна удовлетворять следующим критериям:

– Разница между координатами точек *result_element* и *cmu_data* не должна превышать $\varepsilon_{CRD_DIST_MAX}$. Если разница между координатами больше, то такие точки признаются удалёнными друг от друга и выполняется переход к следующему элементу массива *result_element*. $\varepsilon_{CRD_DST_MAX}$ задаётся при создании расчёта, по умолчанию оно устанав-

ливается равным 0.01. Такое значение приблизительно соответствует расстоянию между рассматриваемыми точками в один километр. Этот критерий был введен, так как количество элементов в *cmu_datum* для всех результатов одного расчёта может превышать несколько миллионов. Данная проверка позволяет быстро оценить возможность агрегации точек и ускорить работу алгоритма.

– Если точка *cmu_data* удовлетворяет предыдущему условию, выполняется расчёт расстояния между *total_result_element* и *cmu_data*. Если расстояние между точками меньше, чем ε_{DST_MAX} (по умолчанию равно 0.1 км, может быть задано при создании расчёта), то производится суммирование значений концентрации и полученное значение записывается в *result_element*.

Если в результате, после завершения работы цикла третьего уровня, *cmu_data* не может быть суммирован ни с одним *total_result_element*, а значение концентрации в *cmu_data* превышает $\varepsilon_{MIN_CONC_I}$, то выполняется внесение *cmu_data* в *total_result_elements*.

После завершения работы всех циклов выполняется дополнительная фильтрация значений массива итоговых результатов *total_result_elements* с целью исключения точек с незначительными итоговыми значениями. Из массива удаляются точки, в которых значение концентрации не превысило $\varepsilon_{TOTAL_MIN_CONC_I}$ – минимальной итоговой концентрации i-го загрязняющего вещества в мг/м^3, по умолчанию задаётся равной 1 и может быть установлена пользователем при создании расчёта. Результаты пост-обработки затем записываются в базу данных и используются для визуализации результатов расчётов рассеивания загрязняющих веществ.

Подсистема IS EDC для оценки экономического ущерба. Для оценки экономического ущерба, нанесённого атмосферному воздуху, была разработана подсистема IS EDC. IS EDC основана на утверждённых нормативных методиках [3] и [4], и использует авторский способ организации процесса оценки экономического ущерба от загрязнения окружающей среды объектами энергетики. Основные шаги процесса:

1. Выполнить расчёт количественных показателей выбросов ЗВ от объектов энергетики.
2. На основании временного периода, для которого будет выполняться оценка ущерба, выбрать подходящую нормативную методику.
3. Внести дополнительные сведения об объекте энергетики (температура уходящих газов) и ряд дополнительных сведений в зависимости от выбранной нормативной методики для оценки (коэффициента инфляции, плотности населения и других).
4. Выполнить оценку экономического ущерба, наносимого объектами энергетики окружающей среде.

В предложенном способе необходимо обратить внимание на второй этап. В январе 2021 года в Российской Федерации вступила в действие методика [3], которая заменила собой методику [4]. Эти методики требуют различных наборов данных для выполнения расчётов, однако, главным отличием этих методик является их применимость к времени оценки. Как сказано в пункте 7 главы 1 методики [3], «Настоящая Методика не применяется при исчислении размера вреда, причиненного атмосферному воздуху, как компоненту природной среды, до ее принятия». Поэтому, для проведения оценок экономического ущерба в период до вступления методики в силу (28 января 2021 года) следует использовать старую методику.

Разработанная подсистема IS EDC позволяет выполнить расчёты как для оценки текущей ситуации, так и оценить экономическую эффективность мероприятий, направленных на снижение выбросов ЗВ от объектов энергетики.

В рамках исследований влияния объектов энергетики, расположенных в Центральной экологической зоне Байкальской природной территории, на окружающую среду была выполнена апробация разработанной подсистемы IS EDC. Расчёт был выполнен для 48 котель-

ных, использующих различные виды угля, данные взяты по состоянию на 2015 год. Результаты расчёта представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчёта экономического ущерба

Объект энергетики	Ущерб от твердых веществ, руб	Ущерб от SO_2, руб	Ущерб от NO_2, руб	Общий ущерб, руб
Еланцы, центральная котельная	1 700 000	737 000	1 400	2 438 400
Выдрино, котельные №1-4	3 178 000	1 378 000	2 500	4 558 500
Северобайкальск, котельная №10	370 000	81 000	3 300	454 300

Общий ущерб составил около 68 миллионов рублей.

Также была выполнена оценка сценария по реализации мероприятий, направленных на снижение выбросов загрязняющих веществ. В рамках сценария предусматривалась установка систем очистки со степенью фильтрации 90% на рассматриваемых объектах энергетики с установленной мощностью свыше 1 Гкал/ч. Результат представлен в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчёта экономического ущерба

Объект энергетики	Ущерб от твердых веществ, руб	Ущерб от SO_2, руб	Ущерб от NO_2, руб	Общий ущерб, руб
Еланцы, центральная котельная	170 000	737 000	1 400	908 000
Выдрино, котельные №1-4	317 000	1 370 000	2 500	1 689 000
Северобайкальск, котельная №10	37 000	81 000	3 300	121 300

В случае реализации рассмотренного сценария общий ущерб снижается на 43 миллиона рублей (до 25 миллионов рублей).

Развитие средств визуализации. Также была выполнена работа по развитию средств визуализации, встроенных в ИВС WICS.

Ранее в ИВС WICS для геовизуализации полученных результатов использовался сервис Яндекс.Карты с подключенным модулем «Тепловая карта». Этот сервис позволял визуализировать полученные результаты на карте, однако, в процессе разработки были выявлены существенные недостатки в работе модуля, связанные, во-первых, с некорректным отображением результатов расчётов рассеивания, а во-вторых, с невозможностью точной настройки отображения полученных результатов. Пример визуализации результатов расчётов рассеивания с использованием модуля «Тепловая карта», показан на рисунке 2. Чем выше концентрация загрязняющего вещества в точке, тем краснее будет её представление на карте (цвета изменяются от зелёного к красному). Синими маркерами на карте обозначены объекты энергетики.

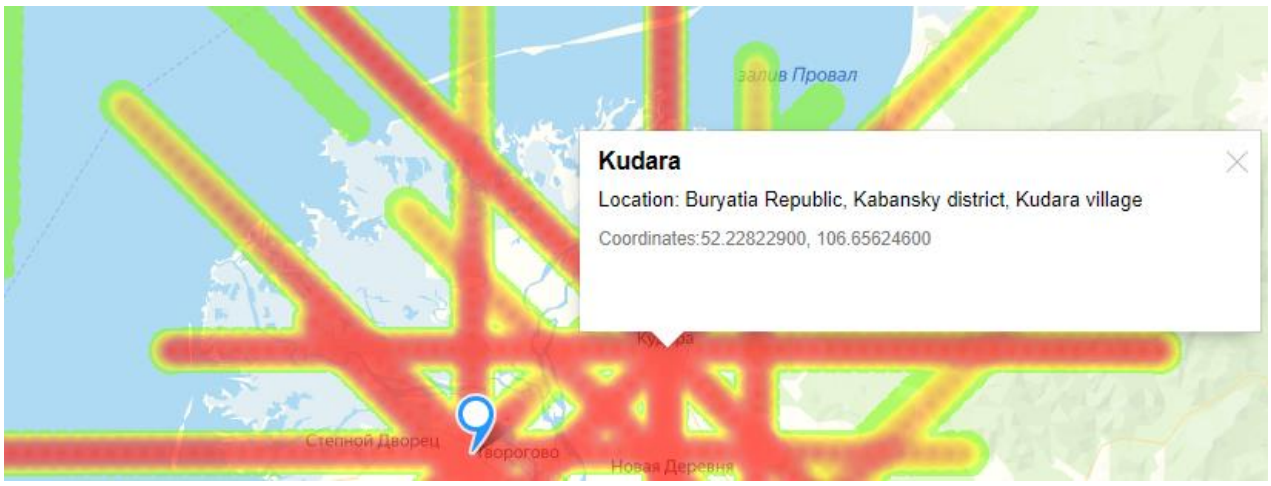


Рис. 2. Визуализация результатов расчётов рассеивания
с использованием сервиса Яндекс.Карты и модуля «Тепловая карта»

Как можно видеть из представленного рисунка, модуль «Тепловая карта» некорректно отображает данные, так как, на некоторых из направлений рассеивания загрязняющих веществ, их концентрация визуально не снижается, хотя реальные количественные показатели в точках на этом направлении могут существенно различаться, в том числе, на порядки.

В связи с этим было принято решение о переходе на другой картографический сервис. В результате анализа существующих сервисов был выбран сервис OpenStreetMap и библиотека с открытым исходным кодом OpenLayers. После подключения данного сервиса в ИВС WICS результаты визуализации расчёта рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе стали выглядеть следующим образом (рисунок 3). Чем выше концентрация загрязняющего вещества в точке, тем краснее будет её представление на карте (изменение цвета идёт от голубого к красному). Синими маркерами на карте обозначены объекты энергетики.

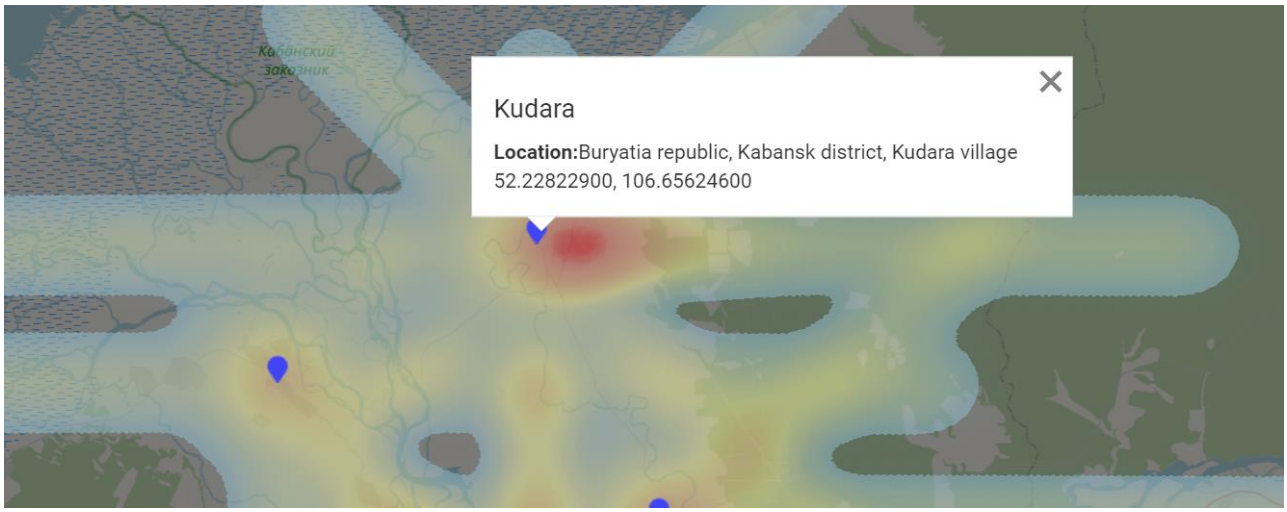


Рис. 3. Визуализация результатов расчётов рассеивания с использованием сервиса
OpenStreetMap и библиотеки OpenLayers

Представленное на рисунке геовизуальное отображение результатов соответствует количественным показателям, полученным в результате расчёта.

Также в ИВС WICS в рамках подсистемы IS SMP, предназначенной для работы с результатами анализа проб снега, была реализована поддержка интерполяции полученных результатов. Для выполнения интерполяции были выбраны два метода: метод эмпирического байесовского кригинга и метод обратных взвешенных расстояний.

Эмпирический байесовский кригинг (ЭБК) – это метод геостатистической интерполяции, автоматизирующий наиболее трудоемкие аспекты построения корректной модели кригинга. ЭБК отличается от других методов кригинга тем, что учитывает ошибку, связанную с оценкой основной вариограммы. Другие методы кригинга рассчитывают вариограмму на основе известных местоположений данных и используют эту единственную вариограмму для прогнозирования в неизвестных местоположениях; ЭБК неявно предполагает, что расчетная вариограмма является истинной для региона интерполяции [5-7]. ЭБК используется для различных задач: от поиска неоднородностей в распределении органического углерода [8] до анализа качества воды [9] и предсказания уровня никеля в почве [10].

Результаты, полученные с использованием этого метода интерполяции, оказались некорректными. Основной ошибкой было предсказание крайне высоких показателей для точек, находящихся на значительном удалении друг от друга, в ряде случаев в точке было предсказано отрицательное значение.

Для сравнения приведен рисунок 4, отображающий не интерполированные результаты анализа проб снега на содержание SO_4^{2-} – синими маркерами обозначены объекты энергетики, красными – места взятия проб снега. Сведения для результатов анализа проб снега взяты по состоянию на 2015 год из публикаций ЛИН СО РАН, ФГБУ «Иркутское УГМС», ИГ СО РАН, и Государственных докладов [11-15]. Рисунок 5 показывает результат интерполяции этих результатов методом ЭБК.

Комментарий к рисунку 5. Содержание данного рисунка было получено на этапе перехода от сервиса Яндекс.Карты к OpenStreetMap и добавления поддержки интерполяции результатов, поэтому цветовая гамма, использованная для отображения, отличается от гаммы, представленной на рисунках 4 и 6. Также на данном рисунке красными маркерами обозначены объекты энергетики, а синими – места взятия проб.

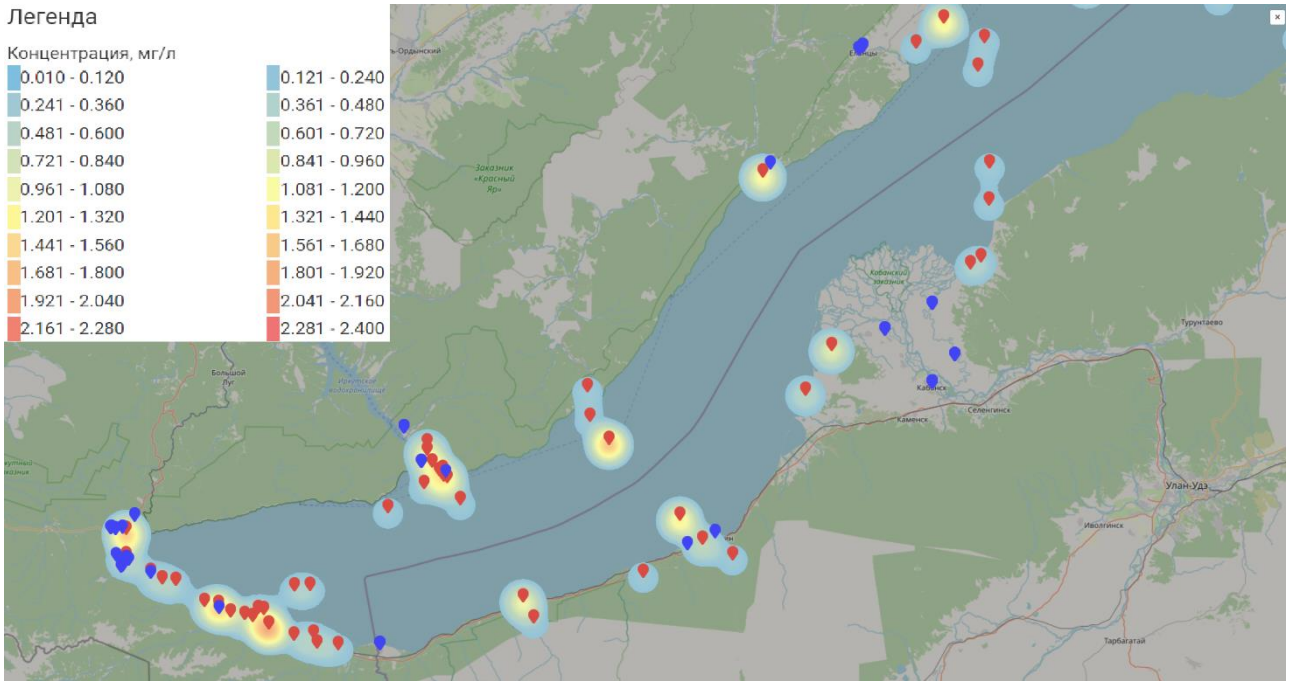


Рис. 4. Геовизуализация результатов анализа проб снега на содержание SO_4^{2-}

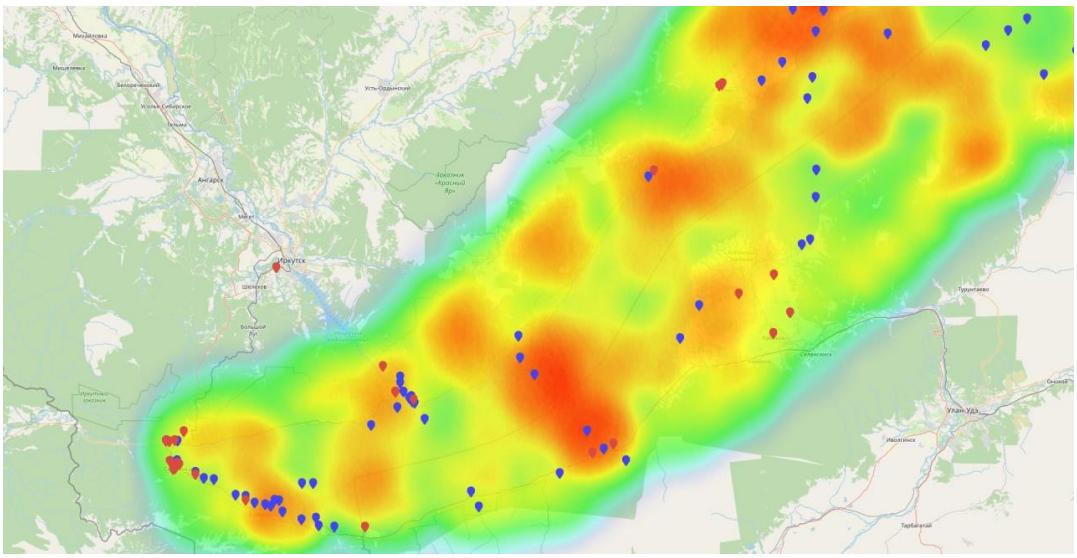


Рис. 5. Геовизуализация интерполяции результатов анализа проб снега на содержание SO_4^{2-} методом эмпирического байесовского кригинга

Также, для интерполяции результатов анализа проб снега был использован метод обратных взвешенных расстояний (англ. Inverse Distance Weighting (IDW)). IDW – метод интерполяции, в основе которого лежит предположение, что объекты, которые находятся поблизости, более подобны друг другу, чем объекты, удаленные друг от друга. Для выполнения интерполяции значений для ещё не просчитанных точек метод использует известные значения вокруг точки. Наиболее близкие значения оказывают большее влияние на прогнозируемое значение, чем те, которые находятся на значительном расстоянии. При работе метода предполагается, что измеренные точки обладают локальным влиянием, которое снижается при увеличении расстояния. Таким образом, точки, расположенные ближе к интерполируемому месту, имеют больший вес [16-18]. Метод используется, в частности, для восстановления частично определённых изображений (то есть часть изображения отсутствует) [18], для создания цифровых моделей рельефа [19-20] и для оценки местоположений концентраций выбросов твёрдых частиц.

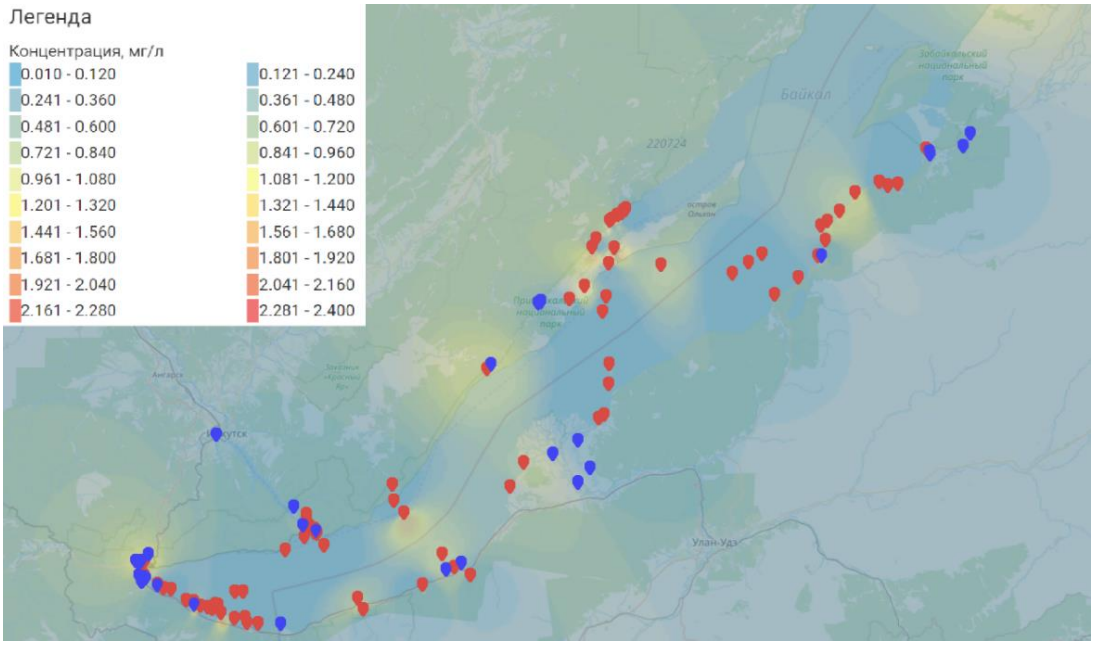


Рис. 6. Геовизуализация интерполяции результатов анализа проб снега на содержание SO_4^{2-} методом обратных взвешенных расстояний

На рисунке 6 представлена интерполяция результатов анализа проб снега на содержание SO_4^{2-}. Как можно видеть из представленного рисунка, метод IDW показывает лучшие результаты по сравнению с методом ЭБК, в частности, уменьшено количество некорректных предсказанных значений.

Заключение. В статье рассмотрено развитие технологии для оценки загрязнения окружающей среды объектами энергетики, основанной на применении информационно-вычислительной системы ИВС WICS. Показана блок-схема и приведено описание оригинального алгоритма пост-обработки результатов расчёта рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, позволяющего провести оценку рассеивания загрязняющих веществ от объектов энергетики, находящихся на удалении друг от друга. В дальнейшем планируется доработка алгоритма с целью учёта процесса трансформации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе уже после их выброса. В статье также представлена подсистема IS EDC для оценки экономического ущерба, наносимого выбросами объектов энергетики атмосферному воздуху, как компоненту окружающей среды, показаны результаты расчётов, полученные с её применением. Разработанная подсистема может быть использована как для оценки текущей ситуации, так и для оценки экономической эффективности мероприятий, направленных на снижение выбросов загрязняющих веществ. Также в статье показаны результаты развития встроенных в ИВС WICS средств визуализации полученных результатов, связанных с представлением результатов расчёта рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и результатов анализа проб снега.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00841.

Список источников

1. Kuzmin V.R., Massel L.V. Methodical Approach for impact assessment of energy facilities on environment. Proc. of Second International Conference “Information Systems and Design” (ICID 2021). In Communications in Computer and Information Science, Springer, 2022, vol. 1539, pp. 265-276, DOI: 10.1007/978-3-030-95494-9_22.
2. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 06.06.2017 № 273. Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201708110012 (дата обращения: 01.02.2022).
3. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 28.01.2021 № 59. Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102050023 (дата обращения: 01.12.2022).
4. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды (одобрена Постановлением Госплана СССР, Госстроя СССР, Президиума АН СССР от 21.10.1983 N 254/284/134). – КонсультантПлюс. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94300/ (дата обращения: 02.12.2022).
5. Krivoruchko K., Gribov A. Evaluation of empirical Bayesian kriging. Spatial Statistics, 2019, vol. 32, 100368, DOI: 10.1016/j.spasta.2019.100368.
6. Gribov A., Krivoruchko K. Empirical Bayesian kriging implementation and usage. Science of The Total Environment, 2020, vol. 722, 137290, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137290.
7. Что такое эмпирический байесовский кригинг? Справка ArcGIS Pro. – URL: https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/what-is-empirical-bayesian-kriging-.htm (дата обращения: 02.12.2022).
8. Samsonova V.P., Blagoveshchenskii Y.N., Meshalkina Y.L. Use of empirical Bayesian kriging for revealing heterogeneities in the distribution of organic carbon on agricultural lands. Eurasian Soil Sc., 2017, vol. 50, issue 3, 305-311, DOI:10.1134/S1064229317030103.
9. Senoro D.B., de Jesus K.L.M., Mendoza L.C., Apostol E.M.D., Escalona K.S., Chan E.B. Groundwater quality monitoring using in-situ measurements and hybrid machine learning with empirical bayesian kriging interpolation method. Appl. Sci. 2022, 12, 132, DOI:10.3390/app12010132.

10. Agyeman P.C., Kebonye N.M., John K. Prediction of nickel concentration in peri-urban and urban soils using hybridized empirical bayesian kriging and support vector machine regression. Sci Rep 12, 3004 (2022), DOI:10.1038/s41598-022-06843-y.
11. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2015 году». – Иркутск: ИНЦХТ, 2016. – 372 с.
12. Белозерцева И.А. Загрязнение атмосферы и содержание фтора в снеге на акватории оз. Байкал / И.А. Белозерцева, И.Б. Воробьева, Н.В. Власова [и др.] // Современные проблемы науки и образования, 2015. – № 2-2. – С. 735. – EDN UZJITD.
13. Белозерцева И.А. Химический состав снега акватории озера Байкал и прилегающей территории / И. А. Белозерцева, И. Б. Воробьева, Н. В. Власова [и др.] // География и природные ресурсы, 2017. – № 1. – С. 90-99. – DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(90-99). – EDN YIXIEH.
14. Аюржанаев А.А. Изменение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу Байкальской природной территории / А.А. Аюржанаев, С.Н. Аюшеева, В.С. Батомункуев [и др.] // География и природные ресурсы, 2016. – № S5. – С. 225-233. – DOI 10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(225-233). – EDN XQRYPJ.
15. Денисова В.И. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2015 год / В.И. Денисова, П.М. Свидский, А.Д. Голубев [и др.] // Москва: Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, 2016. – 204 с. – ISBN 978-5-906644-57-2. – EDN WZEEZJ.
16. How inverse distance weighted interpolation works. ArcGIS Pro, available at: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm.
17. Watson D.F., Philip G.M. A refinement of inverse distance weighted interpolation. Geo- Processing, 1985, vol. 2, pp. 315-327.
18. Выборнова Ю.Д. Исследование методов пространственной интерполяции в задаче восстановления частично определенных изображений / Ю.Д. Выборнова // Информационные технологии и нанотехнологии: Сборник трудов ИТНТ-2018, Самара, 24–27 апреля 2018 года / Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. – Самара: Предприятие "Новая техника", 2018. – С. 683-690.
19. Maleika W. Inverse distance weighting method optimization in the process of digital terrain model creation based on data collected from a multibeam echosounder. Appl Geomat 12, 397-407 (2020), DO: 10.1007/s12518-020-00307-6.
20. Павлова А.И. Анализ методов интерполирования высот точек для создания цифровых моделей рельефа / А.И. Павлова // Автометрия, 2017. – Т. 53. – № 2. – С. 86-94. – DOI: 10.15372/AUT20170210.
21. Choi K., Chong K. Modified inverse distance weighting interpolation for particulate matter estimation and mapping. Atmosphere, 2022, 13, 846, DOI: 10.3390/atmos13050846.

Кузьмин Владимир Русланович. *Младший научный сотрудник Института систем энергетики им Л.А. Мелентьева СО РАН. Основные научные интересы: семантические технологии, системы поддержки принятия решений, информационно-вычислительные системы, оценка воздействия объектов энергетики на окружающую среду. AuthorID: 935726, SPIN: 1712-6910, ORCID: 0000-0001-5749-4441, kuzmin_vr@isem.irk.ru, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова 130.*

UDC 004.9: (504.03 + 620.9)
DOI: 10.38028/ESI.2023.29.1.010

Technology for assessing environmental pollution by energy facilities with the use of information and computing system WICS

Vladimir R. Kuzmin
Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Russia, Irkutsk, *kuzmin_vr@isem.irk.ru*

Abstract. The article considers the development of technology for assessing environmental pollution by energy facilities using the information and computing system (ICS) WICS, based on the author's methodological approach and tools. The proposed original algorithm for post-processing the results of calculating the spreading of pollutants in the atmospheric air is described. The IS EDC subsystem is presented, designed to assess the economic damage to the environment caused by emissions of energy facilities into the atmosphere. The article also describes the results of the development of the tools for visualizing the results obtained built into the ICS WICS.

Keywords: information and computing system, pollution impact assessment, environment, energy facilities

Acknowledgements: The study was funded by the Russian Science Foundation, the research project no. 22-21-00841.

References

1. Kuzmin V.R., Massel L.V. Methodical Approach for impact assessment of energy facilities on environment. Proc. of Second International Conference “Information Systems and Design” (ICID 2021). In Communications in Computer and Information Science, Springer, 2022, vol. 1539, pp. 265-276, DOI: 10.1007/978-3-030-95494-9_22.
2. Prikaz Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii ot 06.06.2017 № 273 · Ofitsial'noye opublikovaniye pravovykh aktov. · Ofitsial'nyy internet-portal pravovoy informatsii [Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated June 6, 2017 No. 273 · Official publication of legal acts. · Official Internet portal of legal information]. Available at: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/ 0001201708110012 (access: 02/01/2022).
3. Prikaz Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii ot 28.01.2021 № 59. Ofitsial'nyy internet-portal pravovoy informatsii [Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated January 28, 2021 No. 59. Official Internet portal of legal information]. Available at: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102050023 (access: 12/01/2022).
4. Vremennaya tipovaya metodika opredeleniya ekonomicheskoy effektivnosti osushchestvleniya prirodookhrannykh meropriyatiy i otsenki ekonomicheskogo ushcherba, prichinyayemogo narodnomu khozyaystvu zagryazneniyem okruzhayu-shchey sredy" (odobrena Postanovleniyem Gosplana SSSR, Gosstroya SSSR, Prezidiuma AN SSSR ot 21.10.1983 N 254/284/134) [Temporary standard methodology for determining the economic efficiency of the implementation of environmental measures and assessing the economic damage caused to the national economy by environmental pollution (approved by the Decree of the USSR State Planning Committee, the USSR State Construction Committee, the Presidium of the USSR Academy of Sciences dated 10.21.1983 N 254/284/134)]. Konsul'tantPlyus [Consultant Plus], available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94300/ (access: 12/02/2022).
5. Krivoruchko K., Gribov A. Evaluation of empirical Bayesian kriging. Spatial Statistics, 2019, vol. 32, 100368, DOI: 10.1016/j.spasta.2019.100368.
6. Gribov A., Krivoruchko K. Empirical Bayesian kriging implementation and usage. Science of The Total Environment, 2020, vol. 722, 137290, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137290.
7. Chto takoye empiricheskiy bayyesovskiy kriging? Spravka ArcGIS Pro [What is empirical Bayesian kriging? ArcGIS Pro help]. Available at: https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/what-is-empirical-bayesian-kriging-.htm.
8. Samsonova V.P., Blagoveshchenskii Y.N., Meshalkina Y.L. Use of empirical Bayesian kriging for revealing heterogeneities in the distribution of organic carbon on agricultural lands. Eurasian Soil Sc., 2017, vol. 50, issue 3, 305-311, DOI:10.1134/S1064229317030103.
9. Senoro D.B., de Jesus K.L.M., Mendoza L.C., Apostol E.M.D., Escalona K.S., Chan E.B. Groundwater quality monitoring using in-situ measurements and hybrid machine learning with empirical bayesian kriging interpolation method. Appl. Sci. 2022, 12, 132, DOI: 10.3390/app12010132.
10. Agyeman P.C., Kebonye N.M., John K. Prediction of nickel concentration in peri-urban and urban soils using hybridized empirical bayesian kriging and support vector machine regression. Sci Rep 12, 3004 (2022), DOI: 10.1038/s41598-022-06843-y.
11. Gosudarstvennyj doklad «O sostoyanii ozera Bajkal i merah po ego ohrane v 2015 godu» [State report "On the state of Lake Baikal and measures for its protection in 2015"]. Irkutsk: ISCST, 2016, 372 p.
12. Belozertseva I.A., Vorobyeva I.B., Vlasova N.V., Lopatina D.N., Yanchuk M.S. Zagryaznenie atmosfery i soderzhanie ftora v snege na akvatorii oz. Bajkal [Snow pollution in lake Baikal water area in nearby land]. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education], 2015, no. 2-2, 735 p., EDN: UZJITD.
13. Belozertseva I.A., Vorobyeva I.B., Vlasova N.V., Yanchuk M.S., Lopatina D.N. Himicheskij sostav snega akvatorii ozera Bajkal i prilegayushchej territorii [Chemical composition of snow in the water area of lake Baikal and on the adjacent territory]. Geografiya i prirodnye resursy [Geography and Natural Resources], 2017, no.1, pp. 90-99, DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(90-99), EDN YIXIEH.
14. Ayurzhanaev A.A., Ayusheeva S.N., Batomunkuev V.S., Belozertseva I.A., Beshentsev A.N., Darbalaeva D.A., Eremko Z.S., Mikheeva A.S., Sanzhieva S.G., Tsydypov B.Z. Change in atmospheric emissions of pollutants for the baikal natural territory. Geografiya i prirodnyye resursy [Geography and Natural Resources], 2016, no. S5, pp. 225-233, DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(225-233), EDN: XQRYPJ.
15. Denisova V.I., Svidskiy P.M, Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchej sredy v Rossijskoj Federacii za 2015 god [Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2015], Moscow,

Institut global'nogo klimata i ekologii Rosgidrometa i RAN [Institute of global climate and ecology of roshydromet and RAS], 2016, 204 c., ISBN: 978-5-906644-57-2, EDN: WZEEZJ.

16. How inverse distance weighted interpolation works. ArcGIS Pro, available at: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/geostatistical-analyst/how-inverse-distance-weighted-interpolation-works.htm.
17. Watson D.F., Philip G.M. A refinement of inverse distance weighted interpolation. Geo- Processing, 1985, vol. 2, pp. 315-327.
18. Vybornova Yu.D. Issledovanie metodov prostranstvennoj interpolyacii v zadache vosstanovleniya chastichno opredelennyh izobrazhenij [Study of methods of spatial interpolation in the problem of restoring partially defined images]. Informatsionnyye tekhnologii i nanotekhnologii, Sbornik trudov ITNT-2018 [Information technologies and nanotechnologies: Proceedings of ITNT-2018, Samara, April 24-27, 2018], Samarskiy natsional'nyy issledovatel'skiy universitet imeni akademika S.P. Koroleva [Samara National Research University named after Academician S.P. Koroleva], 2018, pp. 683-690.
19. Maleika W. Inverse distance weighting method optimization in the process of digital terrain model creation based on data collected from a multibeam echosounder. Appl Geomat 12, 397-407 (2020), DOI: 10.1007/s12518-020-00307-6.
20. Pavlova A.I. Analiz metodov interpolirovaniya vysot tochek dlya sozdaniya cifrovyh modelej rel'efa [Analysis of elevation interpolation methods for creating digital elevation models]. Avtometriya [Avtometriya], 2017, vol. 53, no. 2, pp. 86-94. DOI: 10.15372/AUT20170210.
21. Choi K., Chong K. Modified inverse distance weighting interpolation for particulate matter estimation and mapping. Atmosphere, 2022, 13, 846, DOI: 10.3390/atmos13050846.

Kuzmin Vladimir Ruslanovich. *Junior researcher at Melentiev Energy Systems Institute SB RAS. Main scientific areas of interest: semantic technologies, decision support systems, information and computing systems, energy facilities' environment impact. AuthorID: 935726, SPIN: 1712-6910, ORCID: 0000-0001-5749-4441, kuzmin_vr@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, Lermontova str., 130.*

Статья поступила в редакцию 02.03.2023; одобрена после рецензирования 23.03.2023; принята к публикации 23.03.2023.

The article was submitted 03/02/2023; approved after reviewing 03/23/2023; accepted for publication 03/23/2023.

УДК 33 / 519.865: 678
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.011

Выработка подходов для моделирования и прогнозирования рынка пластиков с учетом формирования «циркулярной экономики»

Капустин Никита Олегович
Институт энергетических исследований РАН, Россия, Москва, *nikita.kapustin@eriras.ru*

Аннотация. Проблема борьбы с пластиковым загрязнением в последние годы вышла на первый план повестки по защите окружающей среды во многих странах мира. Ответом на нее должно стать создание «циркулярной экономики пластиков», которая предполагает коренное изменение производственных цепочек отрасли с переходом с ископаемого углеводородного сырья на переработку и повторное использование полимерных изделий и упоминается в программных документах Евросоюза, США, Канады и многих других стран. В настоящей работе исследуются варианты развития «циркулярности» пластиковой отрасли, методологические подходы по прогнозированию рынка пластиков и спроса на традиционные и новые виды сырья для производства полимеров в условиях отраслевых изменений. Предложена схема модельного комплекса по анализу и прогнозированию функционирования мировой пластиковой отрасли, обладающая широкой функциональностью и пригодная для проведения разнообразного спектра исследований пластиковой отрасли.

Ключевые слова: пластиковая отрасль, моделирование, прогнозирование, циркулярная экономика

Цитирование: Капустин Н.О. Выработка подходов для моделирования и прогнозирования рынка пластиков с учетом формирования «циркулярной экономики» / Н.О. Капустин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 123-134. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.011.

Введение. Проблема борьбы с пластиковым загрязнением в последние годы вышла на первый план повестки по защите окружающей среды во многих странах мира. Для этого существуют веские основания: по общепринятым оценкам, уже около 6 млрд. тонн пластиковых отходов накопились в окружающей среде к 2015 году и темпы загрязнения только нарастают [1].

К 2022 году сложился широкий международный общественный консенсус, поддерживаемый государственными органами, представителями бизнеса и экспертного сообщества, о необходимости борьбы с пластиковым загрязнением для купирования его негативного влияния на биосферу и жизненную среду человечества. Ответом на эту проблему должно стать создание так называемой «циркулярной экономики пластиков» – концептуальной структуры рынка, полностью замкнутой на себе, использующей в качестве сырья для новых пластиковых товаров продукты переработки отработанных полимерных изделий (рис. 1).

Рис. 1. Теоретическая схема по переходу к «циркулярности» пластикового рынка

Подобная конфигурация, в теории, должна решить сразу три проблемы пластиковой отрасли в контексте экологической повестки: проблему утилизации полимерных отходов; проблему зависимости отрасли от ископаемого углеводородного сырья; проблему снижения углеродного следа за жизненный цикл полимеров [2]. «Циркуляризация» пластиковой отрасли уже стала официальной целью государственных политик Евросоюза [3], Японии [4], Ко-

реи [5], Канады [6]. Специализированные НКО разрабатывают схемы трансформации рынков стран, еще не имеющих официальных планов, например, для США [7]. Собственные концепции «циркуляризации» формулируют и крупные компании, причем как со стороны производителей [8], так и потребителей [9]. Таким образом, «циркуляризация» становится всё более важным фактором развития рынка пластиков, причем на всех звеньях цепи: уже действующие и планируемые инициативы и законы затрагивают и формирование спроса, и требования к производству, и вопросы утилизации отходов.

Стоит отметить, что «циркуляризация» значима не только в контексте самого рынка пластиков, но и потенциально может оказать влияние на мировые рынки нефти и, соответственно, энергоносителей в целом. Так, нефтехимический сектор является вторым по объемам в структуре спроса нефтяного рынка с долей около 10% и, по оценкам МЭА, уже в обозримом будущем может остаться единственным сектором потребления с перспективами к росту [10]. Учитывая, что около 90% выпуска нефтехимической отрасли приходится на пластики [11], то именно развитие рынка пластиков является практически определяющим для нефтехимической отрасли и, соответственно, играет важную роль для нефтяного рынка в целом.

Таким образом, анализ и прогнозирование рынка синтетических полимеров и пластиков, с учетом современных тенденций по «циркуляризации», являются важными задачами как с точки зрения понимания самого этого рынка, который, согласно стратегическим документам, является одним из приоритетных для Российской Федерации [12], так и в его связи с топливно-энергетическим комплексом, который является ключевым для отечественной экономики.

Целями настоящей работы являются: обзор распространенных подходов к прогнозированию рынка пластиков в современной мировой науке с выделением их основных преимуществ и недостатков; анализ изменений на мировом рынке пластиков, обусловленных «циркуляризацией», ставящих новые условия и задачи для его моделирования и прогнозирования; разработка инструментария для моделирования и прогнозирования мирового рынка пластиков с учетом выводов из проведенного анализа.

1. Обзор современных подходов к моделированию и прогнозированию пластикового рынка. В мировой практике можно выделить два широко распространенных подхода к прогнозированию рынка пластиков.

Первый рассматривает рынок пластиков (в составе рынка нефтехимической продукции или отдельно) через призму объемов потребления сырья для синтеза продукции. Прогнозирование строится на базе эконометрического моделирования динамики перспективного спроса на сырье (этана; сжиженных углеводородных газов (СУГ); нафты; биосырья) со стороны нефтехимической отрасли. Затем, если в исследовании стоит такая задача, из спроса на сырье, через конверсионные коэффициенты, калькулируется производство, и, соответственно, спрос на пластики.

Данный подход в первую очередь характерен для исследований энергетики с широким масштабом охвата, таких, как работы OPEC [13], МЭА [14], аналитических отделов энергетических компаний [15, 16], где рынок пластиков в первую очередь рассматривается, как сегмент, генерирующий спрос на углеводороды, однако иногда используется и в специализированных исследованиях [17].

К основным преимуществам данного варианта прогнозирования можно отнести относительную простоту расчетных алгоритмов и доступность статистических ретроспективных данных – объемы потребления сырья в секторе нефтехимии публикуются как централизованно, на наднациональном уровне (например, World Energy Statistics Мирового Энергетиче-

ского Агентства [18]), так и энергетическими агентствами и государственными регуляторами большинства стран мира.

Ключевым недостатком подхода является невозможность с его помощью хоть сколько-нибудь точно оценить развитие спроса на рынке пластиков даже в масштабах макрорегионов. В то время как совокупные глобальные объемы потребления сырья для синтеза пластиков являются четким индикатором глобального же спроса на пластики в условиях сбалансированного рынка, на уровне стран и регионов данный показатель зависит, в первую очередь, от производственных мощностей, которые могут удовлетворять спрос в любой точке мира и совершенно не коррелировать с фактическим потреблением в данной стране или регионе. Данный фактор ограничивает применимость подхода только самыми общими (глобального масштаба) или, наоборот, узкоспециализированными (связанными с производственными мощностями и потреблением сырья) исследованиями пластикового рынка.

Повышение внимания к вопросам полимерного загрязнения в последние годы привело к увеличению количества масштабных исследований, посвященных конкретно рынку пластиков. В таких работах ключевым параметром для анализа и прогнозирования рынка становится конечный спрос на пластики, от объемов которого калькулируются такие показатели, как: объемы пластикового загрязнения, спроса на сырье, выбросы парниковых газов и т.п. В теории, именно прогнозирование «от спроса» является более корректным с точки зрения научного исследования рынков. Основной же проблемой практической реализации данного подхода, в полную противоположность с предыдущим, является разрозненность ретроспективных данных, поскольку в настоящее время учет потребления пластиков ведется лишь ограниченным кругом стран, причем по значительно различающимся методикам. В связи с этим, практически все современные глобальные исследования пластикового рынка безальтернативно ссылаются на одну работу (ряды данных в которой ограничены 2015 годом) [1] без критической оценки данных и перекрестной верификации с альтернативными источниками просто по причине отсутствия или труднодоступности таковых. Использование ограниченных данных авторы исследований зачастую дополняют применением чрезмерно упрощённых (прямая экстраполяция ретроспективных годовых темпов прироста спроса, без их привязки к каким-либо экономическим или демографическим параметрам, например, [19; 20]) или, наоборот, переусложненных (дробление спроса на отдельные подвиды полимеров с их раздельным прогнозированием [21]) алгоритмов расчётов. Это приводит к появлению результатов, имеющих логику в рамках конкретной работы, но выглядящих парадоксально, при рассмотрении в контексте других исследований. Так, в приведенных выше работах, прогнозируются колоссальные темпы прироста спроса на пластики до уровней более 1-1,5 млрд. тонн в год к 2050-2060 годам с текущих 400 млн.т, что значительно превышает самые оптимистичные сценарии прогнозов мировой энергетики и нефтяной отрасли.

Общей же проблемой современного прогнозирования пластикового рынка является поверхностный подход к моделированию именно процессов его трансформации и «циркуляризации». Так, анализируя все вышеприведенные долгосрочные прогнозы, можно отметить, что развитие «циркулярной экономики пластиков», в большинстве случаев, не рассматривается как таковое, а служит экзогенным фактором. Как правило, уровень «циркулярности» выражается неким сценарно задаваемым коэффициентом (причем, иногда, даже напрямую не указываемым), без четкой расшифровки его значения или объяснения его динамики. Особенно это характерно для наиболее амбициозных «углеродно-нейтральных» сценариев, где почти безальтернативно практикуется детерминированный подход – задается некое условие, например, по обязательному сокращению потребления ископаемого сырья или выбросов до предопределенного значения. В итоге развитие «циркулярной экономики» «подгоняется» для соответствия этим показателям, без учета не только экономической целесообразности, но,

подчас, и теоретической реализуемости. Причем, такие допущения характеры не только для крупных мультисекторных исследований, где недостаток детализации может быть объяснен масштабом, но и для специализированных на нефтегазохимической отрасли.

Таким образом, можно констатировать недостаточную системную проработку темы в мировой науке, что обусловливает необходимость создания более совершенного модельно-аналитического инструментария с устранением несовершенств существующих аналогов.

2. Формирование концептуальной схемы «циркулярности пластиков» и формулирование задач для построения моделей. Для построения актуальных математических моделей развития мировой полимерной промышленности в контексте декларируемого движения к «циркулярности», авторами был проведен анализ элементов цепочки «циркулярного» пластикового рынка, для выявления основных узких мест, фокусов и требований к построению модельного комплекса и формирования реалистичной схемы «циркулярности» пластиков, которая и будет описана на языке математической модели.

В первую очередь, необходимо обратить внимание на тот факт, что существует стабильный разрыв между объемами потребления полимерной продукции и объемами производимых пластиковых отходов. Ежегодное потребление пластиков значительно превышает объемы формируемых пластиковых отходов, кроме того, существует заметная разница в секторальных структурах потребления пластиков и генерации отходов (рис. 2) [22].

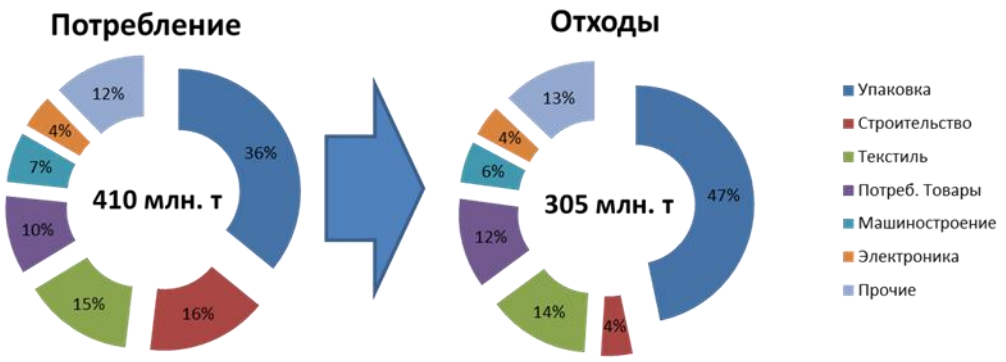


Рис. 2. Объемы и секторальная разбивка годового потребления пластиковых продуктов и производимых полимерных отходов

Данный фактор трудно переоценить при моделировании «циркулярного» рынка пластиков, поскольку в его парадигме пластиковые отходы становятся источником сырья и важной частью рынка. Таким образом, одной из задач моделирования рынка становится калькуляция не только спроса и производства, но и генерации отходов и их дальнейшей переработки.

Сами по себе, пластиковые отходы нельзя рассматривать в качестве единого гомогенного потока, поскольку различные типы полимеров требуют применения заведомо различных подходов по переработке:

– относительно легко перерабатываемые пластиковые отходы (пластиковые бутылки, крышки, плотная упаковка, домашняя утварь и т.п.), которые могут «рециркулироваться» в новые пластиковые продукты через традиционный процесс «механической» переработки;

– сложноперерабатываемые пластиковые отходы, не подходящие для «механической» переработки, но которые возможно конвертировать до базовых мономеров перспективными процессами «химической» переработки (пиролиз, деполимеризация и т.п.);

– наконец, часть полимерных отходов в принципе не пригодна для переработки. Попадать в эту категорию пластики могут по широкому спектру причин: деградация физико-

химических свойств полимеров в ходе эксплуатации; недоступность релевантных технологий переработки или изначальная непригодность для переработки. Данная категория подлежит утилизации в той или иной форме, будь то энергетическое сжигание, компостирование или иные формы захоронения. В любом случае, данный поток отходов выпадает из цикла переработки.

В этом контексте ключевую значимость приобретает отрасль сбора, сортировки и утилизации полимерных отходов, развитие и деятельность которой необходимо отдельно подробно рассматривать при моделировании рынка.

«Циркуляризация» пластикового рынка, по мере своего развития, может повлечь значительное изменение сырьевой корзины производственных мощностей, где до сих пор доминировали нефтепродукты. Сосуществование на рынке нескольких взаимозаменяемых видов сырья, со значительно различающимися производственными цепочками (жидкое сырье из нефтяной отрасли; этан из газовой; вторичное сырье от отрасли переработки), создает требование по включению в расчеты инструментария для моделирования сырьевой конкуренции, на которую будут влиять рыночные (себестоимость сырья, производственные и логистические возможности), и нерыночные факторы (экологические политики, государственные стандарты и проч.), которые могут как ускорять, так и тормозить «циркуляризацию».

Помимо изменения и усложнения структуры пластикового рынка, «циркуляризация» затронет и принципы формирования спроса, поскольку разные сектора потребления в разных странах в различной степени могут быть затронуты политиками, связанными с регулированием потребления, что требует соответствующей проработки и учета в расчетных алгоритмах.

Вместе с тем важно отметить, что пока пластиковая отрасль потребляет ископаемое сырье, она остается частью нефтяного рынка, которая, с одной стороны, зависит от его динамики, а с другой стороны, на эту динамику непосредственно влияет. В связи с этим, при моделировании пластикового рынка, необходимо иметь инструменты как по учету влияния развития рынка нефти на рынок пластиков, например, через доступные объемы того или иного сырья и цены на него, так и обратного влияния через объемы и локализацию спроса на нефтяное сырье.

Учитывая все вышеописанные факторы, проводились разработка структуры модельного комплекса для анализа и прогнозирования трансформирующегося рынка пластиков и выработка методологических подходов и алгоритмов расчета для обеспечения функционирования этого комплекса. Результаты этой работы описаны в нижеследующем разделе.

3. Описание разработанного модельного комплекса для прогнозирования рынка пластиков. В качестве инструментария для построения модельного комплекса выбраны следующие методологические подходы:

- имитационное моделирование;
- тренд-анализ;
- регрессионное эконометрическое моделирование;
- кластеризация;
- оптимизационное моделирование;
- метод обоснованных аналогий.

Для прогнозирования деятельности пластиковой отрасли авторы предлагают создание **Модели рынка пластиков**: комплекса моделей из четырех ключевых блоков, схема взаимосвязи которых представлена на рисунке 3. Подробное описание расчетов в каждом из блоков приведено ниже.

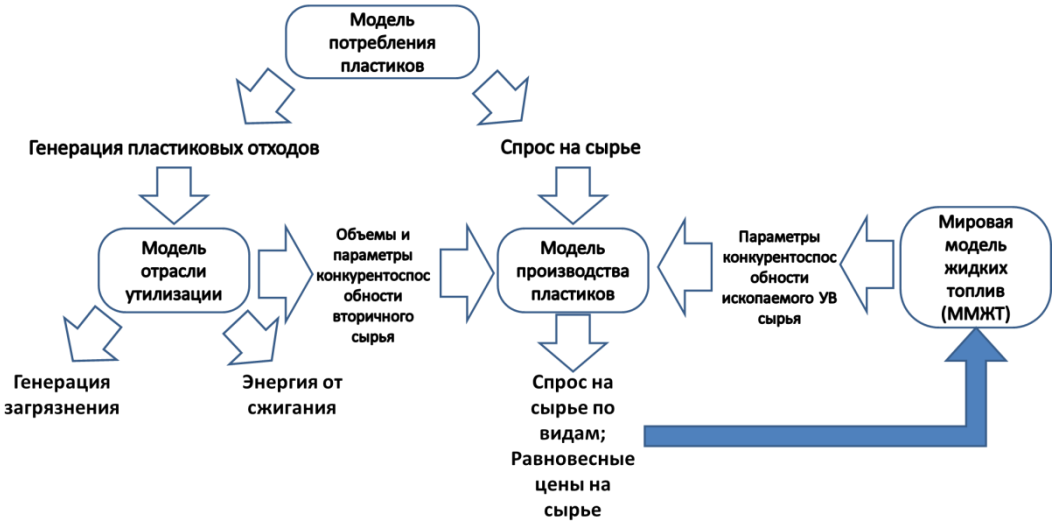


Рис. 3. Схема взаимосвязи блоков Модели рынка пластиков

3.1. Мировая модель жидких топлив. Мировая Модель Рынка Жидких Топлив (ММЖТ) – блок комплекса SCANER [23], осуществляющий моделирование мирового рынка нефтяных и биотоплив, включая их производственные возможности и экономические параметры. Расчеты ведутся по 102 узлам (это могут быть страны, регионы стран, объединения стран). Моделирование осуществляется по целевой функции минимизации затрат по производственной цепочке нефтяной отрасли с условием полного удовлетворения заданного спроса с учетом занесённых в модель объемов доступного предложения нефти, нефтепродуктов и их прямых субститутов в каждом узле. Подробнее ММЖТ описана в работах [24, 25].

В Модели пластикового рынка ММЖТ играет несколько важных ролей:

1. Расчеты в ММЖТ позволяют определить параметры конкурентоспособности и доступных объемов различных видов «первичного» сырья нефтехимической отрасли: этана, СУГ, нафты и биосырья.
2. В Модели рынка пластиков используются результаты работы по кластеризации и созданию структуры узлов для описания мирового рынка, проведенной при разработке ММЖТ [26].
3. ММЖТ интегрирована в структуру модельного комплекса ИНЭИ РАН и служит связующим звеном между ним и Моделью рынка пластиков, обеспечивая передачу и единообразие данных.
4. Поскольку ММЖТ уже содержит блок расчетов по нефтехимической отрасли, основанный на прогнозировании потребления сырья, результаты этих расчетов используются для верификации данных, полученных в Модели рынка пластиков, с целью выявления возможных грубых ошибок.

3.2. Модель потребления пластиков. Модель потребления полимерных (пластиковых) изделий – рассчитывает конечный спрос на продукты пластиковой отрасли по секторам потребления и, соответственно, производство пластиковых отходов. В структуре модельного комплекса данный элемент является ключевым, одновременно предъявляя требования по объемам необходимого выпуска для Модели производства пластиков, и обеспечивая данные для расчета объемов полимерных отходов для сортировки и переработки для Модели отрасли утилизации.

Модель потребления пластиковых изделий основана на анализе трендов потребления пластиковых изделий по секторам и их связи с ключевыми макроэкономическими показателями в узлах потребления: валовый внутренний продукт (ВВП) и население. Исходя из выявленных закономерностей («пластикоемкости» секторов экономики и подушевого потреб-

ления), по узлам строится прогноз потребления, основанный на предпосылках по макроэкономическому и демографическому развитию стран и регионов, в том числе с учетом секторальных ограничений на потребление, которые вводятся законодательно в рамках «циркуляризации».

3.3. Модель отрасли утилизации. Модель отрасли утилизации пластиков – используется для моделирования обращения с пластиковыми отходами. Основной функцией данного блока в модельном комплексе является прогнозирование функционирования отрасли переработки полимерных отходов с целью определения доступных объемов и параметров конкурентоспособности вторичного сырья. Побочными, но значимыми, выходными данными являются объемы перспективного пластикового загрязнения и производства энергии при сжигании отходов. Для каждого узла определяется ряд параметров для модельных блоков, которые отражают цепочку отрасли переработки пластиков и действуют как последовательные «фильтры» для потоков полимерных отходов, где на каждом этапе недостаточность инфраструктуры может приводить к формированию пластикового загрязнения. Схема расчетов в блоке «Модель отрасли утилизации» представлена на рисунке 4.

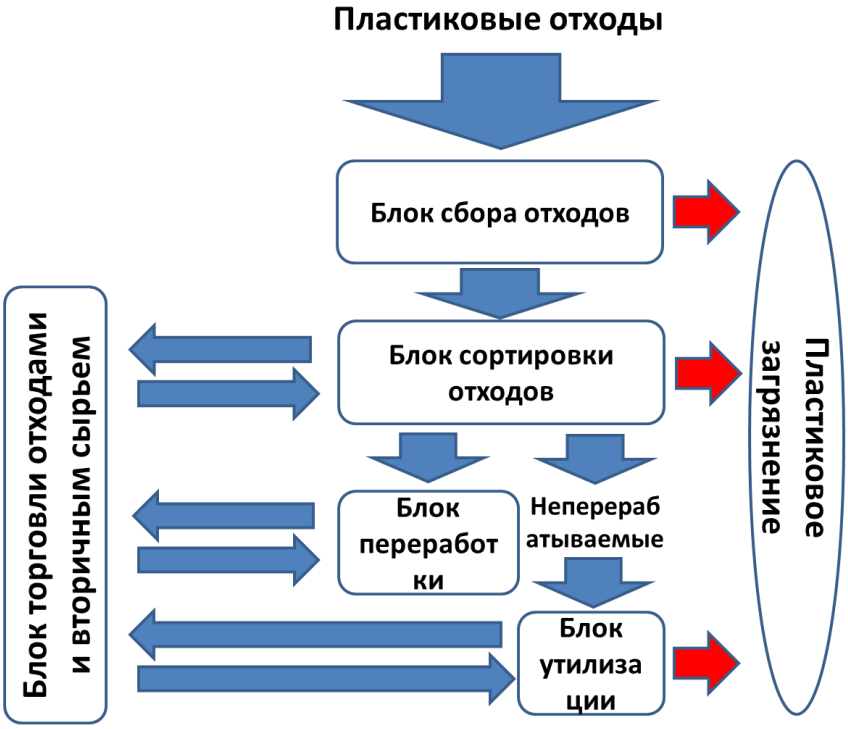


Рис. 4. Схема взаимодействия блоков в Модели рынка вторичного сырья

Подробное описание модельных расчетов и взаимодействий блоков представлено ниже.

– Блок систем по сбору полимерных отходов – отражает возможности узла по выделению полимерных отходов из общего потока отходов от антропогенной деятельности. Любые объемы пластиковых отходов, не прошедшие этап сбора, априори считаются выпадающими из цикла переработки и учитываются как пластиковое загрязнение. Мощности по сбору могут быть как централизованными, где выделение пластиков осуществляется крупными предприятиями, так и децентрализованными, где нагрузка ложится, в большей степени, на конечных потребителей пластиковой продукции. В модели эффективность системы отражается присвоением узлу коэффициента от 0 до 100% для каждого отдельного года, на который умножаются объемы всех производимых в узле отходов, чтобы определить объемы перспективного вторичного сырья которые могут попасть на следующий этап производственной цепи.

- Блок сортировки полимерных отходов – ключевой блок для которого основным параметром являются установленные мощности в узле, позволяющие обеспечить сортировку полимерных отходов для дальнейшего распределения по перерабатывающим предприятиям. Стоит отметить, что мощности по сортировке, в отличие от систем по сбору в узлах, могут быть избыточны и узлы могут оказывать другим узлам услуги по сортировке, если это логистически реализуемо и экономически оправдано. В модели мощность узла по сортировке указывается в млн. т в год для каждого прогнозного года. Если объемы собранных отходов в узле превышают собственные мощности по сортировке и возможности по вывозу в другие узлы, то избыточные объемы выпадают из цикла и подлежат утилизации. Объемы полимерных отходов в Блоке сортировки на входе рассматривается как единый поток, однако при расчетах учитывается секторальное происхождение полимеров и тренды перерабатываемости продукции, потребляемой в этих секторах. Выходом Блока сортировки являются объемы полимеров, подходящих для разных типов переработки или пригодных только для утилизации, определяемые системой коэффициентов, уникальных для каждого узла и потока отходов.
- Блок «механической» переработки – входными параметрами являются объемы подходящего сырья из Блока сортировки, выходными – объемы вторичного сырья для производства продукции для секторов упаковки, товаров народного потребления, строительства и текстильной промышленности. Основными входными параметрами являются установленные в узле мощности по механической переработке полимеров дроблением, переплавкой, пеллетизацией и проч.
- Блок «химической» переработки – для которого основным параметром являются установленные в узле мощности по «механической» переработке пластиков пиролизом, деполимеризацией и проч. Входными параметрами являются объемы подходящего сырья из Блока сортировки, выходными – объемы вторичного сырья для производства продукции для всех секторов потребления.
- Блок утилизации – определяющий возможности узла по эффективной утилизации непереработанных пластиков в каждый год. В частности, отдельно учитываются мощности по энергетической утилизации – сжиганию отходов для выработки тепла и электроэнергии. Объемы выработанной таким образом энергии могут использоваться в модельном комплексе ИНЭИ РАН для построения энергетических балансов узлов. Неперерабатываемые отходы, которые не утилизируются в узле или не вывозятся для утилизации в другие узлы, переходят в категорию пластикового загрязнения.
- Учет перетоков пластиковых отходов до и после переработки между узлами ведется в Блоке торговли вторичным сырьем. Торговля отходами и вторичным сырьем может осуществляться на каждом этапе цепочки полимер-перерабатывающей промышленности, от сортировки до утилизации. Блок торговли вторичным сырьем строится на принципах оптимизационного моделирования полного равновесия: модель учитывает затраты по цепочке отрасли переработки отходов, определяет для каждого узла оптимальную возможную загрузку сортировочных, перерабатывающих и утилизационных мощностей; равновесные цены на полимерные отходы в узлах, определяемые как максимальные затраты замыкающего поставщика. Стоит отметить, что в случае отрасли переработки пластиков может существовать ситуация, когда узлы не потребляют вторичное сырье, а, наоборот, получают услуги по переработке, сортировке или утилизации отходов. Для этих случаев в узлах с избыточными (по тем или иным причинам, включающим и недостаточно жесткое законодательство в области защиты окружающей сре-

ды) возможностями по утилизации, калькулируются равновесные цены услуг по утилизации, аналогично равновесным ценам на вторичное сырье.

3.4. Модель производства пластиковых изделий и сырьевой конкуренции. Модель производства пластиковых изделий и сырьевой конкуренции – узловой элемент комплекса, агрегирующий данные прочих блоков для проведения расчетов межсырьевой конкуренции в узлах модели, располагающих производственными мощностями в настоящем времени или в прогнозном периоде. Входными данными для этой модели служит спрос на пластиковые изделия по секторам потребления; равновесные цены на первичное и вторичное сырье; мощности по производству пластиковых изделий по узлам. Результатами расчетов является спрос на сырье для удовлетворения потребностей производственных мощностей в узле по видам сырья, которая предъявляется ММЖТ и Модели рынка вторичного сырья. Модель использует подход оптимизационного моделирования для обеспечения удовлетворения спроса во всех узлах с минимальными затратами, с учетом производственных возможностей и логистических ограничений.

Помимо сугубо экономических показателей, при моделировании рынка сырья в узлах вводятся дополнительные показатели, как, например, ввод на законодательном уровне требований по содержанию вторичного компонента в сырье для производства пластиковых изделий, что уже практикуется в ЕС. Подобные поправки могут в значительной мере менять картину рынка и формировать требования по адаптации на рынке первичного и вторичного сырья.

Заключение. Предлагаемый модельный инструментарий является актуальной разработкой, опирающейся на хорошо зарекомендовавшие себя аналитический инструментарий и системный подход, с учетом мирового опыта в области прогнозирования рынка пластиков. Модельный комплекс позволяет решить несколько ключевых вопросов рынка пластиков с долгосрочными горизонтами прогнозирования с масштабированием от глобального до регионального уровня и уровня объединения стран:

- объемы спроса на пластиковые изделия;
- объемы спроса на сырье для производства полимеров;
- объемы потенциального вымещения углеводородного сырья;
- эффективность систем утилизации и переработки полимерных отходов;
- объемы перспективного пластикового загрязнения;
- эффекты от государственных политик в пластиковой отрасли;
- различные варианты развития рынков и способы адаптации стран и игроков рынка;
- возможный вклад энергетической утилизации полимерных отходов в энергетические балансы.

Гибкость методологических подходов и разнообразие массивов выходных данных обеспечивает широкий спектр применения модельного комплекса как для фундаментального научного анализа рынка пластиков в структуре энергетических рынков и самостоятельно, так и для решения научно-практических задач в интересах государственных регуляторов и бизнеса.

Результаты апробации и доработки представленного модельного комплекса и отдельных его частей планируется представить в будущих публикациях автора и исследовательского коллектива ИНЭИ РАН.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30013) в Институте энергетических исследований Российской академии наук.

Список источников

1. Geyer R., Jambeck J., Law K. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science advances, 2017, vol. 3, iss. 7, e1700782, DOI:10.1126/sciadv.1700782.
2. Designing out plastic pollution. Ellen MacArthur foundation, available at: https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/plastics/overview (accessed: 09/21/2022).
3. Circular economy action plan. European Union, 2020, available at: https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/new_circular_economy_ action_ plan.pdf (accessed: 09/21/2022).
4. The plastic resource circulation act. Japanese Ministry of the Environment, 2021, available at: https://www.iges.or.jp/sites/default/files/inline-files/01_MOEJ_Shintaro%20Murai-min.pdf (accessed: 09/21/2022).
5. Shin S-K., Um N., Kim Y-J., Cho N-H., Jeon T-W. New policy framework with plastic waste control plan for effective plastic waste management. Sustainability, 2020, no. 15, 6049, DOI:10.3390/su12156049.
6. Canada's zero plastic waste agenda. Official website of the Government of Canada, 20 june, 2022, available at: https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/managing-reducing-waste/reduce-plastic-waste/canada-action.html (accessed: 09/21/2022).
7. U.S. plastics pact unveils national strategy to achieve 2025 circular economy goals. The U.S. plastics pact, ASHEVILLE, NC, 2021, available at: https://usplasticspact.org/u-s-plastics-pact-unveils-national-strategy-to-achieve-2025-circular-economy-goals/ (accessed: 09/21/2022).
8. Circular economy. BASF, 2022, available at: https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy.html (accessed: 09/21/2022).
9. Moving toward a circular economy. The Coca Cola Company, 2018, available at: https://www.coca-colacompany.com/news/moving-toward-a-circular-economy (accessed: 09/21/2022).
10. World energy outlook. OECD/IEA, 2021, available at: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021 (accessed: 09/21/2022).
11. Lange J-P. Towards circular carbo-chemicals – the metamorphosis of petrochemicals. Energy & Environ-mental Science, iss. 8, vol. 14, 4358-4376, DOI:10.1039/D1EE00532D.
12. Минпромторг России и Минэнерго России. Стратегия развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года, от 8 апреля 2014 года, № 651/172.
13. World oil outlook 2020. OPEC, 2020, available at: https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/OPEC_WOO2020.pdf (accessed: 09/21/2022).
14. World energy outlook. OECD/IEA, 2020, available at: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020 (accessed: 09/21/2022).
15. Outlook for energy. ExxonMobil, 2019, available at: https://corporate.exxonmobil.com/-/media/Global/Files/outlook-for-energy/2019-Outlook-for-Energy_v4.pdf (accessed: 09/21/2022).
16. Energy outlook 2020. BP, 2020, available at: https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2020.pdf (accessed: 09/21/2022).
17. Petrochemicals outlook: plastic under pressure. BloombergNEF, 2021.
18. World energy statistics. OECD/IEA, 2022, available at: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics (accessed: 09/21/2022).
19. Scott A., Pickard S., Sharp S., Becque R. Phasing out plastics, ODI, London, 2020.
20. Zheng J., Suh S. Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. Nature Climate Change, 2019, vol. 9, pp. 374-378, DOI: 10.1038/s41558-019-0459-z.
21. OECD, Global plastics outlook: Policy Scenarios to 2060, OECD publishing, Paris, DOI:10.1787/aa1edf33-en.
22. Ritchie H., Roser M. Plastic pollution, available at: https://ourworldindata.org/plastic-pollution (accessed: 09/21/2022).
23. Макаров А.А. SCANER: модельно-информационный комплекс // Под ред. Макарова А.А. − М: ИНЭИ РАН, 2011. – С. 74.
24. Grushevenko D., Kapustin N. Methodology for forecasting the global liquid fuels market, 2017 Tenth international conference management of large-scale system development (MLSD), 2017, pp. 1-4, DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109633.
25. Kapustin N.O., Grushevenko D.A. Global prospects of unconventional oil in the turbulent market: A long term outlook to 2040, Oil and gas science and technology, 2018, 73(1):67, DOI: 10.2516/ogst/2018063.
26. Mitrova T., Kulagin V., Grushevenko D., Grushevenko E., Galkina A. Complex method of petroleum products demand forecasting considering economic, demographic and technological factors. Economics and business letters, 2015, no. 4 (3), p. 98.

Капустин Никита Олегович. *Научный сотрудник ИНЭИ РАН, SPIN: 8558-9191, AuthorID: 842058, ORCID: 0000-0001-5726-6166, nikita.kapustin@eriras.ru.*

UDC 33 / 519.865: 678
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.011

Development of a methodological approach to forecasting the plastics market, taking into account the formation of the "circular economy" of the industry

Nikita O. Kapustin
Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Russia, Moscow, *nikita.kapustin@eriras.ru*

Abstract. The issue of combating plastic pollution in recent years has come to the forefront of the environmental protection agenda in many of the world's countries. The answer to it should be the creation of a "circular plastics economy", which involves a radical change in the production chains of the plastics industry with the transition from fossil hydrocarbons feedstock to the recycling and reuse of polymer waste and is mentioned in the relevant legislations of the European Union, USA, Canada and some other countries. This paper examines the options for the development of the "circularity" of the plastic industry, as well as methodological approaches for forecasting the plastics market and demand for conventional and new types of feedstock for polymer production in the context of industry changes. A modeling complex for analyzing and forecasting the performance of the global plastic industry is proposed, which has a wide range of functions and is suitable for conducting a diverse range of studies of the industry.

Keywords: plastics industry, modelling, forecasting, circular plastics

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation under grant 21-79-30013 in The Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences.

References

1. Geyer R., Jambeck J., Law K. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science advances, 2017, vol. 3, iss. 7, e1700782, DOI:10.1126/sciadv.1700782.
2. Designing out plastic pollution. Ellen MacArthur foundation, available at: https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/plastics/overview (accessed: 09/21/2022).
3. Circular economy action plan. European Union, 2020, available at: https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/new_circular_economy_ action_ plan.pdf (accessed: 09/21/2022).
4. The plastic resource circulation act. Japanese Ministry of the Environment, 2021, available at: https://www.iges.or.jp/sites/default/files/inline-files/01_MOEJ_Shintaro%20Murai-min.pdf (accessed: 09/21/2022).
5. Shin S-K., Um N., Kim Y-J., Cho N-H., Jeon T-W. New policy framework with plastic waste control plan for effective plastic waste management. Sustainability, 2020, no. 15, 6049, DOI:10.3390/su12156049.
6. Canada's zero plastic waste agenda. Official website of the Government of Canada, 20 june, 2022, available at: https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/managing-reducing-waste/reduce-plastic-waste/canada-action.html (accessed: 09/21/2022).
7. U.S. plastics pact unveils national strategy to achieve 2025 circular economy goals. The U.S. plastics pact, ASHEVILLE, NC, 2021, available at: https://usplasticspact.org/u-s-plastics-pact-unveils-national-strategy-to-achieve-2025-circular-economy-goals/ (accessed: 09/21/2022).
8. Circular economy. BASF, 2022, available at: https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy.html (accessed: 09/21/2022).
9. Moving toward a circular economy. The Coca Cola Company, 2018, available at: https://www.coca-colacompany.com/news/moving-toward-a-circular-economy (accessed: 09/21/2022).
10. World energy outlook. OECD/IEA, 2021, available at: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021 (accessed: 09/21/2022).
11. Lange J-P. Towards circular carbo-chemicals – the metamorphosis of petrochemicals. Energy & Environmental Science, iss. 8, vol. 14, 4358-4376, DOI:10.1039/D1EE00532D.
12. Minpromtorg Rossii i Minenergo Rossii. Strategiya razvitiya khimicheskogo i neftekhimicheskogo kompleksa na period do 2030 goda, ot 8 aprelya 2014 goda [Ministry of Industry and Trade of Russia and Ministry of Energy of Russia. Strategy for the development of the chemical and petrochemical complex for the period up to 2030, dated April 8, 2014], no. 651/172 (in Russian).
13. World oil outlook 2020. OPEC, 2020, available at: https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/OPEC_WOO2020.pdf (accessed: 09/21/2022).
14. World energy outlook. OECD/IEA, 2020, available at: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020 (accessed: 09/21/2022).

15. Outlook for energy. ExxonMobil, 2019, available at: https://corporate.exxonmobil.com/ /media/Global/Files/outlook-for-energy/2019-Outlook-for-Energy_v4.pdf (accessed: 09/21/2022).
16. Energy outlook 2020. BP, 2020, available at: https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/ global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2020.pdf (accessed: 09/21/2022).
17. Petrochemicals outlook: plastic under pressure. BloombergNEF, 2021.
18. World energy statistics. OECD/IEA, 2022, available at: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics (accessed: 09/21/2022).
19. Scott A., Pickard S., Sharp S., Becque R. Phasing out plastics, ODI, London, 2020.
20. Zheng J., Suh S. Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. Nature Climate Change, 2019, vol. 9, pp. 374-378, DOI: 10.1038/s41558-019-0459-z.
21. OECD, Global plastics outlook: Policy Scenarios to 2060, OECD publishing, Paris, DOI:10.1787/aa1edf33-en.
22. Ritchie H., Roser M. Plastic pollution, available at: https://ourworldindata.org/plastic-pollution (accessed: 09/21/2022).
23. Makarov A.A. SCANER: Super Complex for Active Navigation in Energy Research [SCANER: model'no-informacionnyj kompleks], 2011, p. 74
24. Grushevenko D., Kapustin N. Methodology for forecasting the global liquid fuels market, 2017 Tenth international conference management of large-scale system development (MLSD), 2017, pp. 1-4, DOI: 10.1109/MLSD.2017.8109633.
25. Kapustin N.O., Grushevenko D.A. Global prospects of unconventional oil in the turbulent market: A long term outlook to 2040, Oil and gas science and technology, 2018, 73(1):67, DOI: 10.2516/ogst/2018063.
26. Mitrova T., Kulagin V., Grushevenko D., Grushevenko E., Galkina A. Complex method of petroleum products demand forecasting considering economic, demographic and technological factors. Economics and business letters, 2015, no. 4 (3), p. 98.

Kapustin Nikita Olegovich. *Researcher at ERI RAS, SPIN: 8558-9191, AuthorID: 842058, ORCID: 0000-0001-5726-6166, nikita.kapustin@eriras.ru.*

Статья поступила в редакцию 05.09.2022; одобрена после рецензирования 22.09.2022; принята к публикации 31.10.2022.

The article was submitted 09/05/2022; approved after reviewing 09/22/2022; accepted for publication 10/31/2022.

УДК 519.86
DOI: 10.38028/ESI.2023.29.1.012

Задача формирования системы инновационного развития предприятия с учетом инновационных бизнес-процессов

Мансурова Юлия Талгатовна, Старцева Анна Владимировна
Уфимский университет науки и технологий, Россия, Уфа, *mansurova.j@mail.ru*

Аннотация. Инновационное развитие играет важную роль в успешной деятельности предприятий в настоящее время. Однако для того, чтобы быть конкурентоспособным, необходимо не только внедрять новые технологии, но и формировать инновационный бизнес-процесс. Решение задачи формирования системы инновационного развития предприятия с учетом инновационных бизнес-процессов становится всё более актуальным. В статье рассмотрены основные этапы формирования инновационного бизнес-процесса с помощью нечетких множеств, авторами выполнены постановка, формализация и реализация задачи управления инновационным развитием предприятия на базе инновационных бизнес-процессов. Особое внимание уделено определению критериев-целей построения модели и их количественных оценок, которые позволяют повысить эффективность инновационного развития предприятия. Результаты исследования могут быть использованы предприятиями различных отраслей экономики при решении задач управления инновационным развитием и повышения конкурентоспособности на рынке. Таким образом, данная работа вносит вклад в развитие теории и практики управления инновационным развитием предприятий с учетом инновационных бизнес-процессов, предлагает новые подходы и методики, а также отражает актуальность данной проблемы в настоящее время.

Ключевые слова: инновационный бизнес-процесс, конкурентоспособность, инновационное развитие предприятия

Цитирование: Мансурова Ю.Т. Задача формирования системы инновационного развития предприятия с учетом инновационных бизнес-процессов. / Ю.Т. Мансурова, А.В. Старцева / Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 135-148. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.012.

Введение. В условиях проведения радикальных изменений в экономике существует острая необходимость в новых инструментах и методах, способных помочь предприятиям стать более эффективными. Стать лидером можно, только базируя свое производство на технологиях нового поколения, то есть, используя стратегию опережающего, а не догоняющего инновационного развития. Опыт экономически развитых стран показывает, что победителем в этой борьбе оказывается тот, кто строит свою деятельность преимущественно на основе инновационного подхода и главной целью стратегического плана ставит разработку различных видов инноваций. Причем, данный аспект справедлив не только для производимого товара и предоставляемых услуг, но и для стратегии и подхода к управлению компанией. Кроме того, любого рода новшество представляет интерес, пока его использование еще не стало массовым. Именно в этот период метод или инструментарий управления организацией дает максимальный эффект, позволяет обогнать конкурентов. В то время, когда последние его только внедряют, передовые фирмы уже начинают освоение очередного нововведения, и, как следствие, занимают конкурентоспособную позицию. Подобной стратегии следуют руководители – управленцы так называемого инновационного типа. Они постоянно ищут что-то новое, все время учатся, никогда не останавливаются на достигнутом, внедряют самые передовые достижения. Именно фирмы, руководство которых относится к данному типу, можно классифицировать как фирмы инновационного типа развития. Более того, только инновационное развитие позволяет следовать основным тенденциям современного рынка.

Стратегическое управление оперирует информацией, значительная часть которой содержит неопределенность. Такие данные не могут полно определяться четкими значениями, а части из них вообще нельзя дать прямую количественную оценку. С другой стороны, любые управляющие воздействия должны содержать четко определенные числовые значения. Применение специальных математических методов, направленных на работу в условиях не-

определенности, с одной стороны, позволяет расширить круг используемых для принятия решений внутренних и внешних параметров, с другой – снизить сложность расчетов до практически приемлемого уровня.

В условиях нестабильности рыночной среды оправдано использование аппарата теории нечетких множеств (ТНМ) в исследованиях этого класса задач. Задачи принятия стратегических инвестиционных решений в условиях неопределенности, базирующиеся на аппарате ТНМ, могут охватывать такие направления, как анализ безубыточности, многокритериальная оценка эффективности и риска инвестиционных проектов, формирование оптимального портфеля инвестиционных проектов. При этом, несмотря на значительное развитие математического аппарата ТНМ, актуальным является дальнейшее развитие формальных процедур обработки различных типов нечетких данных для более эффективного использования ТНМ в решении задач принятия стратегических инвестиционных решений в условиях неопределенности. Недостаточно внимания уделено вопросу экономической интерпретации получаемых результатов. Актуальность темы статьи непосредственно связана с ее большой практической значимостью. Все еще сложная экономическая ситуация в стране, необходимость резкого сокращения числа убыточных предприятий, недостаточно полная разработанность практических аспектов стратегического управления реальными инвестициями предприятия в нестабильных условиях определили целесообразность проведения исследования, затрагивающего вопросы теории и практике стратегического управления реальными инвестициями.

1. Состояние вопроса. Практически на всех адаптировавшихся к рынку предприятиях созданы отделы коммерции и маркетинга, которые осуществляют связь с потребителями; введены новые системы управленческого учета, направленные на выявление реальной картины финансово-экономического состояния предприятия. Вместе с тем, как показывает отечественная практика, для создания долгосрочной конкурентоспособности этого оказывается недостаточно. Одним из основных условий формирования конкурентоспособной стратегической перспективы промышленного предприятия может стать его инновационная активность, которая, в свою очередь, не может быть реализована на предприятии, работающем на основе функционального подхода, поскольку для своевременной реализации и внедрения инновационной бизнес-идеи необходим достаточный уровень гибкости и быстрой реакции на внешние и внутренние изменения. Кроме того, инновационный тип развития компании предполагает заинтересованность каждого сотрудника в конечном результате, поскольку инновационный потенциал организации включает, в том числе и совокупный кадровый потенциал [1, 3]. Функциональный подход к управлению организацией несовместим с инновационным типом развития, следовательно, только компании, использующие процессно-ориентированную схему управления, в состоянии разрабатывать и внедрять различные виды инноваций, и, как следствие, только эти предприятия имеют шанс поддержать необходимый уровень конкурентоспособности.

Для обращения с неточно известными величинами обычно применяется аппарат теории вероятностей. Однако различие между нечеткостью и случайностью приводит к тому, что математические методы нечетких множеств совершенно не похожи на методы теории вероятностей. Они во многих отношениях проще вследствие того, что понятию вероятностной меры в теории вероятностей соответствует более простое понятие функции принадлежности в теории нечетких множеств [17]. По этой причине даже в тех случаях, когда неопределенность в процессе принятия решений может быть представлена вероятностной моделью, обычно удобнее оперировать с ней методами теории нечетких множеств, без привлечения аппарата теории вероятностей. Подход на основе теории нечетких множеств является альтернативой общепринятым количественным методам анализа систем. Такой подход дает приближенные, но в то же время эффективные способы описания поведения систем,

настолько сложных и плохо определенных, что они не поддаются точному математическому анализу. До работ Л. Заде [16] подобная качественная информация, по существу, просто терялась – было непонятно, как ее использовать в формальных схемах анализа альтернатив. Теоретические же основания данного подхода вполне точны и строги в математическом смысле и не являются сами по себе источником неопределенности. В каждом конкретном случае степень точности решения может быть согласована с требованиями задачи и точностью имеющихся данных. Подобная гибкость составляет одну из важных черт рассматриваемого метода.

2. Постановка задачи. Для осуществления инновационной деятельности необходимо наличие инновационного потенциала предприятия, который определяется, как совокупность различных ресурсов. От состояния инновационного потенциала зависит выбор той или иной стратегии, который в данном случае можно определить, как «меру готовности» выполнить поставленные цели в области инновационного развития предприятия. Оценивая инновационный потенциал своего предприятия, руководитель определяет свои возможности ведения инновационной деятельности.

Далее принимается решение: приобретать инновации на стороне или разрабатывать самостоятельно. В первом случае предприятие, как правило, устанавливает стратегическое партнерство со специализированной научно-исследовательской или конструкторской организацией. При этом следует иметь в виду, что единовременное приобретение технологии потребует аккумулирования значительных финансовых средств за достаточно короткий срок. Для наиболее эффективного использования финансовых вложений потребуется тщательное сканирование рынка новых технологий и детальный анализ базы данных организаций, специализирующихся на инновационных технологиях.

Во втором случае целесообразным представляется создание собственного научно-исследовательского инновационного подразделения. По сравнению с приобретением новой технологии такой подход позволяет избежать крупных единовременных затрат, так как суммы инвестиций растянуты во времени. Вместе с тем, новое подразделение, в зависимости от отраслевой принадлежности предприятия, можно создать на основе реорганизации службы главного технолога или конструкторского отдела [2].

С позиции финансовой эффективности и долгосрочной перспективы наиболее продуктивными считаются инвестиции в сектор новых технологий. Объекты этих инвестиций дают самую большую «кумулятивную отдачу». Однако, в связи с повышенным риском часто наиболее предпочтительными оказываются инвестиции в растущие и зрелые технологии. Наиболее эффективным и менее рискованным решением считается создание инновационного портфеля, состоящего из определенного набора продуктов-лидеров и продуктов-последователей. Результатом этого этапа должна стать выработка инновационных проектов по достижению отобранных инновационных решений. Под инновационным проектом принято понимать комплекс взаимосвязанных мероприятий, направленных на создание и распространение нового вида продукции или технологии [5].

Последним основным этапом является решение целевого вопроса – разработки инновационной стратегии организации. Здесь может произойти противопоставление целей отдельных проектов общим целям развития компании, что, в свою очередь, приведет к несовпадению стратегии отдельных подразделений и общей корпоративной стратегии. Во избежание подобной ошибки при формировании инновационной политики в промышленной организации необходимо применять комплексный подход. Применение этого метода, во-первых, исходит из того принципа, что к формированию инновационных проектов необходимо подходить, как к составной части общей стратегии развития промышленного предприятия. Во-вторых, применение комплексного подхода к разработке и реализации инновационных про-

ектов предполагает взаимоувязанную и скоординированную работу всех подразделений.

В данной схеме разработки инновационной стратегии отдельного внимания заслуживает этап, посвященный определению объема возможного финансирования потенциального инновационного проекта. Финансовые затраты инновационного проекта включают в себя расходы на НИОКР, маркетинговые исследования, защиту интеллектуальной собственности, создание опытных образцов, организацию производства. Их суммарный объем возрастает по мере реализации проекта. Затраченные средства могут быть возвращены только при его успешном завершении. Следовательно, чем ближе инновационный проект к окончанию, тем большей суммой рискует инвестор при его срыве. Процесс реализации проекта должен сопровождаться постоянной оценкой затрат, рисков и будущих доходов.

Коммерциализация инновационной идеи, то есть получение дохода от ее продажи или использования в собственном производстве, успешна, если затраты на реализацию проекта необходимы и достаточны. Таким образом, в данном контексте целесообразно рассмотрение механизмов оптимизации затрат на осуществление инновационного проекта с помощью ресурсного подхода. Область применения ресурсного подхода – это процесс создания в рамках инновационного проекта ресурсов и выстраивания на их основе бизнес-процессов. Под бизнес-процессом обычно понимается определенный, ограниченный, повторяющийся набор последовательных и/или параллельных действий, осуществляемых структурой в ответ на требования, предъявляемые потребителем, представляющим сегмент рынка, с целью наиболее полного и своевременного удовлетворения этих требований [2].

В рамках создания инновационной стратегии предприятия использование классического определения бизнес-процесса для инновационного процесса, приведенное выше, представляется невозможным, поэтому необходимо его уточнение. Инновационный бизнес-процесс – процесс преобразования научного знания в инновацию, который можно представить, как последовательную цепь событий, в ходе которых инновация вызревает от идеи до конкретного продукта. Кроме того, инновационный бизнес-процесс обычно не заканчивается внедрением или реализацией, поскольку по мере распространения (процесс диффузии) инновация совершенствуется, приобретает ранее неизвестные потребительские свойства.

Суть ресурсного подхода к организации бизнес-процессов заключается в следующем. Любой инновационный проект создает несколько видов ресурсов для бизнес-процесса:

- материальные ресурсы – производственное оборудование, технологическая оснастка, промышленные образцы и тому подобное;
- информационные ресурсы – объекты интеллектуальной собственности, конструкторская и технологическая документация, программы для ЭВМ, базы данных и так далее;
- человеческие ресурсы – люди, получившие специальные знания в ходе реализации инновационного проекта, которые будут использоваться в производственном процессе, а также специально подготовленный производственный персонал. Таким образом, продукт инновационной деятельности – это совокупность материальных, информационных и человеческих ресурсов [5].

Для каждого объекта бизнес-процесса необходимо либо создание, либо приобретение соответствующего набора ресурсов. Возможные варианты их распределения в рамках производства обусловлены следующими причинами:

1) различиями производственных процессов предприятий;
2) типом инновации (процессная или продуктовая);
3) масштабностью нововведения.

В роли интерфейсных и управляющих объектов могут выступать не только люди, но и информационные системы. Для создания этих объектов необходимы информационные и/или

человеческие ресурсы [12]. Рассмотрим два варианта встраивания ресурсов в бизнес-процесс:

1) в случае прямого инжиниринга (создание предприятия) требования к процессу будут формироваться во время выполнения инновационного проекта. Другими словами, инновация определяет, какое оборудование и сырье необходимо использовать, каким образом организовывать бизнес-процесс. Главная особенность – технологическая реализуемость этих требований;
2) при встраивании ресурсов в существующий бизнес-процесс (действующее предприятие) требования будут предъявляться ресурсам, которые создаются в ходе инновационного проекта. В то же время, необходимо понимать, что конфликт между существующим производством и результатом проекта, обладающим значительной новизной, может привести к необходимости коренной перестройки (реинжинирингу) бизнес-процесса.

Коммерциализация инновационной идеи, с точки зрения ресурсного подхода, возможна по двум основным направлениям: либо продажа готового бизнеса или получение дохода от собственного производства, либо продажа ресурсов или прав на их использование. Первый вариант реализуется на стадии подготовки производства (заключительном этапе инновационного проекта) и при расширении бизнеса; второй – на стадии прикладных НИР, ОКР. Приобретение готового инновационного бизнеса обходится покупателю дороже и является менее гибким вариантом, чем покупка отдельных видов ресурсов или заключение соглашения об их использовании, но позволяет в короткое время получить доход от реализации продукции, уменьшить риск неожиданного появления аналогичной продукции у конкурентов. Приобретение промежуточных результатов инновационного проекта (отдельных ресурсов) обходится дешевле, предоставляет возможность различного их использования (гибкость), однако требует длительного срока встраивания их в бизнес-процессы. Но, с другой стороны, для авторов разработки открывается возможность продаж лицензионных соглашений, которые могут заключаться неоднократно.

С точки зрения ресурсного подхода, интеллектуальная собственность, созданная на первом этапе, является базовым ресурсом. На ее основе разрабатываются и производятся материальные, развиваются и пополняются информационные и подготавливаются человеческие ресурсы, и в этом смысле они являются производными ресурсами. С этой позиции на наш взгляд целесообразно введение детального рассмотрения инновационного бизнес-процесса, который включает не только стандартную последовательность НИР – ОКР – ПП, но бизнес-процесс формирования исключительных прав на объект интеллектуальной собственности (ОИС).

Для построения корректной модели стратегического управления инновационным развитием предприятия, как сложной открытой организационной системы, необходимо рассмотреть ряд фундаментальных принципов и инструментов, разработанных в рамках системного подхода. В соответствии с терминологической базой теории систем для описания процесса функционирования предприятия будем использовать понятие «состояние системы». Состояние системы – это упорядоченная совокупность значений параметров (внутренних и внешних), определяющих ход процессов, происходящих в системе [3, 8]. Множество значений параметров системы в различные моменты времени образует пространство состояний системы. Функционирование предприятия, таким образом, описывается как «смещение» в пространстве состояний. Универсальность подобного понятийного аппарата позволяет дать корректные, однозначные определения многим широко распространенным в теории менеджмента терминам. Например, стратегия может трактоваться как проект (программа, невозмущенная траектория «движения» предприятия в пространстве его состояний).

Как отмечалось выше, бизнес-процесс – это совокупность различных видов деятельности, в рамках которой «на входе» используется один или более видов ресурсов, и в результате этой деятельности «на выходе» создается продукт, представляющий ценность для потребителя. Само по себе предприятие также может рассматриваться как процесс самого высокого уровня обобщения. Реализация бизнес-процесса всегда приводит к изменению потребительной и/или добавленной стоимости. Соответственно, на наш взгляд, не только предприятие зависит от состояния и изменения внешней среды, но и в свою очередь, в процессе функционирования предприятие оказывает косвенное влияние на внешнюю среду. Часть элементов внешней среды, состояние которых зависит от состояния объекта, принято называть микросредой. Важнейшей частью микросреды выступают рынки инновационной продукции предприятия, необходимость изменения характеристик которых и является основной предпосылкой осуществления инновационного стратегического управления [9, 11]. Кроме того, важно выделить элементы, принимающие сигналы управления (точки входа) и связанные с ними непосредственно или опосредованно элементы, влияющие на микросреду (точки выхода). Таким образом, исходными данными при проведении стратегических исследований являются знания, характеризующие значения существенных параметров внешней среды и самого объекта, а также знания об отношениях между параметрами объекта и микросреды.

При стратегическом управлении каждой цели ставится в соответствие набор критериев, характеризующих состояние микросреды предприятия, достижение которых говорит о выполнении поставленных целей. Другими словами, определяются точки выхода микросреды и их значения, обеспечивающие необходимую предприятию рыночную позицию. Такие параметры внешней среды являются зависимыми переменными. Далее определяются точки выхода объекта (являющиеся соответственно точками входа для микросреды), которые связаны с указанными рыночными параметрами. При этом необходимо учитывать, что важнейшее влияние на отношения между параметрами объекта и точками выхода микросреды оказывает состояние внешней среды. Тогда с учетом схемы, характеризующей исходные данные для проведения стратегического инновационного управления, можно графически представить взаимное влияние параметров объекта и внешней среды [7]. Предлагаемая схема изображена на рисунке 1.

В итоге объем управляющих усилий будет определяться совокупным изменением состояния элементов объекта, принимающих управляющие сигналы, внутренняя эффективность управления – совокупным изменением состояния элементов, воздействующих на микросреду (точек выхода объекта), стратегическая эффективность – совокупным изменением параметров микросреды, определяющих рыночную позицию компании.

Рассмотренные выше основные принципы системного подхода и построенная схема стратегического управления инновационным развитием предприятия позволяют перейти к формализации поставленной задачи.

3. Формализация поставленной задачи. Пусть объект с точки зрения стратегического управления обладает m существенными параметрами (включая точки входа и выхода), a_i описывает состояние i-го параметра объекта, вектор состояние всего объекта. Начальное состояние объекта будет характеризоваться вектором $\vec{A}_0$.

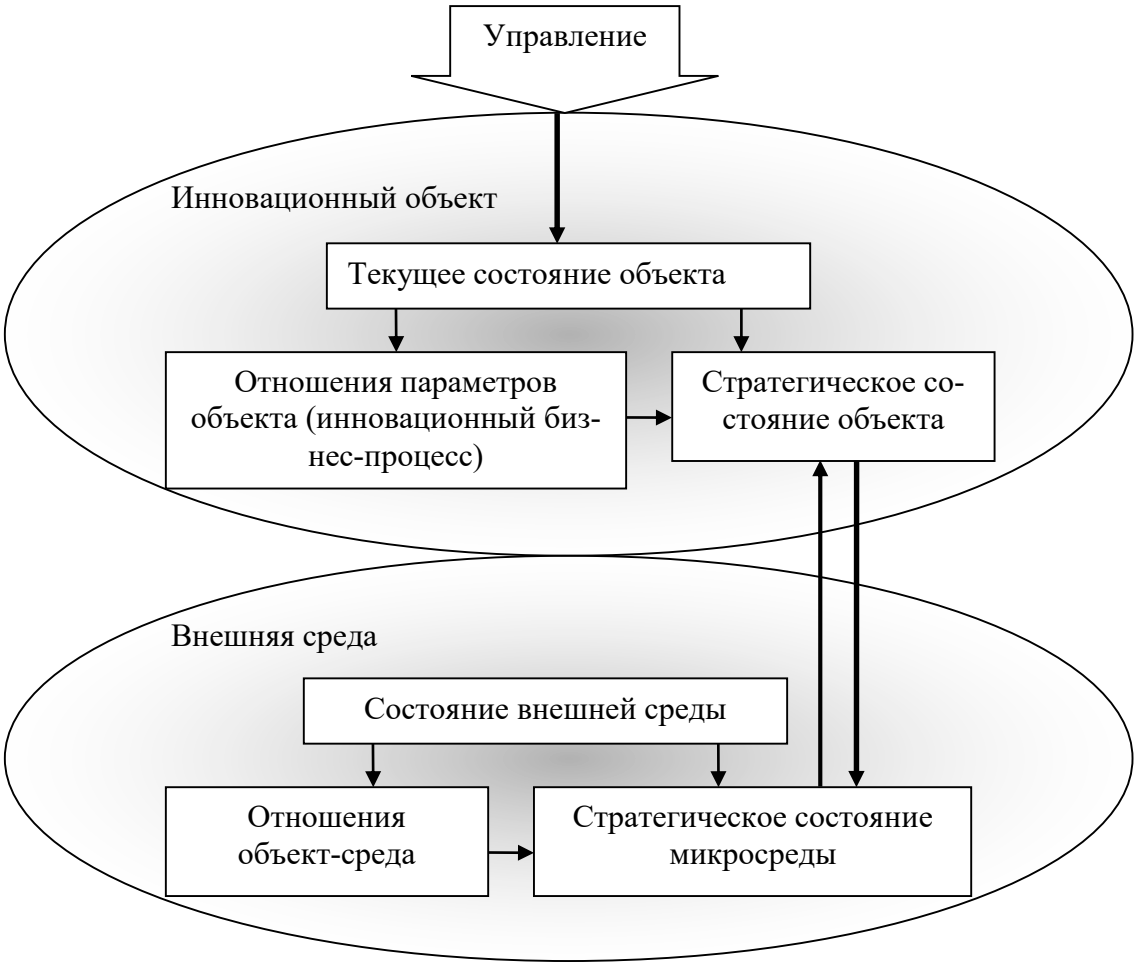


Рис. 1. Взаимное влияние параметров объекта и микросреды

Отношение $R_{A\to A}$ определяет взаимное влияние элементов объекта. Как говорилось выше, эти связи существенно зависят от исходного состояния объекта. Обозначим указанное отношение, обусловленное A_0, следующим образом: $R_{A\to A}^{A_0}$. Множество элементов объекта, принимающих сигналы управления, обозначим $\Omega_{вх}$, передающих сигналы во внешнюю среду $\Omega_{вых}$. Векторы B и C соответственно – векторы, характеризующие состояние точек входа и выхода: $\vec{B} = \{a_i \in \Omega_{вх}\}$, $\vec{C} = \{a_i \in \Omega_{вых}\}$. Вектор $\vec{\mathrm{B}}_0$ характеризует начальное состояние точек входа объекта. Таким образом, из множества внутренних связей объекта нас интересуют $R_{B\to C}^{A_0}$.

Пусть внешняя среда объекта Q характеризуется n существенными для реализации стратегии параметрами. Вектор D, описывающий состояние внешней среды объекта, определяется значением ее отдельных параметров: $\vec{D} = \{d_j\}$, $j = \overline{1,n}$. $\vec{D}_0$ – начальное состояние внешней среды. Элементы внешней среды $\Theta_{рын}$ определяют рыночное положение компании и участвуют в отношениях с элементами объекта, состояние этих параметров определяется вектором $\vec{E} = \{d_j \in \Theta_{рын}\}$. Отношение между параметрами среды и объекта определяются следующим образом: $R_{C\to E}^{D_0}$.

Как указывалось выше, целевая установка – рыночное положение компании в стратегической перспективе (вектор $\vec{E}$) зависит от состояния объекта управления ($\vec{A}$) и отношений между параметрами объекта и среды ($R_{B\to C}^{A_0}$,$R_{C\to E}^{D_0}$). Иными словами, вектор $\vec{\mathrm{E}}$ определяется следующим образом, как композиция перечисленных аргументов: $\vec{E} = \Phi(\vec{B}, R_{B\to C}^{A_0}, R_{C\to E}^{D_0})$. Конкретный вид зависимости искомого параметра от указанных аргументов определяется

сложным характером взаимодействий между аргументами, зависящими от элементной полноты формального описания, используемого математического аппарата и количественной или качественной определенности параметров задачи.

Для оценки совокупности изменений группы параметров введем соответствующее обозначение Δ. Например, общий объем управляющих усилий определяется как: $\Delta(\vec{B} - \vec{B}_0)$.

Таким образом, общая постановка задачи стратегического управления выглядит следующим образом: необходимо определить такой вектор $\vec{B}$, при котором выполняется условие

$$\vec{E} = \Phi(\vec{B}, R_{B\to C}^{A_0}, R_{C\to E}^{D_0}) > \vec{E}_t, \quad (1)$$

и объем затрачиваемых ресурсов для достижения необходимого состояния объекта (объем управляющих усилий) будет минимален:

$$\Delta(\vec{B} - \vec{B}_0) \to min. \quad (2)$$

Здесь $\vec{E}_t$ - вектор, определяющий необходимое состояние внешней среды, которое определяет достижение стратегического рыночного положения.

Данная задача может быть решена с помощью аппарата теории нечетких множеств. Одной из возможностей, которые предоставляет формальный аппарат теории нечетких множеств, является описание исходных данных задачи инновационного управления, содержащих неопределенность, с помощью нечетких чисел. Нечеткие количественные оценки, кроме абсолютных значений включаемых в расчет параметров, характеризуют также и уровень неопределенности данных. В зависимости от способности экспертов оценивать уровень и характер неопределенности могут использоваться простые интервальные оценки, доверительные тройки (составная оценка, содержащая минимально и максимально возможные значения параметра, а также наиболее возможное из данного интервала), более сложные конфигурации, описывающие область размытости (структуру «уровень достоверности – доверительный интервал»). Применение нечетких чисел позволяет упрощать содержание модели, опуская полное формальное описание сложных элементов и подсистем объекта, размывая оценки результирующих параметров на соответствующую величину неопределенности, вносимую данным упрощением. Поиск решений на основе нечеткого моделирования содержит те же процедуры, что и в задачах с четкими параметрами, дополнительным этапом является выработка конкретных управленческих решений на основе полученного ответа.

4. Практическая реализация поставленной задачи. Выполненная формализация и рассмотренные принципы аппарата теории нечетких множеств позволяют перейти к практической реализации данной задачи. Рассмотрим реальный опыт решения задачи стратегического управления из практики работы строительной компании ООО «Строительное управление №10» треста «Башкортостаннефтезаводстрой». В результате анализа рыночной конъюнктуры и внутреннего анализа (на основе SWOT-метода) были обоснованы необходимость и возможность реализации стратегии инновационного развития предприятия с целью повышения конкурентоспособности. При этом использовалась схема укрупненных стратегических целей компании. Экспертами были определены следующие бизнес-цели на рынке, достижение которых обеспечивало выполнение стратегии:

- повышение доверия потребителей к качеству возводимого жилья (e_{t1});
- снижение себестоимости возводимых объектов (e_{t2});
- привлечение бюджетных заказов (e_{t3});
- оптимизация работы с партнерами (подрядчиками и заказчиками) (e_{t4});
- увеличение объемов возводимого жилья (e_{t5}).

Для каждой из указанных качественных характеристик была определена соответствующая числовая (нечеткая) оценка из интервала от 0 до 1 (чем выше нечеткая оценка, тем бо-

лее значима бизнес-цель). Вектор $\vec{E}_t$ принял вид:

$\vec{E}_t = (e_{t1}, e_{t2}, e_{t3}, e_{t4}, e_{t5}) = (0{,}6;\ 0{,}9;\ 0{,}8;\ 0{,}7;\ 0{,}9)$.

Далее определялись точки выхода объекта, оказывающие влияние на указанные параметры рыночного окружения и качественные оценки связи между ними в виде матрицы влияний (фактора на результат). При этом необходимо отметить, что любое коммерческое предприятия характеризуется множеством точек выхода. Кроме того, чем более детально анализируется предприятие, тем большее количество точек выхода можно получить. Поскольку в рамках данной работы рассматривается инновационное развитие предприятия и его инновационный потенциал, то из множества возможных точек выхода были рассмотрены следующие:

- внедрение инновационных строительных материалов (c_1);
- внедрение инновационных строительных технологий (c_2);
- внедрение инновационных маркетинговых идей и подходов (c_3);
- внедрение инновационных информационных технологий (c_4);
- внедрение современной системы контроля качества (c_5).

Определенная экспертами нечеткая матрица влияний точек выхода объекта (C) на точки выхода микросреды (E) при сложившемся состоянии внешней среды:

$$R_{C\to E}^{D_0} = \begin{pmatrix} 0{,}6 & 0{,}9 & 0{,}6 & 0{,}7 & 0{,}8 \\ 0{,}6 & 1 & 0{,}6 & 0{,}7 & 0{,}9 \\ 0{,}9 & 0{,}6 & 0{,}5 & 0{,}6 & 0{,}6 \\ 0{,}5 & 0{,}7 & 0{,}7 & 0{,}9 & 0{,}5 \\ 1 & 0{,}4 & 0{,}8 & 0{,}4 & 0{,}4 \end{pmatrix}$$

Нечеткие оценки, соответствующие 0,5, описывают нейтральные отношения, и их приближение к границам оценочных интервалов (0 и 1) отражает усиление связи (отрицательное и положительное соответственно).

Из множества элементов объекта были выделены точки входа, т.е. те параметры объекта, при управляющем воздействии на которые изменяется состояние элементов и подсистем предприятия, оказывающих воздействие на внешнюю среду. Эксперты отнесли к ним:

- используемые строительные материалы (b_1);
- используемые строительные технологии (b_2);
- компетентность инженерно-технических работников (ИТР) (b_3);
- используемые технологии работы с партнерами (b_4);
- существующая организация логистики (b_5).

До момента реализации стратегии состояние этих параметров характеризовалось вектором $\vec{B}_0$=(0,6; 0,5; 0,8; 0,7; 0,4), а влияние точек входа (B) на точки выхода объекта (C), по мнению экспертов, определялось следующей матрицей:

$$R_{B\to C}^{D_0} = \begin{pmatrix} 1 & 0{,}8 & 0{,}6 & 0{,}5 & 0{,}8 \\ 0{,}8 & 1 & 0{,}7 & 0{,}5 & 0{,}8 \\ 0{,}8 & 0{,}9 & 0{,}9 & 0{,}9 & 0{,}9 \\ 0{,}5 & 0{,}5 & 0{,}6 & 0{,}9 & 0{,}6 \\ 0{,}7 & 0{,}7 & 0{,}9 & 0{,}8 & 0{,}6 \end{pmatrix}$$

Указанные исходные отношения позволили определить связи между управляемыми параметрами объекта и состоянием внешней среды. В отличие от обычных матричных расчетов отношения, связывающие нечеткие матрицы и векторы, не могут использовать операции сложения или произведения между соответствующими элементами, так как в этом случае будет утеряна качественная нагрузка, определяемая нечеткими оценками. Поэтому, для сохранения экономического смысла проводимых вычислений, необходимо воспользоваться

операцией максиминной композиции. Для определения элемента r_{ij} результирующей матрицы сначала определяются попарные минимумы среди соответствующих элементов i-й строки первого и j-го столбцов второй матрицы. Можно определить экономический смысл подобной операции – если уровень воздействия элемента объекта на элемент микросреды низок, то, независимо от отношений этого параметра с другими параметрами объекта, обеспечить более качественное воздействие на среду не удастся, и наоборот. Далее из найденных минимумов выбирается наибольший, так как разумно предположить, что уровень взаимодействия между точкой входа объекта и точкой выхода внешней среды определяется наиболее сильной из существующих опосредованных связей.

$$R_{B\to C}^{A_0} \times R_{\mathrm{C}\to\mathrm{E}}^{D_0} = \begin{pmatrix} 1 & 0{,}8 & 0{,}6 & 0{,}5 & 0{,}8 \\ 0{,}8 & 1 & 0{,}7 & 0{,}5 & 0{,}8 \\ 0{,}8 & 0{,}9 & 0{,}9 & 0{,}9 & 0{,}9 \\ 0{,}5 & 0{,}5 & 0{,}6 & 0{,}9 & 0{,}6 \\ 0{,}7 & 0{,}7 & 0{,}9 & 0{,}8 & 0{,}6 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0{,}6 & 0{,}9 & 0{,}6 & 0{,}7 & 0{,}8 \\ 0{,}6 & 1 & 0{,}6 & 0{,}7 & 0{,}9 \\ 0{,}9 & 0{,}6 & 0{,}5 & 0{,}6 & 0{,}6 \\ 0{,}5 & 0{,}7 & 0{,}7 & 0{,}9 & 0{,}5 \\ 1 & 0{,}4 & 0{,}8 & 0{,}4 & 0{,}4 \end{pmatrix} \Rightarrow R_{B\to E}$$

$$= \begin{pmatrix} 0{,}8 & 0{,}9 & 0{,}8 & 0{,}7 & 0{,}8 \\ 0{,}8 & 1 & 0{,}8 & 0{,}7 & 0{,}9 \\ 0{,}9 & 0{,}9 & 0{,}8 & 0{,}9 & 0{,}9 \\ 0{,}6 & 0{,}7 & 0{,}7 & 0{,}9 & 0{,}6 \\ 0{,}9 & 0{,}7 & 0{,}7 & 0{,}8 & 0{,}7 \end{pmatrix}$$

Матрица $R_{B\to E}$ выявляет неявные связи между управляемыми параметрами объекта и состоянием рынка компании. Средний уровень оценок выше, чем в исходных отношениях, так как многие элементы объекта оказывают опосредованное влияние на элементы микросреды, прямые связи между которыми четким образом не проявляются.

Исследование результирующей матрицы является отдельным направлением исследования стратегических воздействий. Например, используемая строительная технология определяет снижение себестоимости ($r_{22} = 1$), что является очевидным: в этом и состоит задача инноваций. Кроме того, из данной матрицы видно, что наибольшее влияние на состояние рынка компании имеют три точки входа: компетентность ИТР, используемые строительные технологии и используемые строительные материалы (точки входа перечислены по мере убывания влияния). Следовательно, с учетом данной информации представляется целесообразным преобразовать вектор $\vec{\mathrm{B}}_0$=(0,6; 0,5; 0,8; 0,7; 0,4) в вектор $\vec{B}$= (0,6; 0,5; 0,9; 0,7; 04), не забывая при этом об условии минимизации управляющих усилий. При этом в новом векторе изменено только состояние третьей точки входа – компетентности ИТР.

Композиция между вектором исходного состояния управляемых параметров (вектор $\vec{\mathrm{B}}_0$) и матрицей $R_{B\to E}$ дает оценку текущего потенциала компании на рассматриваемом рынке ($\vec{E}_0$):

$$\vec{E}(0{,}6 \quad 0{,}5 \quad 0{,}8 \quad 0{,}7 \quad 0{,}4) \times \begin{pmatrix} 0{,}8 & 0{,}9 & 0{,}8 & 0{,}7 & 0{,}8 \\ 0{,}8 & 1 & 0{,}8 & 0{,}7 & 0{,}9 \\ 0{,}9 & 0{,}9 & 0{,}8 & 0{,}9 & 0{,}9 \\ 0{,}6 & 0{,}7 & 0{,}7 & 0{,}9 & 0{,}6 \\ 0{,}9 & 0{,}7 & 0{,}7 & 0{,}8 & 0{,}7 \end{pmatrix} = (0{,}7 \quad 0{,}7 \quad 0{,}7 \quad 0{,}7 \quad 0{,}7)$$

Поэлементное сравнение полученного вектора и вектора требуемой предприятию стратегической рыночной позиции $\vec{E}_t$=(0,6; 0,9; 0,8; 0,7; 0,9) показало, что при текущем уровне развития невозможно достижение необходимого количества бюджетных заказов, а также увеличение объемов возводимого жилья и снижение себестоимости возводимых объектов. Состояние внешней среды ($\vec{\mathrm{E}}$) при данном уровне вектора $\vec{B}$:

$$\vec{E} = \Phi(B, R_{B\to E}) = (0{,}6 \quad 0{,}6 \quad 0{,}9 \quad 0{,}7 \quad 0{,}4) \times \begin{pmatrix} 0{,}8 & 0{,}9 & 0{,}8 & 0{,}7 & 0{,}8 \\ 0{,}8 & 1 & 0{,}8 & 0{,}7 & 0{,}9 \\ 0{,}9 & 0{,}9 & 0{,}8 & 0{,}9 & 0{,}9 \\ 0{,}6 & 0{,}7 & 0{,}7 & 0{,}9 & 0{,}6 \\ 0{,}9 & 0{,}7 & 0{,}7 & 0{,}8 & 0{,}7 \end{pmatrix} =$$

$$= (0{,}9 \quad 0{,}9 \quad 0{,}8 \quad 0{,}9 \quad 0{,}9)$$

Таким образом, задача определения такого вектора $\vec{B}$, при котором выполняется условие (1), и объем затрачиваемых ресурсов для достижения необходимого состояния объекта (объем управляющих усилий) будет минимален, выполнена.

Иными словами, результатом совершенствования инновационного развития предприятия является улучшение положения компании на всех оцениваемых направлениях. При этом выявлена основная точка входа – компетентность ИТР – при дополнительном финансировании которой можно получить наибольший результат инновационного развития предприятия в целом.

Таким образом, решение задачи управления инновационным развитием с использованием нечетких оценок позволяет связать внешние и внутренние цели и условия простыми отношениями, учесть параметры с различной степенью определенности, получить количественные критерии развития на основе анализа качественных характеристик – экспертных оценок. Поиск решения не усложняется при увеличении рассматриваемого элементного набора и множества связей внутри объекта, объекта и внешней среды, растет лишь размерность используемых отношений. Кроме того, определенные экспертами отношения могут использоваться в качестве имитационной модели при проведении сценарного стратегического планирования.

Заключение. Инновационный тип развития возможен только на предприятиях, реализующих процессно-ориентированное управление, поскольку для своевременной реализации и внедрения инновационной бизнес-идеи необходим достаточный уровень гибкости и быстрой реакции на внешние и внутренние изменения. Соответственно, для построения эффективно работающей системы инновационного развития предприятию, в первую очередь, необходимо пересмотреть методы управления и организации производства с позиции инновационных бизнес-процессов.

Выделенные в работе отличительные черты инновационных бизнес-процессов от стандартных традиционных производственных бизнес-процессов позволяют на практике более детально описать инновационный бизнес-процесс. Анализ бизнес-процесса развития инновационного проекта от его зарождения в виде бизнес-идеи, то есть результатов научных исследований, имеющих перспективу коммерциализации, до его завершения и постановки на производство разработанного продукта позволяет выявить основные создаваемые ресурсы. Таким образом, инновационный продукт – это совокупность материальных, информационных и человеческих ресурсов.

В контексте инновационного развития предприятия как метода поддержания уровня конкурентоспособности предприятия актуальной представляется проблема стратегического инновационного развития предприятия. С этой целью, на базе системного подхода с учетом процессно-ориентированного управления внутри предприятия, проанализированы основные связи между объектом инновационного управления, микросредой и макросредой. При этом доказано, что объем управляющих усилий будет определяться совокупным изменением состояния элементов объекта, принимающих управляющие сигналы, внутренняя эффективность управления – совокупным изменением состояния элементов, воздействующих на микросреду (точек выхода объекта), стратегическая эффективность – совокупным изменением параметров микросреды, определяющих рыночную позицию компании. В качестве целевой

функции, на наш взгляд, целесообразно рассмотрение минимизации объема затрачиваемых ресурсов для достижения необходимого состояния объекта.

На базе полученной концептуальной модели выполнены постановка, формализация и реализация задачи управления инновационным развитием предприятия на базе инновационных бизнес-процессов. Данная задача была решена с помощью теории нечетких множеств на базе экспертных оценок. Представленная постановка задачи позволяет связать внешние и внутренние инновационные цели предприятия с имеющимися в распоряжении предприятия процессными и материальными ресурсами, получить количественные критерии развития на основе анализа качественных характеристик – экспертных оценок.

Список источников

1. Ресурсы инноваций: организационный, финансовый, административный: Учеб. пособие для вузов / Под ред. И.П. Николаевой. – М.: Юнити-Дана, 2003. – 102 с.
2. Бублик Н.Д. Проблемы инновационного развития современной экономики / Н.Д. Бублик. – Уфа, 2002. – 98 с.
3. Бублик Н.Д. Риск-ресурс: Проблемы венчурно-стохастической деятельности / Н.Д. Бублик, В.Б. Силантьев. – Уфа, 1999. – 84 с.
4. Зинов В. Г. Управление интеллектуальной собственностью. АНХ, Центр коммерциализации технологий. М.: Монолит, 2002. – 154 с.
5. Родионова Л.Н. Управление инновациями: экономические аспекты / Л.Н. Родионова, С.Т. Пашин и др. – Уфа: ГУП РБ УПК, 2009. – 248 с.
6. Туктарова П.А. Формирование системы показателей деятельности промышленного предприятия в процессе идентификации кризисных явлений/ П.А. Туктарова, Ю.Т. Мансурова // Вопросы экономики и права, 2018. – № 118. – С. 97-101.
7. Мансурова Ю.Т. Управление инновационным потенциалом предприятия / Ю.Т. Мансурова // Экономические науки, 2009. – № 60. – С. 364-368.
8. Инновационный менеджмент в России: вопросы стратегического управления и научно-технологической безопасности / Рук. авт. колл. В.Л. Макаров и А.Е. Варшавский. – М.: Наука, 2004. – 880 с
9. Фролов И.Э. Наукоемкий сектор промышленности РФ: экономико-технологический механизм ускоренного развития. – М.: Макс Пресс, 2004. – 320 с.
10. Матузова И.В. Методика оценки инновационного потенциала промышленного предприятия / Матузова И.В. // Вестник Ленинградского государственного университета им. А.С. Пушкина, 2012. – Вып. № 4. – Т. 6. – С. 87-97.
11. Яшин С.Н. Совершенствование и практическая апробация методики оценки экономического состояния и уровня инновационного развития предприятия / С.Н. Яшин, Ю.С. Солдатова // Финансы и кредит, 2013. – № 12. – С. 39-47.
12. Анисимов Ю.П. Методика оценки инновационной деятельности предприятия / Ю.П. Анисимов, И.В. Пешкова, Е.В. Солнцева // Инновации, 2006. – № 11. – С. 49-55.
13. Митякова О.И. Оценка инновационного потенциала промышленного предприятия // Финансы и кредит, 2004. – № 13. – С. 69-74.
14. Евтушенко Е. Оценка инновационного потенциала предприятия/ Е. Евтушенко, Э. Юсупова // Инвестиции и инновации, 2006. – № 11. – С. 63-68.
15. Беляев Л.С. Решение сложных оптимизационных задач в условиях неопределенности / Л.С. Беляев // Новосибирск: Наука, 1987. – 128 с.
16. Заде Лофти. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Заде Лофти. – М.: Мир, 1976. – 168 с.
17. Кофман Арнольд Введение теории нечетких множеств в управлении предприятиями / Кофман Арнольд, Хил Алуха Хайме // Минск: Вышэйшая школа, 1992. – 222 с.
18. Прикладные нечеткие системы/ Пер. с япон. Ю.Н.Чернышева; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993. – 368 с.

Мансурова Юлия Талгатовна. *Кандидат экономических наук, доцент кафедры Экономики предпринимательства Уфимский университет науки и технологий, AuthorID: 1005445, SPIN: 4596-9811, ORCID: 0000-0001-7373-0344, mansurova.j@mail.ru, Россия, Уфа, Заки Валиди, д. 32.*

Старцева Анна Владимировна. *Кандидат экономических наук, доцент кафедры Экономики предпринимательства Уфимский университет науки и технологий, SPIN: 3399-7465, AuthorID: 1005608, yokogiri@mail.ru, Россия, Уфа, Заки Валиди, д. 32.*

UDC 519.86
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.012

The task of forming a system of innovative development of the enterprise taking into account innovative business processes

Julia T. Mansurova, Anna V. Startseva
Ufa University of Science and Technology, Russia, Ufa, *mansurova.j@mail.ru*

Abstract. Innovative development plays an important role in the successful operation of enterprises at the present time. However, in order to be competitive, it is necessary not only to introduce new technologies, but also to form an innovative business process. The solution of the problem of forming the system of innovative development of the enterprise, taking into account innovative business processes, is becoming more and more relevant. In this paper, the main stages of the formation of an innovative business process with the help of fuzzy sets are considered, the formulation, formalization and implementation of the task of managing the innovative development of an enterprise on the basis of innovative business processes is carried out. Special attention is paid to the definition of criteria-objectives of the model construction and their quantitative assessments, which allow to increase the efficiency of innovative development of the enterprise. The results of the study can be used by enterprises of various sectors of the economy in solving the tasks of managing innovative development and increasing competitiveness in the market. Thus, this work contributes to the development of the theory and practice of management of innovative development of enterprises, taking into account innovative business processes, offers new approaches and techniques, and also reflects the relevance of this problem at the present time.

Keywords: innovative business process; competitiveness; innovative development of the enterprise

References

1. Resursy innovacij: organizacionnyj, finansovyj, administrativnyj: Ucheb. posobie dlya vuzov [Innovation resources: organizational, financial, administrative: Proc. allowance for universities]. Ed. I.P. Nikolaeva, M.: Unity-Dana, 2003, 102 p.
2. Bagel N.D. Problemy innovacionnogo razvitiya sovremennoj ekonomiki [Problems of innovative development of modern economy]. Ufa, 2002, 98 p.
3. Bublik N.D., Silantiev V.B. Risk-resurs: Problemy venchurno-stohasticheskoj deyatel'nosti [Risk resource: Problems of venture-stochastic activity]. Ufa, 1999, 84 p.
4. Zinov V.G. Upravlenie intellektual'noj sobstvennost'yu. ANH, Centr kommercializacii tekhnologij. [Management of intellectual property. Academy of National Economy, Technology Commercialization Center]. M., Monolit [Monolith], 2002, 154 p.
5. Rodionova L.N., Pashin S.T. Upravlenie innovaciyami: ekonomicheskie aspekty [Management of innovations: economic aspects], Ufa: GUP RB UPC, 2009, 248 p.
6. Tuktarova P.A., Mansurova Yu.T. Formirovanie sistemy pokazatelej deyatel'nosti promyshlennogo predpriyatiya v processe identifikacii krizisnyh yavlenij [Formation of a system of indicators of the activity of an industrial enterprise in the process of identifying crisis phenomena]. Voprosy ekonomiki i prava [Questions of Economics and Law], 2018, no. 118, pp. 97-101.
7. Mansurova Yu.T. Upravlenie innovacionnym potencialom predpriyatiya [Management of the innovative potential of the enterprise]. Ekonomicheskie nauki [Economic sciences], 2009, no. 60, pp. 364-368.
8. Innovacionnyj menedzhment v Rossii: voprosy strategicheskogo upravleniya i nauchno-tekhnologicheskoj bezopasnosti [Innovation management in Russia: issues of strategic management and scientific and technological security], M., Nauka, 2004, 880 p.
9. Frolov I.E. Naukoemkij sektor promyshlennosti RF: ekonomiko-tekhnologicheskij mekhanizm uskorennogo razvitiya. [Science-intensive industry sector of the Russian Federation: economic and technological mechanism of accelerated development], M.,Maks Press, 2004, 320 p.
10. Matuzova I.V. Metodika ocenki innovacionnogo potenciala promyshlennogo predpriyatiya [Methodology for assessing the innovative potential of an industrial enterprise]. Vestnik Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta im. A.S. Pushkina [Bulletin of the Leningrad State University. A.S. Pushkin], 2012, issue 4, v. 6, pp. 87-97.
11. Yashin S.N., Soldatova Yu.S. Sovershenstvovanie i prakticheskaya aprobaciya metodiki ocenki ekonomicheskogo sostoyaniya i urovnya innovacionnogo razvitiya predpriyatiya [Improvement and practical testing of the methodology for assessing the economic state and level of innovative development of an enterprise]. Finansy i kredit [Finance and credit], 2013, no. 12, pp. 39-47.

12. Anisimov Yu.P., Peshkova I.V., Solntseva E.V. Metodika ocenki innovacionnoj deyatel'nosti predpriyatiya [Methodology for assessing the innovative activity of an enterprise]. Innovacii [Innovations], 2006, no. 11, pp. 49-55.
13. Mityakova O.I. Ocenka innovacionnogo potenciala promyshlennogo predpriyatiya [Assessment of the innovative potential of an industrial enterprise]. Finansy i kredit [Finance and credit], 2004, no. 13, pp. 69-74.
14. Evtushenko E., Yusupova E. Ocenka innovacionnogo potenciala predpriyatiya [Assessment of the innovative potential of the enterprise]. Investicii i innovacii [Investments and innovations], 2006, no. 11, pp. 63-68.
15. Belyaev L.S. Reshenie slozhnyh optimizacionnyh zadach v usloviyah neopredelennosti [Solving complex optimization problems under uncertainty], Novosibirsk, Nauka, 1987, 128 p.
16. Zadeh Lofty. Ponyatie lingvisticheskoj peremennoj i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennyh reshenij [The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions], M., Mir, 1976, 168 p.
17. Kofman Arnold, Khil Aluha Jaime. Vvedenie teorii nechetkih mnozhestv v upravlenii predpriyatiyami [Introduction to the theory of fuzzy sets in enterprise management], Minsk,Vysheishaya shkola, 1992, 222 p.
18. Prikladnye nechetkie sistemy [Applied fuzzy systems]. Tr. from Japanese Yu.N.Chernysheva; ed. T. Terano, K. Asai, M. Sugeno. M., Mir, 1993, 368 p.

Yulia Talgatovna Mansurova. *Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Business Economics Ufa University of Science and Technology. AuthorID: 1005445, SPIN: 4596-9811, ORCID: 0000-0001-7373- 0344, mansurova.j@mail.ru Russia, Ufa, Zaki Validi, 32.*

Startseva Anna Vladimirovna. *Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Business Economics, Ufa University of Science and Technology, SPIN: 3399-7465, AuthorID: 1005608, yokogiri@mail.ru, Russia, Ufa, Zaki Validi, 32.*

Статья поступила в редакцию 09.01.2023; одобрена после рецензирования 13.02.2023; принята к публикации 02.03.2023.
The article was submitted 01/09/2023; approved after reviewing 02/13/2023; accepted for publication 03/02/2023.

Интеллектуальные технологии и информационная безопасность

УДК 004.056.5
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.013

Подход к защите интерфейсов управления киберфизической системой от угроз нарушения доступности

Исхаков Андрей Юнусович, Жарко Елена Филипповна
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, Москва, *iay@ipu.ru*

Аннотация. Необходимость развития существующих подходов и научно-технических решений в области обеспечения информационной безопасности вызвана стремительным развитием киберфизических систем, требующих адаптации механизмов защиты под новые архитектуры, технические ограничения и особенности функционирования. Одним из важных, но слабо рассмотренных в мировой литературе направлений защиты киберфизических систем, остаются вопросы построения эффективных протекторов, нивелирующих угрозы нарушения доступности интерфейсов взаимодействия на прикладном уровне. Нарушение доступности подсистем управления для рассматриваемых объектов может привести к трагическим последствиям, в связи с чем требуется уже сейчас проводить комплексный анализ и модернизацию подходов к их защите от атак типа DDoS. В данном исследовании предлагается подход к обеспечению защиты интерфейсов управления киберфизической системой от внешних воздействий, направленных на нарушение доступности за счет отсутствия технических возможностей эшелонирования защиты прикладного программного обеспечения. В качестве объекта киберфизической системы был использован виртуальный полигон беспилотных транспортных средств. Приводится анализ применимости существующих подходов к защите от атак прикладного уровня для выбранного класса объектов, предлагается адаптированный подход к защите объекта и проводится исследование его эффективности.

Ключевые слова: киберфизические системы, нарушение доступности, информационная безопасность, атаки, беспилотные транспортные средства

Цитирование: Исхаков А.Ю. Подход к защите интерфейсов управления киберфизической системой от угроз нарушения доступности / А.Ю. Исхаков, Е.Ф. Жарко // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 149-157. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.013.

Введение. В течение последнего года с распределенными атаками типа «отказ в обслуживании» сталкивались практически все объекты критически важной информационной инфраструктуры, предоставляющие сервисы, доступные из внешней сети Интернет. Так, согласно [1], статистика направленных DDoS-атак на отечественные ресурсы стала не просто рекордной, а беспрецедентной не только по количеству и интенсивности атак, но и по уровню подготовки злоумышленников. Безусловно, существуют регуляторные требования [2], которые обязывают владельцев значимых объектов критической информационной инфраструктуры запрещать удаленный доступ, а также исключить возможности бесконтрольного доступа к управлению лицами, не являющимися работниками предприятия.

Наряду с этим, следует отметить тренд современного общества на развитие технологий умного города, беспилотного транспорта и других концепций, невозможных без предоставления массового внешнего (но не бесконтрольного) доступа, в том числе, к беспилотным транспортным средствам – средствам повышенной опасности. В связи с этим, необходимо уже сейчас, на заре интеграции таких систем в массовый сектор, разрабатывать и апробировать научно-технические решения для противодействия вредоносным воздействиям и различным атакам информационной безопасности.

В данной статье рассматривается подход к обеспечению защиты от внешних воздействий беспилотных транспортных средств от Flood-атак на интерфейсы управления прикладного уровня.

1. Необходимость защиты интерфейсов управления. Целью создания умного города является улучшение качества жизни жителей с помощью технологии городской цифровизации для повышения эффективности обслуживания и удовлетворения нужд резидентов. Развитие беспилотных транспортных средств является одной из составляющих данного процесса. Создание эффективной системы мониторинга и управления таким транспортом, обеспечивающей, в условиях их массового использования (в различных средах – земля/воздух), безопасное функционирование и максимальную пропускную способность транспортной системы, является одним из условий реализации планов создания умных городов.

На рисунке 1 представлено место исследуемых атак в разрезе различных классификаций вредоносных воздействий, направленных на беспилотные транспортные средства (БТС).

Расстояние от злоумышленника до БТС
физический доступ к автомобилю: например, через интерфейс OBD (бортовая диагностика)
ближнее расстояние: сюда входят пассивная сигнализация (10 см), система считывания давления в шинах (1 м), бесключевые системы открытия и запуска двигателя (5–20 м) и все системы, подключённые через Bluetooth (10 м);
большие расстояния: системы связи Wi-Fi или 4/5G, системы управления дорожной инфраструктурой, мобильные приложения, предназначенные для управления БТС.

Цели воздействия
Нарушение конфиденциальности (получить доступа к информационно-развлекательной системе для записи голоса или для получения информации о маршруте через навигатор)
Нарушение целостности (изменить скорость БТС, воздействуя на электронные блоки, управляющие акселератором, или воздействуя непосредственно на тормоз)
Нарушение доступности (блокировать доступ легитимного оператора / вывести из строя систему поддержки и принятия решений)

Уровень воздействия в соответствии с моделью OSI
L1 - физический. Работа с сигналами и двоичными данными
L2 - канальный. Установка соединения и физическая адресация.
L3 - сетевой. Взаимодействие устройств друг с другом
L4 - транспортный. Транспортировка данных между конечными пунктами
L5 - сеансовый. Управление соединениями
L6 – представления. Кодирование и декодирование данными
L7 - прикладной. Доступ к сетевым ресурсам

Рис. 1. Характеристики рассматриваемых воздействий на киберфизические системы

Угрозы нарушения доступности направлены на снижение работоспособности системы обработки данных, либо на реализацию полной блокировки доступа субъектов к некоторым ее ресурсам [3-14]. При этом для нарушения доступности основной функциональности не всегда необходимо достигать внутренних отказов информационной системы (основных модулей), зачастую злоумышленникам достаточно добиться отказа поддерживающей инфраструктуры или интерфейсов управления. Когда речь идет о беспилотных транспортных средствах и умной дорожной инфраструктуре, достаточным является блокировка интерфейсов управления, как для операторов машин, так и операторов облачных центров мониторинга транспортной инфраструктуры (например, V2X технологий). На рисунке 2 представлены выдержки из исследования актуальных угроз информационной безопасности современного автотранспорта [15].

Ранее проведенный авторами настоящего исследования анализ уязвимостей и точек отказа беспилотных транспортных средств [16] свидетельствует о необходимости защиты высокоуровневых интерфейсов управления беспилотных транспортных средств от атак на прикладном уровне.

Рис. 2. Актуальные угрозы информационной безопасности автотранспорта
RSU (Roadside Unit) – придорожные блоки (модули)

2. Особенность защиты в условиях ограничений. Классические подходы с выстраиванием нескольких эшелонов защиты, которые используются для обеспечения безопасности современных IT-инфраструктур, не могут быть применены в защите интерфейсов управления беспилотными транспортными средствами. Это связано с архитектурой и особенностями текущей реализации подобных решений, в частности:

– ограниченными вычислительными ресурсами оборудования, установленного непосредственно на беспилотном транспортном средстве, которые можно использовать в реализации задач механизмов защиты;
– невозможностью повсеместного применения облачных средств защиты информации (СЗИ), поскольку зачастую требуется предоставление доступа операторов в локализованных сетевых сегментах без доступа в глобальную сеть;
– необходимость обеспечения возможности децентрализованных схем взаимодействия, не предусматривающих возможность установки единого инструмента для глубокой инспекции трафика;
– невозможностью передачи ключей шифрования трафика для сторонних систем.

Разрабатываемый подход заключается в разработке такого алгоритмического обеспечения, которое, с учетом вышеперечисленных особенностей, может быть локально интегрировано в подсистему защиты информации беспилотного транспортного средства и осуществлять блокировку атак «Отказ в обслуживании», направленных на интерфейсы взаимодействия с точки зрения инспектирования прикладного уровня.

3. Предлагаемый подход. В основе предлагаемого подхода лежит ранее разработанное авторским коллективом алгоритмическое обеспечение детектирования источников вредоносных запросов в киберфизических системах [17]. При этом была учтена необходимость обеспечения имплементации защитных механизмов локально, опираясь на вычислительные мощности вычислителя и без связи с централизованной системой защиты информации.

На протяжении 2022 года в сети Интернет была размещена HoneyPot система, эмулирующая сегмент киберполигона с беспилотными транспортными средствами посредством специально подготовленных Linux контейнеров. Для защиты от L3-L4 атак был развернут

межсетевой экран, а также система предотвращения вторжений (IPS) с существенными исключениями по сервисам. Посредством проброса наиболее популярных TCP-портов для веб-сервисов был открыт массовый доступ по нескольким выделенным IP-адресам в виртуализованную инфраструктуру без необходимости прохождения процесса авторизации. Часть контейнеров были открыты для любого пользователя без необходимости ввода каких-либо учетных данных. Подобные сервисы демонстрировали по заранее заданным сценариям случайные значения параметров беспилотного транспортного средства (мониторинга двигателей, приводов и различных датчиков, установленных на борту). Другая часть веб-сервисов представляла собой эмулятор системы управления транспортным полигоном. С целью создания эффекта интерактивности, веб-интерфейс отображал нагрузку на системные ресурсы, включая загрузку центрального процессора, оперативной памяти, среднее время ответа front-сервером клиентам. Злоумышленнику требовалось подобрать данные для формы HTTP-аутентификации, при этом были реализованы несколько учетных записей с уровнем доступа ReadOnly со словарными паролями, которые в автоматизированном режиме перебиралось большинством brute-force сканеров. Для сегмента с «защищенной» системой управления транспортным полигоном был установлен межсетевой экран уровня приложений одного из известных отечественных вендоров. В результате проведенного анализа сценариев, которые применялись злоумышленниками в разрезе атаки «Отказ в обслуживании», были сформированы основные векторы атак злоумышленников – GET и POST flood на основные формы, эмулирующие команды управления (конфигурирования) беспилотного транспортного средства, а также атаки малого объема (“Low and Slow”).

Учитывая проведенный этап, был выработан следующий подход к защите от атак типа «Отказ в обслуживании» на интерфейсы прикладного уровня. На рисунке 3 представлена скорректированная структура подсистемы защиты, внедряемая непосредственно в беспилотное транспортное средство.

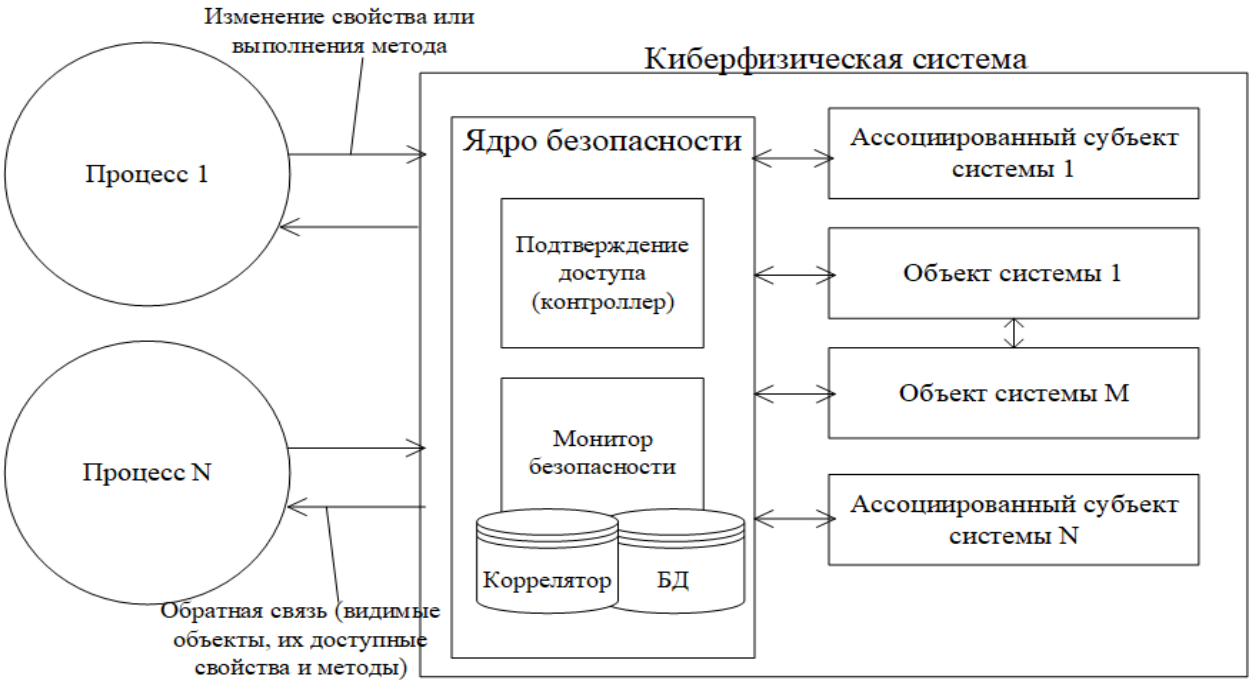


Рис. 3. Структура подсистемы защиты от DDoS атак на интерфейсы управления с учетом особенностей имплементации в инфраструктуру беспилотных транспортных средств

Опыт использования межсетевого экрана прикладного уровня в HoneyPot эксперименте продемонстрировал необходимость внедрения коррелятора, который бы учитывал основные метрики в HTTP-запросах на веб-интерфейс управления. Поскольку атаки проводились в

большей степени на бизнес-логику интерфейсов таким образом, чтобы не зафиксировать превышение пороговых значений в трафике, необходимо реализовывать систему защиты, основанную не на количественных показателях общего среза трафика, а на основании инспектирования кодов запросов от операторов.

В случае имплементации на беспилотное транспортное средство с низкой вычислительной способностью предлагается ограничить функциональность монитора безопасности исключительно оценкой доли возвращаемых интерфейсом ошибок (4xx, 5xx) с группировкой по сессии субъекта, а также оценкой стандартного отклонения времени между запросами и количеством уникальных запрашиваемых субъектом ресурсов. В отличие от применения ранее представленного подхода по обеспечению безопасности информационных/киберфизических систем, в случае защиты интерфейса управления беспилотного транспортного средства следует осуществлять быструю реакцию и передачу управляющего воздействия на межсетевые экраны уровня L3-L4 с блокировкой источников вредоносных воздействий не только по IP-адресам, но и автономным системам. Это связано с ограниченным количеством числа операторов, а также риском быстрого вывода сервиса из строя по причине ограниченных аппаратных ресурсов.

4. Результаты. Эксперимент по оценке эффективности предложенного подхода проводился на представленной ранее HoneyPot системе, эмулирующей наличие систем. Реализация коррелятора была выполнена на языке Python. Для наглядности, был использован наименьший инструментарий, включающий оценку кодов ошибок, среднее время ответа и стандартные пороги по количеству запросов в рамках одной сессии. В ходе эксперимента внешний доступ к системам был закрыт. В качестве генераторов паразитного трафика, в том числе, использовались виртуальные машины с установленными утилитами: HULK, Slowloris, LOIC, Xoic, DDOSIM, Rudy. Были реализованы 5 сценариев (различных техник) управляемой DDoS-атаки на заранее определенные endpoint всех интерфейсов управления. Используемый подход показал свою эффективность и возможность применения для беспилотных транспортных средств в децентрализованной схеме управления.

Так, на рисунке 4 представлен пример успешного детектирования целенаправленной атаки на форму аутентификации при условии стабильного тренда подключений (отсутствие взрывного эффекта).

Рис. 4. Пример успешного детектирования вредоносной активности на сервис аутентификации

В таблице 1 представлена консолидация оценки эффективности определения DDoS атак на интерфейсы управления прикладного уровня. Критерий *D* – «Деградация сервиса» – соответствует появлению 500, 502 и 503 ошибок от веб-сервиса интерфейса в течение более 30 секунд тестирования. Критерий *t* – среднее время детектирования атаки и начала блокирующих действий.

Таблица 1. Оценка эффективности определения DDoS атак прикладного уровня на интерфейсы управления

Тип атаки	Методы защиты интерфейса							
	Встроенные средства защиты интерфейса		Интегрированный WAF с стандартной политикой безопасности		Интегрированный WAF + HMM-модель защиты от DDoS		Предложенный подход + интегрированный WAF + HMM-модель защиты от DDoS	
	D	*t*, сек	*D*	*t*, сек	*D*	*t*, сек	*D*	*t*, сек
GET FLOOD	+	180	+	180	-	60	-	30
POST FLOOD	+	180	+	60	+	60	-	30
Slowloris	+	0	-	60	-	60	-	30
POST-атака с большой полезной нагрузкой	+	30	-	60	-	60	-	15

Встроенные средства защиты веб-сервисов со статичными порогами показали свою несостоятельность. Применение предложенного подхода и более строгих правил блокировки источников запросов позволили добиться отсутствия эффекта деградации сервиса. При этом стоит отметить, что данный подход ориентирован на конкретный класс систем и, учитывая вышеописанные ограничения, предлагается с целью оптимизации инспекционных механизмов и ускорения реакции систем защиты интерфейсов управления беспилотных транспортных средств.

Заключение. Учитывая возможные масштабы DDoS-атак с использованием ботнетов и степень критичности стремительно растущих киберфизических систем, действительно важной задачей является разработка научно-технических решений противодействия угрозам «Отказ в обслуживании», несущим опасность не только отдельным компонентам киберфизических систем, но и жизни и здоровью окружающих.

Защита от атак «Отказ в обслуживании» на уровне приложений требуе адаптивной стратегии, включая возможность ограничения трафика на основе определенных наборов правил, которые могут регулярно меняться. Между тем, особенности функционирования беспилотных транспортных средств не всегда позволяют обеспечить общедоступные интерфейсы взаимодействия полноценным набором межсетевого экранирования и глубокой инспекции трафика. В данном исследовании была предпринята попытка разработки подхода к обеспечению защиты интерфейсов управления киберфизической системой от внешних воздействий, направленных на нарушение доступности за счет отсутствия технических возможностей эшелонирования защиты прикладного программного обеспечения.

Благодарности. Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06044.

Список источников

1. Amiri I.S., Soltanian M.R.K. Theoretical and experimental methods for defending against DDoS attacks. Waltham: Syngress is an imprint of Elsevier, 2016, 62 p.
2. Кульмамиров С. А.Современное состояние обнаружения DDOS-атак и противодействие к ним / С. А. Кульмамиров, А. А. Баймаманова, 2020. – № 4-2(60). – С. 50-57.
3. Власенко А.В. Идентификация DDOS-атак на web-серверы / А.В. Власенко, П.И. Дзьобан // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии, 2019. – № 1(45). – С. 181-187.

4. Титов Ф.М. Исследование методов защиты от атаки DDOS / Ф.М. Титов // Научные междисциплинарные исследования, 2021. – №5. – С. 36-41.
5. Bhattacharyya D.K., Kalita J.K. DDoS Attacks: Evolution, Prevention, Reaction and Tolerance. Chapman and Hall/CRC, 2016, 312 p.
6. Кусаинова У.Б. Методы противодействия угрозам нарушения информационной безопасности при ddos-атаках / У.Б. Кусаинова, Ж. Сарсенбаева, Д.В. Плескачев // Наука и реальность, 2020. – №4. – С. 35-43.
7. Rahal B.M., Santos A., Nogueira M. A Distributed Architecture for DDoS Prediction and Bot Detection. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 159756-159772.
8. Rao Varre D.N.M., Bayana J. A secured botnet prevention mechanism for HTTP flooding based DDoS attack. 3rd International Conference for Emerging Technology (INCET), Belgaum, India, 2022, pp. 1-5.
9. Dhanapal A., Nithyanandam P. An effective mechanism to regenerate HTTP flooding DDoS attack using real time data set. International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), Kerala, India, 2017, pp. 570-575.
10. Nashat D., Khairy S., Hassan M.M. Detection of application layer DDoS attack based on SIS epidemic model. IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 159827-159832.
11. Beckett D., Sezer S. HTTP/2 Cannon: Experimental analysis on HTTP/1 and HTTP/2 request flood DDoS attacks. Seventh International Conference on Emerging Security Technologies (EST), Canterbury, UK, 2017, pp. 108-113.
12. Yang S.J., Huang H.L. Design a hybrid flooding attack defense scheme under the Cloud Computing Environment. IEEE/ACIS 18th International Conference on Computer and Information Science (ICIS), Beijing, China, 2019, pp. 41-46.
13. Vanitha K.S., Uma S.V., Mahidhar S.K. Distributed denial of service: Attack techniques and mitigation. International Conference on Circuits, Controls, and Communications (CCUBE), Bangalore, India, 2017, pp. 226-231.
14. Wang J., Zhang M., Yang X., Long K., Xu J. HTTP-sCAN: Detecting HTTP-flooding attack by modeling multi-features of web browsing behavior from noisy web-logs. China Communications, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 118-128.
15. Правиков Д.И. Проблемы обеспечения информационной безопасности высокоавтоматизированных транспортных средств / Д.И. Правиков, Е.А. Пономарева, В.П. Куприяновский // International Journal of Open Information Technologies, 2020. – №6. – С. 98-103.
16. Iskhakov A.Yu., Mamchenko M.V. Vulnerabilities, Points of failure and adaptive protection methods in the context of group control of unmanned vehicles. J. Phys., Conf. Ser, vol. 1864, pp. 1-10.
17. Исхакова А.О. Алгоритм детектирования источников вредоносных запросов в киберфизических системах / А.О. Исхакова, А.Ю. Исхаков, Д.Н. Богачева, А.А. Молотов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2022. – № 10(3). – С. 1-9.

Исхаков Андрей Юнусович. *Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ИПУ РАН. Область научных интересов: информационная безопасность, идентификация и аутентификация субъектов доступа, анализ данных, интернет вещей, системы поддержки и принятия решений. AuthorID: 925433, SPIN: 3390-0291, ORCID: 0000-0002-6603-265X, iskhakovandrey@gmail.com, Россия, Москва 117997, Профсоюзная улица, д.65.*

Жарко Елена Филипповна. *Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник ИПУ РАН. Область научных интересов: кибербезопасность, верификация, валидация, автоматизация, обеспечение качества программного обеспечения, объекты повышенного риска, прогностические модели, имитационные модели. AuthorID: 30748, SPIN: 6288-1776, ORCID: 0000-0002-8895-4786, elena_hot@inbox.ru, Россия, Москва 117997, Профсоюзная улица, д.65.*

UDC 004.056.5
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.013

Approach to protecting cyber-physical system management interfaces from accessibility threats

Andrey Yu. Iskhakov, Elena F. Jharko
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
Russia, Moscow, *iay@ipu.ru*

Abstract. The need to develop existing approaches and scientific and technical solutions in the field of information security is caused by the rapid development of cyber-physical systems that require adaptation of protection mechanisms to new architectures, technical limitations and features of operation. One of the important, but poorly considered in the world literature areas of protection of cyber-physical systems, are the issues of building effective protectors that mitigate threats to the accessibility of interfaces at the application level. Disruption of the availability of control subsystems for the objects in question can lead to tragic consequences, so a comprehensive analysis and modernization of approaches to protect them from DDoS attacks is already required. This study proposes an approach to protecting cyber-physical system control interfaces from external influences aimed at disrupting accessibility due to the lack of technical capability to echelle the protection of application software. As the object of the cyber-physical system, a virtual polygon of unmanned vehicles was used. An analysis of applicability of existing approaches to protection against application layer attacks for the selected class of objects is given, an adapted approach to object protection is proposed and its effectiveness is investigated.

Keywords: cyber-physical systems, availability disruption, information security, attacks, unmanned vehicles

Acknowledgements: The reported study was partially funded by RFBR, project number 19-29-06044.

References

1. Amiri I.S., Soltanian M.R.K. Theoretical and experimental methods for defending against DDoS attacks. Waltham: Syngress is an imprint of Elsevier, 2016, 62 p.
2. Kulmamirov S.A., Baymanova A.A. Sovremennoe sostoyanie obnaruzheniya DDOS-atak i protivodejstvie k nim [The current state of DDOS attack detection and countermeasures]. Aktual'nyye nauchnyye issledovaniya v sovremennom mire [Current scientific research in the modern world], 2020, no. 4-2(60), p. 50-57.
3. Vlasenko A.V., Dzoban P.I. Identifikaciya DDOS-atak na web-servery [Identification of DDOS-attacks on web-servers]. Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokiye tekhnologii [The Caspian Journal: Management and High Technologies], 2019, no. 1(45), p. 181-187.
4. Titov F.M. Issledovanie metodov zashchity ot ataki DDOS [Investigation of methods of protection against DDOS attacks]. Nauchnyye mezhdistsiplinarnyye issledovaniya [Scientific Interdisciplinary Research], 2021, no.5, p. 36-41.
5. Bhattacharyya D.K., Kalita J.K. DDoS Attacks: Evolution, Prevention, Reaction and Tolerance. Chapman and Hall/CRC, 2016, 312 p.
6. Kusainova U.B., Sarsenbayeva Zh., Pleskachev D.V. Metody protivodejstviya ugrozam narusheniya informacionnoj bezopasnosti pri ddos-atakah [Methods of countering threats to information security during ddos-attacks]. Nauka i real'nost' [Science & Reality], 2020, no. 4, p. 35-43.
7. Rahal B.M., Santos A., Nogueira M. A Distributed Architecture for DDoS Prediction and Bot Detection. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 159756-159772.
8. Rao Varre D.N.M., Bayana J. A Secured Botnet Prevention Mechanism for HTTP Flooding Based DDoS Attack. 3rd International Conference for Emerging Technology (INCET), Belgaum, India, 2022, pp. 1-5.
9. Dhanapal A., Nithyanandam P. An effective mechanism to regenerate HTTP flooding DDoS attack using real time data set. International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), Kerala, India, 2017, pp. 570-575.
10. Nashat D., Khairy S., Hassan M.M. Detection of Application Layer DDoS Attack Based on SIS Epidemic Model. IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 159827-159832.
11. Beckett D., Sezer S. HTTP/2 Cannon: Experimental analysis on HTTP/1 and HTTP/2 request flood DDoS attacks. Seventh International Conference on Emerging Security Technologies (EST), Canterbury, UK, 2017, pp. 108-113.
12. Yang S.-J., Huang H.-L. Design a hybrid flooding attack defense scheme under the Cloud Computing Environment. IEEE/ACIS 18th International Conference on Computer and Information Science (ICIS), Beijing, China, 2019, pp. 41-46.

13. Vanitha K.S., Uma S.V., Mahidhar S.K. Distributed denial of service: Attack techniques and mitigation. International conference on circuits, controls, and communications (CCUBE), Bangalore, India, 2017, pp. 226-231.
14. Wang J., Zhang M., Yang X., Long K., Xu J. HTTP-sCAN: Detecting HTTP-flooding attack by modeling multi-features of web browsing behavior from noisy web-logs. China Communications, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 118-128.
15. Pravikov D.I., Ponomareva E.A., Kupriyanovsky V.P. Problemy obespecheniya informacionnoj bezopasnosti vysokoavtomatizirovannyh transportnyh sredstv [Problems of Information Security of Highly Automated Vehicles]. International Journal of Open Information Technologies, 2020, no.6, p. 98-103.
16. Iskhakov A.Yu., Mamchenko M.V. Vulnerabilities, Points of failure and adaptive protection methods in the context of group control of unmanned vehicles. J. Phys.: Conf. Ser, vol. 1864, pp. 1-10.
17. Iskhakova A.O. Iskhakov A.Y. Bogacheva D.N., Molotov A.A. Algoritm detektirovaniya istochnikov vredonosnyh zaprosov v kiberfizicheskih sistemah [Algorithm for detecting sources of malicious requests in cyber-physical systems]. Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii [Modeling, Optimization and Information Technology], 2022, 10(3), p. 1-9.

Iskhakov Andrey Yunusovich. *Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. Main research interests: information security, identification and authentication systems, data mining, Internet of things, decision-making systems. AuthorID: 925433, SPIN: 3390-0291, ORCID: 0000-0002-6603-265X, iskhakovandrey@gmail.com, Russia, Moscow, 117997, Profsoyuznaya street, 65.*

Jharko Elena Filippovna. *Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. Main research interests: cybersecurity, verification, validation, automation, quality assurance, high-risk facilities, predictive models, simulation models. AuthorID: 30748, SPIN: 6288-1776, ORCID: 0000-0002-8895-4786, elena_hot@inbox.ru, Russia, Moscow, 117997, Profsoyuznaya street, 65.*

Статья поступила в редакцию 27.02.2023; одобрена после рецензирования 01.03.2023; принята к публикации 06.03.2023.
The article was submitted 02/27/2023; approved after reviewing 03/01/2023; accepted for publication 03/06/2023.

УДК 004.056.5+004.89
DOI: 10.38028/ESI.2023.29.1.014

Оценка состояния комплексной системы защиты информации на основе онтологий

Наседкин Павел Николаевич, Аршинский Леонид Вадимович

Иркутский государственный университет путей сообщения,
Россия, Иркутск, *nasedkin_pn@irgups.ru*

Аннотация. Одной из проблем организации комплексной системы защиты информации (КСЗИ) является оценка функциональности системы в целом. Для решения подобных задач могут использоваться подходы на основе агрегированного оценивания. В настоящее время такие оценки строятся, как правило, с помощью взвешенных средних, что не позволяет моделировать ключевые компоненты системы, то есть такие, утрата которых ведёт к нефункциональности системы в целом или отдельных её подсистем. В работе на основе метода логико-аксиологического оценивания показан подход к агрегированному оцениванию подсистемы программно-технических решений КСЗИ предприятия. Необходимой частью такого оценивания является онтологическое моделирование системы с помощью лёгких онтологий, отражающих взаимосвязи между компонентами. Построены онтологии и дан пример расчёта для одной из подсистем.

Ключевые слова: информационная безопасность, комплексная система защиты информации, агрегированное оценивание, логико-аксиологический подход, присоединённый вывод

Цитирование: Наседкин П.Н. Оценка состояния комплексной системы защиты информации на основе онтологий / П.Н. Наседкин, Л.В. Аршинский // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 158-177. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.014.

Введение. Считается, что одна из аксиом управления гласит: «Что невозможно измерить, тем невозможно управлять» (Дж. Уэлч) [1]. В полной мере это относится к управлению системами защиты информации. Тезис Уэлча можно ещё усилить, добавив: «Управление тем лучше, чем лучше формализация», то есть, хорошая формализация системы ведёт к более эффективному управлению ею.

Информационная безопасность – важнейшая область исследований в наше время, о чем свидетельствуют многочисленные публикации на эту тему [2-5]. В частности, последние исследования посвящены вопросам, связанным с «Большими данными», облачными технологиями и электронным обучением [2, 4, 5]. В работах [6, 7] исследованы различные средства информационной безопасности, включая фактографические системы и кибербезопасность сетей связи транспортных средств. Несмотря на то, что автоматизированным средствам информационной безопасности уделяется значительное внимание [8, 9], в этой области недостаточно внимания уделяется системному анализу и системному подходу. В работе [7] на базе принципов системного анализа и системного подхода [10-13] введены необходимые частные показатели, связанные с оценкой эффективности средств ИБ и фактографических информационных систем. В работе [15] и [16] показана возможность применения системного анализа в области информационной безопасности. Для этого в [17, 18, 19, 20], рассматриваются различные затраты и показатели. Стандарт ISO/IEC TR 27016 [20] является полезным инструментом для оценки эффективности средств информационной безопасности, особенно с точки зрения их экономической и стоимостной оценки.

Сегодня существуют разные подходы к формализации. Наиболее основательная из них – математическая, описывающая количественные взаимосвязи между компонентами системы, внешней средой, целями функционирования. Однако такое возможно только для относительно простых систем, или их фрагментов. В более сложных случаях, особенно характеризующихся случайностью протекающих процессов, хорошо подходят имитационное моделирование [21, 22] и его подвид – агентное [23-25], когда специальным образом имитируется поведение системы через поведение её фрагментов (например, агентов) и их ближнее взаи-

модействие, а поведение системы в целом изучается по поведению модели. Наконец, если система слабо структурирована и трудно формализуема, а это типично для многих управленческих задач, приходится использовать качественное моделирование, например, на основе знаний [26-28], а также агрегатное моделирование, характеризующее объект в целом на основе характеристик его частей [29].

Одним из видов знаниевого моделирования является моделирование с помощью онтологий [26, 27]. Однако описать структуру системы и отношения между её частями ещё недостаточно. Полезно знать, хотя бы в общих чертах, как изменение одних составляющих повлияет на другие. Этого можно достичь, если с каждым концептом онтологии связать, например, некоторое характеризующее его число, а с каждой дугой – своего рода передаточную функцию, преобразующую изменение объекта *A* во вклад в изменение связанного с ним объекта *B*. Для сложных предметных областей взаимовлияние трудно описать исчерпывающим количественным образом, однако можно применять приближённые схемы, использующие, в том числе, экспертные оценки. Например, в [30-32] онтологии использовались как часть метода оценки качества. Агрегат качества считался традиционным образом как среднее арифметическое или среднее геометрическое взвешенное [32]. Привлекая онтологии, можно агрегировать и другие показатели и по иным расчётным схемам.

В статье рассматривается логико-аксиологический подход к агрегированному оцениванию, оперирующий понятием ценности объекта (компонента) *A* для объекта *B* как мерой убыли функциональности *B* при утрате *A* [29, 33]. Причём ценность может быть такова, что утрата первого может повлечь утрату второго, независимо от состояния других, связанных с *B*, объектов. В целом, в основе логико-аксиологического подхода лежит структурирование предметной области с помощью лёгких онтологий с последующей расстановкой и обработкой числовых показателей – ценностей и характеризующих чисел в дугах и узлах структуры (концептах предметной области) и получением итогового показателя – агрегата – в ходе присоединённого логического вывода [33]. Важной особенностью данного метода является возможность избирательно вводить понятия ключевых компонентов системы, отказ которых ведёт к её полной нефункциональности. Существование подобных компонентов (функциональных элементов и подсистем) естественно для многих предметных областей, однако популярные методы агрегирования с помощью разного рода средних эту особенность фактически не учитывают. Возможность работы с ключевыми компонентами позволяет более последовательно учесть вклад значимых компонентов в общую функциональность системы. Например, при аддитивном агрегировании по среднему арифметическому взвешенному существует эффект ничтожного влияния оценок функциональных элементов сложной иерархизированной системы на итоговый показатель [34]. Здесь этого удаётся избежать.

В работе обсуждается вопрос агрегированного оценивания указанным методом состояния комплексной системы защиты информации (КСЗИ). КСЗИ является сложной иерархической системой, что делает во многом бессмысленными, например, аддитивные подходы к оцениванию. Применения логико-аксиологического подхода выглядит в этом смысле более перспективным. Его демонстрация для данной предметной области составляет цель и новизну работы. В связи с объёмностью КСЗИ в целом, оценку рассмотрим на примере базовой части – подсистемы программно-технических решений (ПТР) [35].

1. Онтологическое моделирование уровня программно-технических решений КСЗИ предприятия. Общая структура КСЗИ предприятия представлена на рис. 1. Её частью является уровень программно-технических решений – подсистема КСЗИ, структура которой представлена на рис. 2 [35, 36].

Рассмотрим структуру подсистемы ПТР (рис. 2), база знаний о ней позволяет в виде лёгких онтологий сформировать взаимосвязи между её компонентами, которые могут быть

использованы в процессе комплексной защиты информации на любом предприятии разного уровня зрелости по информационной безопасности.

Необходимо отметить, что термины «узлы» информационной системы и «компоненты» уровня ПТР имеют разные значения и используются для обозначения разных вещей в контексте информационных систем и подсистем средств защиты информации.

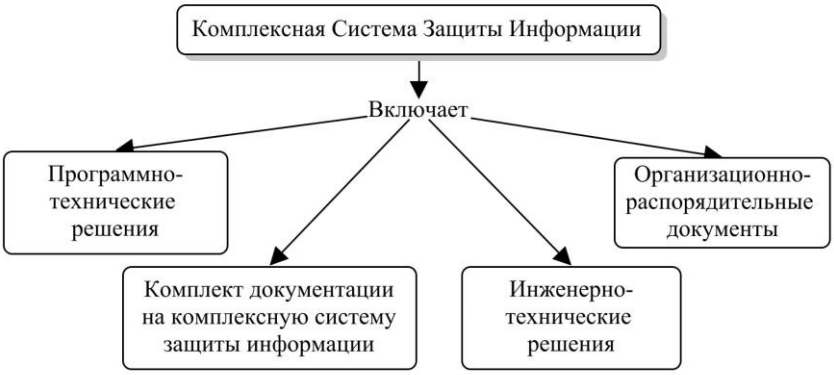


Рис. 1. Общая структура КСЗИ предприятия

В общем случае под «узлом» в информационной системе понимается любое устройство или компонент, подключенные к сети и имеющие уникальный сетевой адрес, например, компьютер, сервер или маршрутизатор. «Узлы» могут быть физическими устройствами, виртуальными машинами или программными приложениями.

С другой стороны, «компоненты» в подсистеме средств защиты информации означают отдельные части, составляющие единую систему, такие, как брандмауэры, системы обнаружения и предотвращения вторжений, антивирусное программное обеспечение, средства шифрования и механизмы контроля доступа. Эти компоненты работают вместе для защиты информационной системы от различных угроз и уязвимостей.

Таким образом, хотя и «узлы», и «компоненты» являются важными частями информационных систем и подсистем средств защиты информации, они обозначают разные вещи и играют разные роли в этих системах.

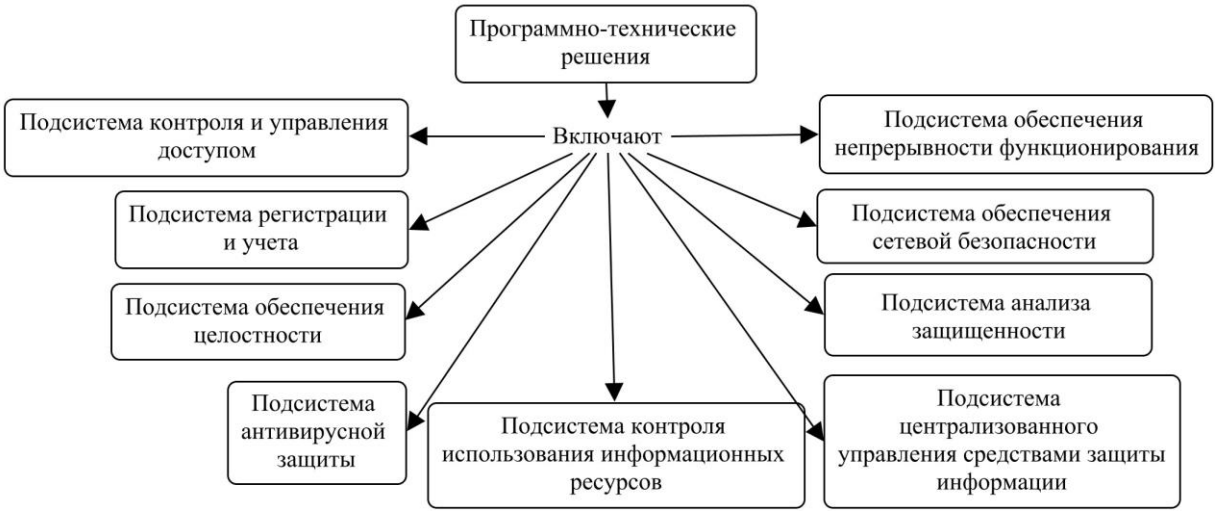


Рис. 2. Состав подсистемы программно-технических решений

Подсистема контроля и управления доступом описывается онтологией на рис. 3 [36, 37]. Здесь К1, … К15 – также сложные концепты, которые могут быть разбиты на составляющие, но ограничимся этим уровнем, рассматривая их здесь и далее в качестве своего рода функциональных элементов. Это:

- К1 – комплекс встроенных средств защиты серверов и автоматизированных рабочих машин (АРМ) под управлением операционных систем;
- К2 – комплекс антивирусной защиты;
- К3 – комплекс резервного копирования;
- К4 – комплекс защиты среды виртуализации;
- К5 – комплекс сбора, анализа и корреляции событий информационной безопасности (ИБ);
- К6 – комплекс встроенных средств активного сетевого оборудования (АСО);
- К7 – комплекс резервного копирования конфигурационных файлов АСО;
- К8 – комплекс межсетевого экранирования;
- К9 – комплекс обнаружения вторжений;
- К10 – комплекс встроенных средств защиты систем хранения данных;
- К11 – комплекс централизованного управления средствами защиты информации (СрЗИ);
- К12 – комплекс анализа защищенности;
- К13 – комплекс контроля целостности;
- К14 – комплекс встроенных средств защиты прикладного программного обеспечения (ППО);
- К15 – комплекс контроля использования информационных ресурсов.

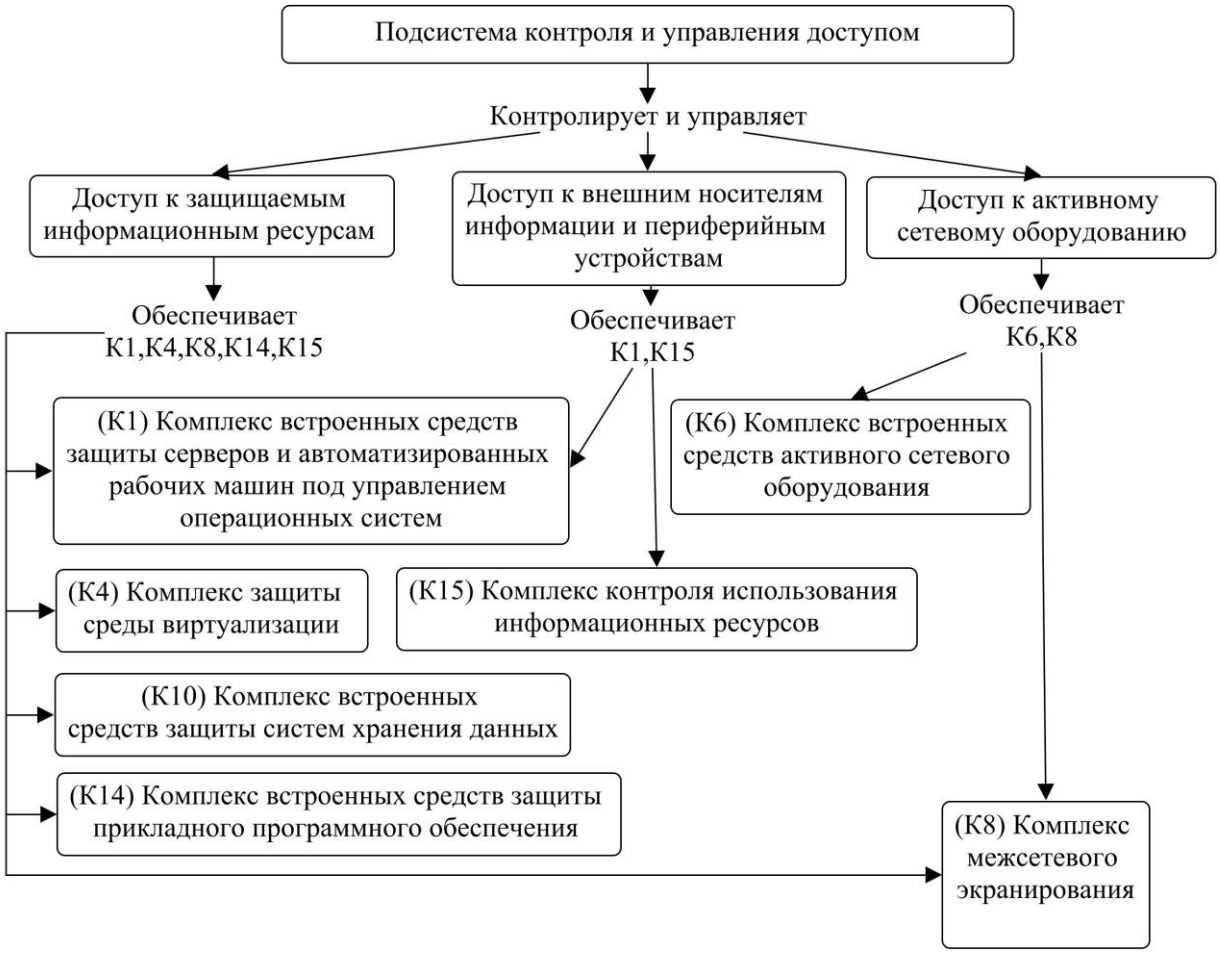


Рис. 3. Онтология подсистемы контроля и управления доступом комплекса ПТР

Подсистема контроля и управления доступом предназначена для задач [35-37]: идентификации; аутентификации; создания, активации, модификации, пересмотра (с установлен-

ной периодичностью), отключения (блокирования) и удаления учетных записей; обеспечения контроля за действиями пользователей и администраторов при доступе их к информационным активам предприятия.

В рамках данной подсистемы обеспечивается идентификация программ, томов, каталогов, файлов на АРМ и серверах.

Следующей идёт *подсистема регистрации и учёта* (рис. 4).

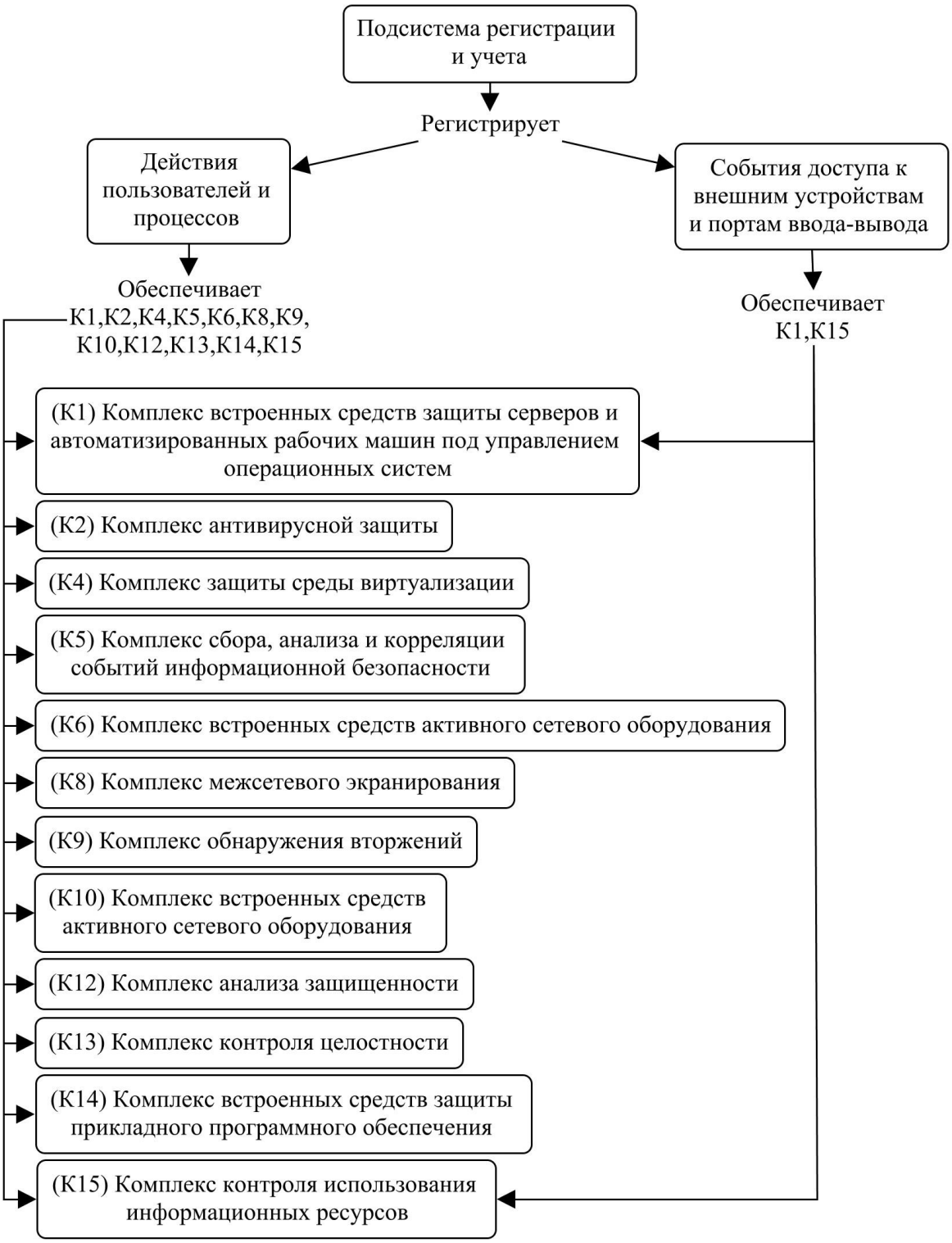


Рис. 4. Онтология подсистемы регистрации и учёта

В рамках подсистемы регистрации и учета выполняются следующие функции:

– Регистрация входа/выхода субъектов доступа (пользователей и процессов) к защищаемым информационным ресурсам (ИР), где ИР может относиться к любому источнику информации, который может быть использован для обучения, общения или принятия решений. Некоторые примеры того, что можно считать частью информационного ресурса, включают:
  - электронные документы (книги, статьи и т.п.);
  - электронный массив (базы данных и другие электронные источники информации);
  - веб-сайты;
  - аудио- и видеозаписи, включая подкасты и вебинары.

  В целом, все, что может быть использовано для сбора или передачи информации, может считаться частью информационного ресурса. Конкретные элементы, составляющие информационный ресурс, будут зависеть от контекста и цели, для которой он используется.
– Регистрация запуска и завершения программ и процессов (заданий, задач), предназначенных для обработки защищаемых файлов.
– Регистрация попыток доступа субъектов (пользователей и процессов) к защищаемым объектам доступа (файлам, каталогам).
– Регистрация событий вывода документов на печать.
– Регистрация событий доступа к внешним устройствам (внешние накопители информации), а также порты ввода-вывода на автоматизированных рабочих машинах.
– Регистрация событий информационной безопасности (ИБ) на активном сетевом оборудовании (коммутаторы, маршрутизаторы) и средствах защиты информации.
– Сбор, запись и хранение зарегистрированных событий безопасности в течение установленного времени хранения. Сбор событий ИБ должен осуществляться по протоколам (Syslog, MS Windows Event log, SSH/Telnet, СУБД с использованием ODBC, SNMP Trap, Checkpoint LEA/OPSEC, NetFlow и т.п.) с учетом функциональных возможностей источника событий):
  - обработка получаемых событий ИБ, включая: фильтрацию; нормализацию; агрегацию; категоризацию; приоритизацию; корреляцию; корреляцию событий ИБ, в т.ч.:
    - корреляцию событий ИБ на основе встроенной базы правил корреляции,
    - возможность создания собственных правил корреляции,
    - возможность использования в правилах корреляции перечня заведенных в подсистеме активов,
    - возможность использования справочников при формировании правил корреляции,
    - многоуровневую корреляцию, когда результаты срабатывания правил корреляции подаются на вход другому правилу корреляции;
  - возможность оптимизации правил корреляции с использованием новых данных об активах;
  - возможность управления задачами по сбору, обработке и корреляции событий, управления активами из единой консоли (web-интерфейса).

Подсистема обеспечения целостности показана на рис. 5. В её задачи входят:
– контроль целостности исполняемых и конфигурационных файлов СрЗИ, операционных систем (ОС);
– контроль целостности ППО;

– контроль неизменности параметров встроенных средств защиты информации, ОС, АРМ и серверов, входящих в состав ИС и АСУ ТП.

Рис. 5. Онтология подсистемы обеспечения целостности

Подсистема антивирусной защиты показана на рис. 6.

В рамках подсистемы обеспечиваются:

– постоянная защита файловой системы АРМ и серверов под управлением различных версий ОС от вирусов, троянских программ и червей, как с использованием баз вирусных описаний, так и с помощью эвристического анализа;
– потоковая защита межсетевого трафика от вирусов и вредоносных программ.

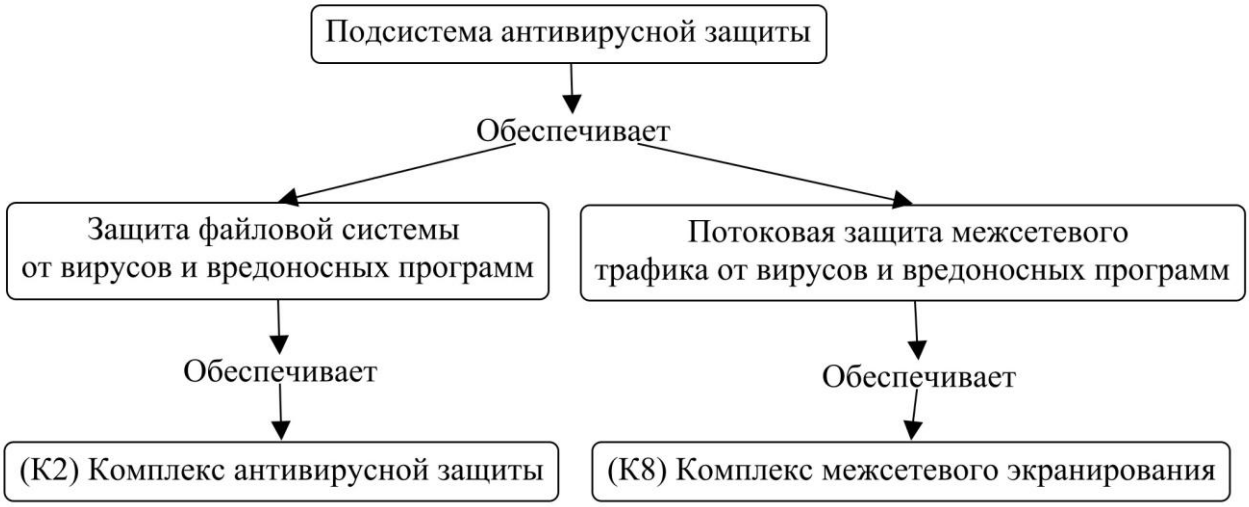


Рис. 6. Онтология подсистемы антивирусной защиты

На рис. 7 показана *подсистема контроля использования информационных ресурсов*. Несмотря на внешнюю простоту, она выполняет довольно много функций [35-37]:

– обнаружение несанкционированного хранения конфиденциальной информации в информационных ресурсах (файловые серверы, файловые хранилища, АРМ пользователей, БД);
– контроль каналов утечек защищаемой информации;
– аутентификация пользователей и формирования профилей доступа к ресурсам сети Интернет;

– расшифровка SSL (TLS) трафика средствами программного компонента на АРМ, который выполняет определенную задачу или набор задач от имени более крупной системы или приложения, часто распределенным или децентрализованным образом;
– контроль действий по отправке информации, когда программный компонент находится вне ЛВС предприятия;

Рис. 7. Онтология подсистемы контроля использования информационных ресурсов

– перехват и анализ трафика с возможностью блокировки сообщений, отправляемых с использованием корпоративной электронной почты (протокол SMTP). В контексте корпоративной электронной почты (протокол SMTP) это означает мониторинг электронных писем, отправленных и полученных сотрудниками с помощью системы электронной почты компании. Перехват и анализ трафика может включать различные методы, например, использование инструментов сетевого мониторинга, программного обеспечения для перехвата пакетов или специализированных аппаратных устройств. Эти инструменты могут перехватывать и анализировать содержание сообщений электронной почты, включая адреса отправителя и получателя, темы и текст сообщения. Кроме того, благодаря возможности блокировать сообщения, отправленные с помощью корпоративной электронной почты, система может предотвратить попадание определенных сообщений к адресатам. Эта функция обычно используется для предотвращения передачи вредоносного содержимого или конфиденциальной информации за пределы сети компании. В целом, перехват и анализ трафика с возможностью блокировки сообщений, отправляемых с использованием корпоративной электронной почты, может помочь организациям поддерживать безопасность и целостность своих систем электронной почты и предотвратить утечку данных или другие инциденты безопасности;
– перехват и анализ сообщений, отправляемых с использованием веб-сервисов (веб-почта, социальные сети, файловые Интернет-ресурсы, облачные хранилища и т.п.);
– перехват и анализ информации в системах мгновенных сообщений (ICQ, Skype, Jabber, Mail.ru);
– централизованное хранение истории инцидентов, исходных почтовых сообщений и перехваченных данных;

– автоматический разбор сообщения на составляющие на этапе приема сообщения с возможностью анализа сообщения по его атрибутам (заголовки, тело, вложения);
– создание, редактирование и удаление правил фильтрации, анализа и архивирования;
– детектирование заполненных форм – определение заполненных и незаполненных бланков документов с возможностью обнаружения в форме документа (бланке) информации, относящейся к защищаемой федеральным законом «О персональных данных» от 27.07.2006 № 152-ФЗ;
– возможность оперативного оповещения по электронной почте ответственных работников о зафиксированных событиях ИБ;
– перехват документов, отправляемых на печать (сетевые и локальные принтеры) и многое другое.

Следующей подсистемой является *подсистема централизованного управления средствами защиты информации* (СрЗИ), показанная на рис. 8.

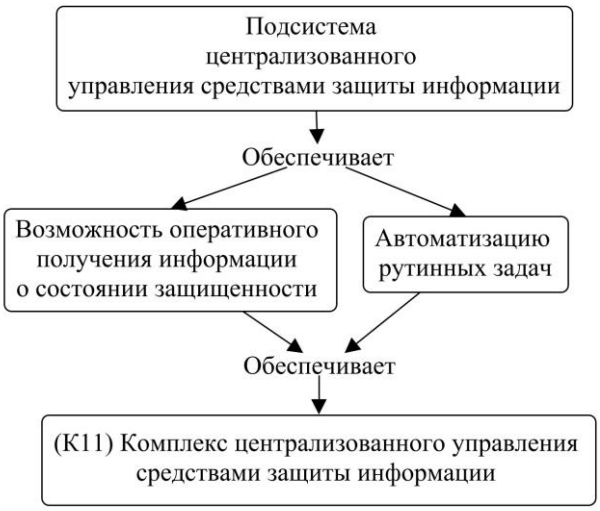


Рис. 8. Онтология подсистемы централизованного управления СрЗИ

С её помощью выполняются функции:
– обеспечение возможности оперативного получения информации о состоянии защищенности ИС и АСУ ТП;
– оперативного реагирования на инциденты ИБ;
– предоставление администраторам инструментов для выполнения функций контроля;
– управления по обеспечению ИБ и автоматизации рутинных задач.

Похожую топологию имеет онтология *подсистемы анализа защищённости* на рис. 9.

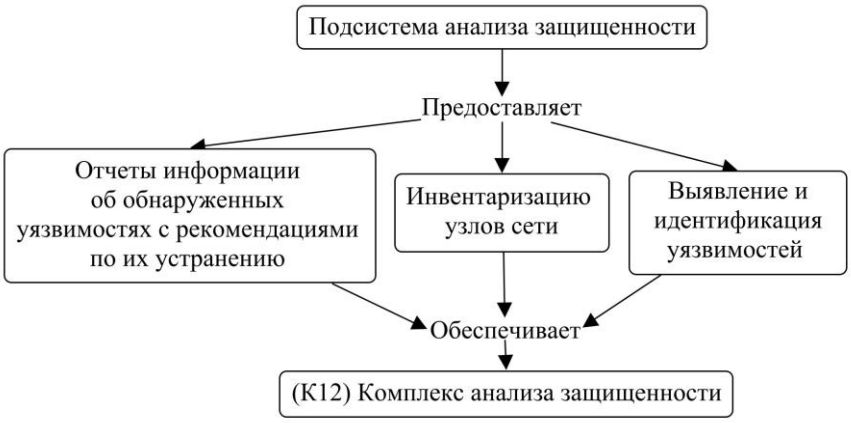


Рис. 9. Онтология подсистемы анализа защищённости

В рамках этой подсистемы (рис. 9) решаются задачи:

- обнаружение и учет защищаемых ресурсов;
- анализ защищенности компонентов ЛВС предприятия (ОС серверов ИС, АСУ ТП и СрЗИ, АСО, сетевые сервисы серверов ИС, АСУ ТП и СрЗИ, ППО);
- анализ защищенности информационных систем предприятия;
- сканирование узла ЛВС и принятие решений о соответствии или несоответствии узлов ИС и информационных систем в целом принятым на предприятии технических стандартов;
- регулярное централизованное обновление компонентов подсистемы;
- централизованное управление компонентами подсистемы и доступом пользователей к функциям подсистемы;
- генерация отчетов о результатах сканирования, а также доставка отчетов уполномоченным сотрудникам предприятия.

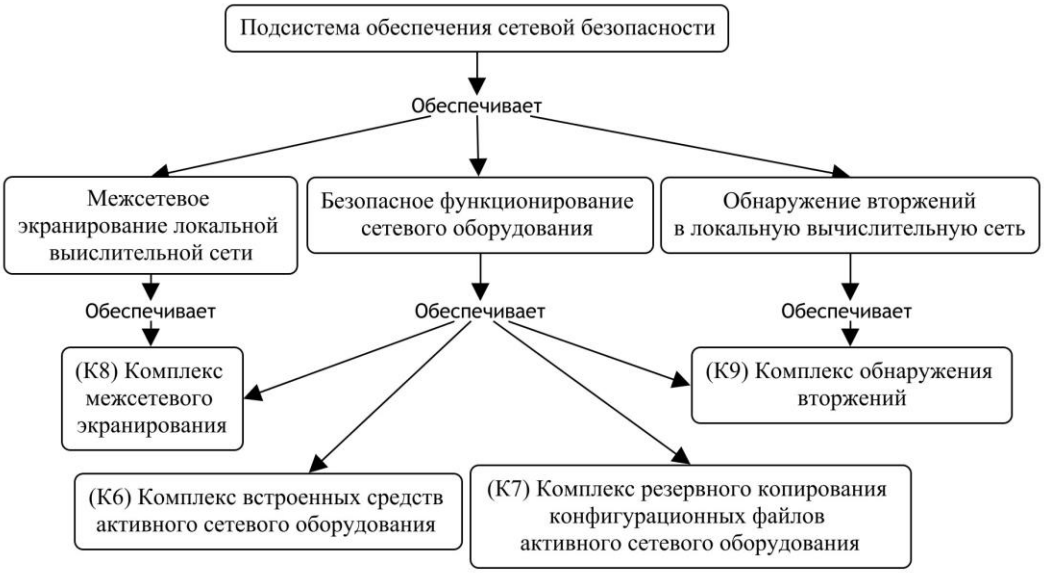


Рис. 10. Онтология подсистемы обеспечения сетевой безопасности

Последними двумя подсистемами комплекса ПТР являются *подсистема обеспечения сетевой безопасности* (рис. 10) и *подсистема обеспечения непрерывности функционирования* (рис. 11).

Первая (рис. 10) выполняет следующие функции:

- межсетевое экранирование и сегментирование ЛВС предприятия;
- обнаружение вторжений;
- централизованное управление подсистемой;
- интеграция с периметральной системой защиты информации предприятия.

Вторая (рис. 11) решает задачи:

- резервного копирования конфигурационных файлов СрЗИ и АСО и восстановления данных из резервных копий в случаях сбоев;
- хранения резервных копий;
- восстановления данных из резервных копий;
- реализации отказоустойчивой конфигурации межсетевого экрана (МЭ) и АСО.

Данная структура может быть положена в основу логико-аксиологического оценивания.

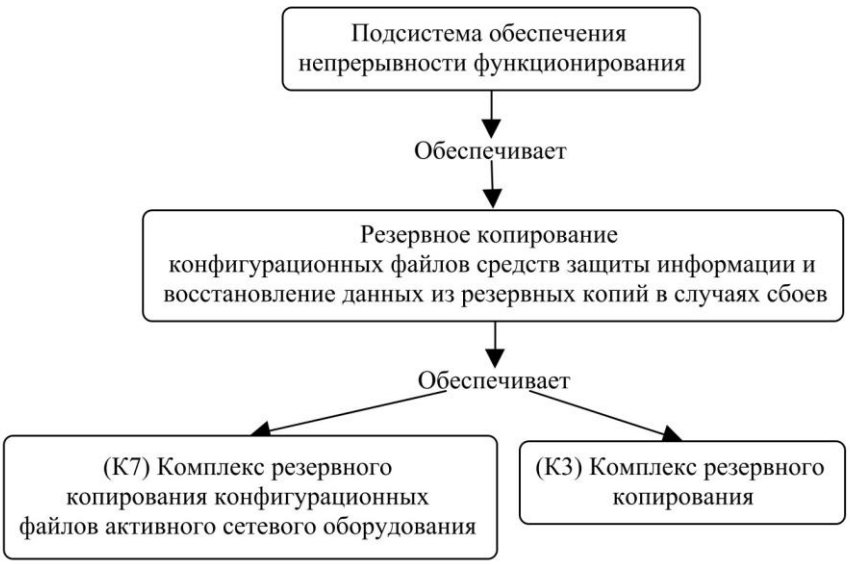


Рис. 11. Онтология подсистемы обеспечения непрерывности функционирования

2. Логико-аксиологическая оценка КСЗИ предприятия. Представленные онтологии позволяют оценить эффективность функционирования КСЗИ предприятия в разрезе комплекса ПТР. Поскольку состояние комплекса фактически определяется состояниями компонентов *K1-K15*, оценка должна выглядеть как агрегированный результат состояний этих элементов.

Известны множество подходов к агрегированию. Большинство так или иначе сводятся к некоторой функции характеризующих чисел $U(\chi_1,\ldots, \chi_n)$, где каждое характеризующее число (частный показатель) отражает состояние соответствующего компонента системы. Здесь полагаем, что $\forall i(\chi_i \in [0,1])$, где ноль означает полную неработоспособность (нефункциональность) компонента, а единица – что система полностью соответствует своему функциональному назначению. Значения из (0,1) отражают промежуточные степени такого соответствия. Для сложных иерархических систем, какой является рассматриваемая, компоненты – это функциональные элементы и образуемые ими подсистемы. Функциональными элементами здесь являются *K1-K15,* далее не углубляемся.

На практике характеризующие числа (частные показатели) $\chi_i=\chi(K_i)$ обычно задаются «аудиторами» – лицами, принимающими решения о состоянии функциональных (базовых) элементов системы. На их основе строится агрегированный показатель (агрегат), учитывающий значимость каждого компонента в системе.

Помимо значимости функциональных элементов, следует говорить и о значимости подсистем, из них образованных. Показатели значимости задаются экспертно, исходя из представлений о роли и месте того или иного компонента в общей функциональности системы.

Как следует из рис. 1-11, итоговый агрегат строится иерархически, согласно иерархии системы, причём некоторые компоненты входят более чем в одну подсистему, что также следует учитывать.

Чаще всего при агрегировании пользуются аддитивными функциями наподобие среднего арифметического взвешенного, где вес каждого слагаемого отражает значимость компонента. Однако аддитивность не позволяет учесть действительную роль компонентов в системе. Отказ или отсутствие некоторых из них может драматически снижать общую функциональность системы вплоть до её полного «обнуления». Среднее арифметическое не моделирует эту ситуацию в принципе. Другая популярная функция агрегирования – среднее геометрическое (среднее геометрическое взвешенное). Здесь, наоборот, нефункциональность каж-

дого компонента означает нефункциональность системы в целом, что также редко отвечает действительности. Примеры можно посмотреть в [33, 38, 39].

Для такого рода случаев в [40] был предложен логико-аксиологический подход к оцениванию, позволяющий более тонко учитывать роль и значимость компонентов. Он опирается на понятие ценности компонента-потомка (субкомпонента) для компонента-родителя (надкомпонента). Под ценностью понимается мера убыли функциональности надкомпонента при утрате его потомка. Ценность здесь играет роль «значимости». Количественно её можно рассматривать как величину уменьшения характеризующего числа надкомпонента при обнулении характеризующего числа потомка [29, 40]. Ценности могут задаваться экспертно.

Понятно, что такая модель не отражает всех особенностей системы, однако «физически» она может быть более адекватной, чем вышеозначенные способы. В известном смысле её можно рассматривать как промежуточную между грубой качественной моделью и точным описанием системы традиционными уравнениями.

Логико-аксиологическая модель строится как множество нечётких продукций вида:

$$\neg a_i \to \neg b\,, \tag{1}$$

где $\neg a_i$ – утверждение об утрате компонента-потомка, $\neg b$ – о результирующей нефункциональности компонента-родителя. Истинность продукции: $\|\neg a_i \to \neg b\|$ отражает степень снижения функциональности родителя при утрате потомка с точки зрения эксперта, то есть, роль и место i-го субкомпонента в этом фрагменте иерархии. Если $\|\neg a_i \to \neg b\| = 1$, утрата субкомпонента i влечёт утрату родительского компонента (i-й компонент ключевой). Если $\|\neg a_i \to \neg b\| = 0$, утрата потомка на надкомпонент не влияет (это возможно, к примеру, при холодном резервировании). Очевидно, что такая модель естественным образом реализуется с использованием технологии экспертных систем.

Расчёт агрегата для надкомпонента выполняется как набор элементов вывода:

$$\neg a_1, \neg a_1 \to \neg b \vdash \neg b : \|\neg b\|_1 = \|\neg a_1\| \bullet \|\neg a_1 \to \neg b\|;$$
$$\dots$$
$$\neg a_n, \neg a_n \to \neg b \vdash \neg b : \|\neg b\|_n = \|\neg a_n\| \bullet \|\neg a_n \to \neg b\|.$$

Через двоеточие указана схема расчёта истинности заключения на основе истинностей посылок. Символ $\bullet$ – треугольная (триангулированная) норма в инфиксной записи. Истинность $\|\neg a_i\|$ отражает степень снижения функциональности i-го субкомпонента. Если $\|\neg a_i\| = 0$ – субкомпонент «исправен», если $\|\neg a_i\| = 1$ – полностью неработоспособен или отсутствует.

Агрегирование на этом этапе выполняется как объединение свидетельств:

$$\|\neg b\| = \|\neg b\|_1 \oplus \dots \oplus \|\neg b\|_n,$$

где $\oplus$ – треугольная ко-норма в инфиксной записи. Именно при таком объединении не функционирующий ключевой субкомпонент обеспечивает нефункциональность надкомпонента, в который он входит. Объединяя эти шаги, схему вывода можно представить, как:

$$\frac{\begin{array}{c}\neg a_1, \neg a_1 \to \neg b \vdash \neg b : \|\neg b\|_1 = \|\neg a_1\| \bullet \|\neg a_1 \to \neg b\|; \\ \dots \\ \neg a_n, \neg a_n \to \neg b \vdash \neg b : \|\neg b\|_n = \|\neg a_n\| \bullet \|\neg a_n \to \neg b\|;\end{array}}{\neg b : \|\neg b\| = \|\neg b\|_1 \oplus \dots \oplus \|\neg b\|_n\,.} \tag{2}$$

Результат каждого агрегирования следует нормировать на величину $\| \neg b \|_{\max} = \| \neg a_1 \to \neg b \| \oplus ... \oplus \| \neg a_n \to \neg b \|$: отказ всех субкомпонентов приводит к отказу надкомпонента в целом.

Истинность утверждения b о функциональности надкомпонента вычисляем традиционным образом:

$$\| b \| = 1 - \| \neg b \| .$$

Вывод стартует от функциональных элементов – комплексов *K1-K15*. Значения истинности утверждений об их соответствии функциональному назначению (характеризующие числа компонентов) выставляются аудиторами.

Характеризующие числа надкомпонентов (истинности утверждений об их соответствии функциональному назначению) рассчитываются согласно (2). Эти надкомпоненты становятся субкомпонентами уже для своих надкомпонентов и участвуют в выводе на следующем уровне иерархии, и так далее, до характеризующего числа системы в целом – истинности утверждения о её соответствии целевому назначению.

Необходимо заметить, что описанный подход к оцениванию естественным образом ложится на технологию экспертных систем. Продукции вида (1) составляют базу знаний, а процедура (2) реализуется с помощью машины вывода. Это позволяет менять алгоритм расчёта без программирования, редактируя только базу знаний. Учитывая, что КСЗИ – динамическая система, которая может дополняться и изменяться, это позволяет гибко перестраивать расчёт при появлении или удалении тех или иных компонентов.

3. Пример расчёта. Приведём пример расчёта. За основу возьмём подсистему обеспечения сетевой безопасности (ПОСБ) (рис. 10). Она состоит из трёх подсистем: «Межсетевое экранирование ЛВС» (МСЭ); «Безопасное функционирование сетевого оборудования» (БФСО); «Обнаружение вторжений в ЛВС» (ОВ). С ними связаны продукции:

¬(*МСЭ отвечает своему функциональному назначению*)→ ¬(*ПОСБ отвечает своему функциональному назначению*);
¬(*БФСО отвечает своему функциональному назначению*)→ ¬(*ПОСБ отвечает своему функциональному назначению*);
¬(*ОВ отвечает своему функциональному назначению*)→ ¬(*ПОСБ отвечает своему функциональному назначению*).

С подсистемами второго уровня связаны продукции:

¬(*К8 отвечает своему функциональному назначению*)→ ¬(*МСЭ отвечает своему функциональному назначению*);
¬(*К8 отвечает своему функциональному назначению*)→ ¬(*БФСО отвечает своему функциональному назначению*);
¬(*К6 отвечает своему функциональному назначению*)→ ¬(*БФСО отвечает своему функциональному назначению*);
¬(*К7 отвечает своему функциональному назначению*)→ ¬(*БФСО отвечает своему функциональному назначению*);
¬(*К9 отвечает своему функциональному назначению*)→ ¬(*БФСО отвечает своему функциональному назначению*);
¬(*К9 отвечает своему функциональному назначению*)→ ¬(*ОВ отвечает своему функциональному назначению*).

Зададим истинности продукций (истинности задаются экспертами, здесь они условны):

||¬*МСЭ*→ ¬*ПОСБ*|| = 0.5;
||¬*БФСО*→ ¬*ПОСБ*|| = 0.6;

$$||\neg ОВ \to \neg ПОСБ|| = 0.7.$$
$$||\neg К8 \to \neg МСЭ|| = 1.0;$$
$$||\neg К8 \to \neg БФСО|| = 0.5;$$
$$||\neg К6 \to \neg БФСО|| = 0.6;$$
$$||\neg К7 \to \neg БФСО|| = 0.7;$$
$$||\neg К9 \to \neg БФСО|| = 0.8;$$
$$||\neg К9 \to \neg ОВ|| = 1.0.$$

Единичные значения связаны с тем, что соответствующий функциональный элемент единственный, а значит, его утрата повлечёт утрату соответствующей подсистемы. Остальные значения произвольны.

Пусть, далее, аудиторы выставили оценки функциональным элементам: $||К6|| = 0.6$, $||К7|| = 0.7$, $||К8|| = 0.8$, $||К9|| = 0.9$. Соответственно, для подсистемы *МСЭ* согласно (1) получаем:

$$\neg К8, \neg К8 \to \neg МСЭ \vdash \neg МСЭ: ||\neg МСЭ|| = ||\neg К8|| \bullet ||\neg К8 \to \neg МСЭ|| = 0.2.$$

Нормирование даёт ту же величину $||\neg МСЭ|| = 0.2$.
Субкомпонент у *МСЭ* единственный, агрегировать нечего. Здесь и далее для простоты в качестве *t* и *s*-норм взяты функции, соответственно, $x \bullet y = \min(x,y)$, $x \oplus y = \max(x,y)$.

Аналогично для ОВ:

$$\neg К9, \neg К9 \to \neg ОВ \vdash \neg ОВ: ||\neg ОВ|| = ||\neg К9|| \bullet ||\neg К9 \to \neg ОВ|| = 0.1.$$

Для *БФСО* агрегирование необходимо:

$$\neg К8, \neg К8 \to \neg БФСО \vdash \neg БФСО: ||\neg БФСО||_1 = ||\neg К8|| \bullet ||\neg К8 \to \neg БФСО|| = 0.2;$$
$$\neg К6, \neg К6 \to \neg БФСО \vdash \neg БФСО: ||\neg БФСО||_2 = ||\neg К6|| \bullet ||\neg К6 \to \neg БФСО|| = 0.4;$$
$$\neg К7, \neg К7 \to \neg БФСО \vdash \neg БФСО: ||\neg БФСО||_3 = ||\neg К7|| \bullet ||\neg К7 \to \neg БФСО|| = 0.3;$$
$$\underline{\neg К9, \neg К9 \to \neg БФСО \vdash \neg БФСО: ||\neg БФСО||_4 = ||\neg К9|| \bullet ||\neg К9 \to \neg БФСО|| = 0.1;}$$
$$||\neg БФСО|| = \max(0.2, 0.4, 0.3, 0.1) = 0.4.$$

Нормирование даёт $||\neg БФСО|| = 0.4/\max(0.5, 0.6, 0.7, 0.8) = 0.5$.
Наконец, для *ПОСБ* получаем:

$$\neg МСЭ, \neg МСЭ \to \neg ПОСБ \vdash \neg ПОСБ: ||\neg ПОСБ||_1 = ||\neg МСЭ|| \bullet ||\neg МСЭ \to \neg ПОСБ|| = 0.2;$$
$$\neg БФСО, \neg МСЭ \to \neg ПОСБ \vdash \neg ПОСБ: ||\neg ПОСБ||_2 = ||\neg БФСО|| \bullet ||\neg БФСО \to \neg ПОСБ|| = 0.5;$$
$$\underline{\neg ОВ, \neg МСЭ \to \neg ПОСБ \vdash \neg ПОСБ: ||\neg ПОСБ||_3 = ||\neg ОВ|| \bullet ||\neg ОВ \to \neg ПОСБ|| = 0.1;}$$
$$||\neg ПОСБ|| = \max(0.2, 0.5, 0.1) = 0.5$$

Или, после нормирования, $||\neg ПОСБ|| = 0.5/\max(0.5, 0.6, 0.7) \cong 0.7$.

Отсюда уже можно получить меру функциональности *ПОСБ* как $||ПОСБ|| = 1 - ||\neg ПОСБ||$, однако в силу нелинейности законов агрегирования (в общем случае) в расчёт вводится процедура калибровки функции агрегирования, обеспечивающая равномерное (линейное) изменение величины агрегата при равномерном же и одинаковом изменении характеризующих чисел функциональных элементов [41]. Окончательно получаем: $||ПОСБ|| = 0.74$, или 74 балла из 100.

Расчёт проведён с помощью программной системы «лАос 2.X» [42].

Это и будет агрегированная оценка функциональности подсистемы обеспечения сетевой безопасности по введённым данным.

Для подсистемы ПТР (рис. 2) выполняется агрегирование по её подсистемам, куда входит и ПОСБ. Для КСЗИ в целом – такая же процедура агрегирования по всему комплексу соответствующих подсистем.

Заключение. Подытоживая, можно сделать следующие выводы.

1. Для определения степени соответствия системы своему функциональному назначению (с последующими управленческими решениями) могут использоваться агрегированные оценки, зависящие от состояния компонентов системы, в первую очередь – её функциональных элементов. Такой подход можно назвать агрегатным моделированием.

2. Агрегатное моделирование помогает получить числовые оценки функциональности системы в условиях, когда трудно или невозможно составить для неё полноценную математическую модель, описывающую её поведение.

3. Агрегатные модели могут быть разными. Наиболее популярными сегодня является агрегирование на основе взвешенного среднего, реже – среднего геометрического или гармонического. Однако такие модели неспособны полноценно отразить значимость каждого компонента системы для её функционирования, в частности, наличие отдельных ключевых компонентов, нефункциональность которых ведёт к нефункциональности системы в целом, а также компонентов, близких к таковым.

4. Одним из подходов, лишённых этого недостатка, является логико-аксиологический подход, естественным образом ложащийся на технологию экспертных систем и нечёткого вывода. Это позволяет, в частности, перенастраивать расчёт агрегата без программирования, путём простого редактирования базы знаний.

5. Первым шагом к использованию метода является онтологическое моделирование, описывающее компоненты системы и их структурные взаимосвязи. На втором шаге онтологическая модель превращается в продукционную базу знаний с нечёткими продукциями вида $\neg a_i \to \neg b$. Истинность продукции со значениями из интервала [0,1] показывает степень значимости компонента a_i для компонента b. Чем выше это значение, тем сильнее падает функциональность b при утрате a_i (выше ценность a_i для b). Ценность – это мера необходимости a_i для b.

6. Итоговый агрегат получается в ходе присоединённого логического вывода с дополнительными этапами нормировки и калибровки результатов, что продемонстрировано для подсистемы обеспечения сетевой безопасности КСЗИ предприятия.

7. Метод можно применить для КСЗИ в целом. Ценности в нём задаются экспертно или по иным соображениям. Итоговый агрегат получается путём аудиторского оценивания состояния функциональных элементов с последующим расчётом агрегата по описанной схеме. При этом для корректного сравнения различных КСЗИ ценности должны задаваться единообразно. Выбор функции агрегирования позволяет более тонко отразить особенности совместной работы компонентов. В примере представлен пессимативный подход, когда суммарная функциональность субкомпонентов определяется наихудшим из них.

Список источников

1. Цитаты Джона Уэлча. – URL: https://citaty.su/citaty-dzhona-uelcha.
2. Miloslavskaya N. Security intelligence centers for big data processing. 5th International conference on future internet of things and cloud Workshops (FiCloudW), Prague, Czech Republic, 2017, p. 7, 13, DOI:10.1109/FiCloudW.2017.68.
3. Miloslavskaya N. Security operations centers for information security incident management. Proceedings of the 4th international conference Future internet of things and cloud (FiCloud 2016). Vienna (Austria), 2016, p. 131-138, DOI: 10.1109/FiCloud.2016.26.
4. Melnikov D., Petrov V., Miloslavskaya N., Durakovskiy A., Kondratieva T. Cybertrust in E-learning environment based on network time synchronization. Proceedings of the 8th international conference on Computer supported education (CSEDU 2016), Rome (Italy), p. 402-407, DOI: 10.5220/0005874904020407.
5. Durakovskiy A.P., Melnikov D.A., Gorbatov V.S., Ivanenko V.G., Modestov A.A. Russian model of public keys and validation infrastructure as base of the cloud trust. Proceedings - 2016 IEEE 4th International conference on Future Internet of Things and Cloud, FiCloud 2016, p. 123-130, DOI: 10.1109/FiCloud.2016.25.

6. Кулик С.Д. Специальные средства для обеспечения информационной безопасности / С.Д. Кулик // Безопасность информационных технологий, 2015. – [S.l]. – Т. 22. – №. 2. – ISSN 2074-7136. – URL: https://bit.mephi.ru/ index.php /bit/article/view/114 (дата обращения: 20.02.2023).
7. Кулик С.Д. Обеспечение информационной безопасности и фактографические системы / С.Д. Кулик// Безопасность информационных технологий, 2015. – [S.l.]. – Т. 22. – №. 1. – ISSN 2074-7136. – URL: https://bit.mephi.ru/ index.php/bit/article/view/199 (дата обращения: 20.02.2023).
8. Зегжда П.Д. Применение рядов смежности для распознавания предфрактальных графов при оценке кибербезопасности VANET-сетей / П.Д. Зегжда, Д.В. Иванов, Д.А. Москвин, А.А. Иванов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы, 2018. – № 1. – С. 10-26.
9. Зегжда Д.П. Обеспечение киберустойчивости программно-конфигурируемых сетей на основе ситуационного управления / Д.П. Зегжда, Е.Ю. Павленко // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы, 2018. – № 1. – С. 160-168.
10. Волкова В.Н. Системный анализ информационных комплексов / В.Н. Волкова. – СПб.: Лань, 2016. – С. 336.
11. Воронов М.В. Введение с системный анализ / М.В. Воронов. – Тирасполь: Полиграфист, 2011. – С. 224.
12. Артюхин Г.А. Теория систем и системный анализ. Практикум принятия решений / Г.А. Артюхин. – Казань: КГАСУ, 2016. – С. 165.
13. Ермак В.Д. Системы. Системные принципы. Системный подход / В.Д. Ермак // Соционика, 1997. – № 2. – URL: http://socionicasys.org/biblioteka/statji/sistemnij-podhod. (дата обращения: 20.02.2023).
14. Кулик С.Д. Последовательный анализ и нейронные сети в фактографических информационных системах / С.Д. Кулик //Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2018. – № 9. – С. 53-60.
15. Соколов А.В. Информационно-поисковые системы / / А.В Соколов. – М.: Радио и связь, 1981. – С. 152.
16. Кулик С.Д. Нейросетевые алгоритмы и автоматизированные фактографические информационные системы / С.Д. Кулик //Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2015. – № 12. – С. 58-65.
17. Безсонов Н.В. Методическое пособие для расчета экономического эффекта от использования изобретений и рационализаторских предложений (инструктивно-методические). – М.: ВНИИПИ, 1985. – 104 с.
18. Кулик С.Д. Исследование эффективности фактографического поиска в информационных системах / С.Д. Кулик. – Изд. Радиотехника, 2004. – №1326-В2004. – Библ. Указат. №9(391). – 251 с.
19. ISO/IEC TR 27016 Information technology - Security techniques - Information security management - Organizational economics (ISO/IEC TR 27016:2014).
20. Мирсанова О.А. К вопросу об оценке эффективности затрат на информационную безопасность / О.А. Мирсанова. – URL:https://www.academia.edu/18137465/ (дата обращения: 20.02.2023).
21. Лычкина Н.Н. Имитационное моделирование экономических процессов. Учебное пособие для слушателей программы eMBI / Н.Н. Лычкина. – М.: Академия АйТи, 2005. – 164 с.
22. Эленберг М.С. Имитационное моделирование: учеб пособие / М.С. Эленберг, Н.С. Цыганков. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – 128 с.
23. Борщёв А. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика / А. Борщёв // Exponenta PRO, 2004. #3-4(7-8). – С. 38-47.
24. Каталевский Д.Ю. Системная динамика и агентное моделирование: необходимость комбинированного подхода. – URL: https://www.anylogic.ru/upload/iblock/740/ 7408de9e68d2dd7a8f40eac1899f9cf4.pdf.
25. Улыбин А.В. Мультиагентный подход в имитационном моделировании / А.В. Улыбин, А.А. Арзамасцев // Вестник ТГУ, 2010. –Т. 15. –Вып.5. – С. 1470-1471.
26. Массель Л.В. Применение онтологического, когнитивного и событийного моделирования для анализа развития и последствий чрезвычайных ситуаций в энергетике / Л.В. Массель // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2010. – №2. – С. 34-43.
27. Смирнов С.В. Онтологии как смысловые модели / С.В. Смирнов // Онтология проектирования, 2013. – № 2. – С.12-19.
28. Боярский К.К. Концептуальные модели в базах знаний // К.К. Боярский, Е.А. Каневский, Г.В. Лезин. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualnye-modeli-v-bazah-znaniy/viewer.
29. Аршинский Л.В. Необходимость и достаточность при агрегировании на основе неубывающих функций / Л.В. Аршинский, В.Л. Аршинский // Онтология проектирования, 2022. – Т. 12. – №1. – С.93-105. DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-1-93-105.
30. Дорофеев Р.С. Совместное использование методологий квалиметрической экспертизы и онтологии для оценки качества технологий изготовления изделий / Р.С. Дорофеев, С.С. Сосинская // Информационные и математические технологии в науке и управлении: Сб. трудов XVI Байкальской всерос. конференции. Ч. 2. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2010. – С. 138-145.

31. Дорофеев Р.С. Методология и программная реализация совместного использования онтологии и квалиметрической экспертизы при оценке качества станков / Р.С. Дорофеев // Вестник ИрГТУ, 2013. – №3. – С. 16-23.
32. Сосинская, С.С. Разработка системы для расчёта рейтинга преподавателей на основе квалиметрического подхода и онтологии / С.С. Сосинская, Р.С. Дорофеев, А.С. Дорофеев // Онтология проектирования. – 2019. – Т.9. – №2(32). – С.214-224. – DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9- 2-214-224.
33. Азгальдов Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии) / Г.Г. Азгальдов. – М.: Экономика, 1982. – 256 с.
34. Абрамова Н.А. О некоторых мифах в оценке качества программного обеспечения / Н.А. Абрамова // Надежность, 2004. – №1.– С.38-63.
35. Глухов Н.И. Разработка элементов комплексной системы защиты информации предприятия / Н.И. Глухов, П.Н. Наседкин // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами, 2021. – № 1 (9). – С. 35-42.
36. Наседкин, П.Н. Применение нечёткого присоединённого логического вывода в оценке эффективности функционирования комплексной системы защиты информации предприятий / П.Н. Наседкин, Л.В. Аршинский, Н.И. Глухов // Теоретические и прикладные вопросы реализации проектов в области информационной безопасности: Материалы межвузовской научно-теоретической конференции (в рамках Сибирского форума «Информационная безопасность – 2021»). – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2021. – С. 42-52.
37. Наседкин П.Н. Анализ востребованности компонентов уровня программно-технических решений КСЗИ предприятия с точки зрения обеспечения базовых требований по информационной безопасности / П.Н. Наседкин // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами, 2022. – № 2(14). – С. 50-64. – DOI 10.26731/2658-3704.2022.2(14).50-64.
38. ГОСТ 28195-89. Оценка качества программных средств. Общие положения / Межгосударственный стандарт. – М: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 30 с.
39. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия термины и определения / Межгосударственный стандарт. – М: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 22 с.
40. Аршинский Л.В. Логико-аксиологический подход к оценке состояния систем / Л.В. Аршинский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, 2013. – № 3(39). – С. 140-146.
41. Аршинский Л.В. Методика экспертного оценивания качества функционирования производственно-экономических систем на основе знаниевых технологий / Л.В. Аршинский, В.Л. Аршинский, Х. Доржсурэн // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2018. – Том 22. –№ 3. – С. 63-78.
42. Аршинский Л.В. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ «лАос 2.Х». Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02 ноября 2016 г. Свидетельство № 2016662218.

Наседкин Павел Николаевич. *Старший преподаватель, аспирант кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения, Author ID: 1066448; SPIN: 8365-9541, nasedkin_pn@irgups.ru, Россия, Иркутск, Чернышевского, 15.*

Аршинский Леонид Вадимович. *Д.т.н., доцент, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения, Author ID: 520252; SPIN: 9286-4084; ORCID: 0000-0001-5135-7921, larsh@mail.ru, Россия, Иркутск, Чернышевского, 15.*

UDC 004.056.5+004.89
DOI: 10.38028/ESI.2023.29.1.014

Assessment of the state of an integrated information security system based on ontologies

Pavel N. Nasedkin, Leonid V. Arshinskiy
Irkutsk State Transport University, Russia, Irkutsk, *nasedkin_pn@irgups.ru*

Abstract. One of the problems of organizing an information security system is to evaluate the functionality of the system as a whole. Approaches based on aggregated estimation can be used to solve such problems. Currently, such estimates are usually based on weighted averages, which does not allow modeling the concept of a key component of the system, that is, one whose loss leads to the non-functionality of the system as a whole or its individual subsystems. The paper shows an approach to the aggregated evaluation of the subsystem of software and technical solutions of the enterprise's integrated information security system based on the method of logical-axiological evaluation. A necessary part of such an assessment is the ontological modeling of the system by means of light ontologies reflecting the relationships between the components. Ontologies are constructed and an example of calculation for one of the subsystems is given.

Keywords: information security, integrated information security system, aggregated assessment, logical-axiological approach, attached inference

References

1. Citaty Johna Welcha [Quotes by John Welch]. Available at: https://citaty.su/citaty-dzhona-uelcha/.
2. Miloslavskaya N. Security intelligence centers for big data processing. 5th International conference on future internet of things and cloud Workshops (FiCloudW), Prague, Czech Republic, 2017, p. 7, 13, DOI:10.1109/FiCloudW.2017.68.
3. Miloslavskaya N. Security operations centers for information security incident management. Proceedings of the 4th international conference Future internet of things and cloud (FiCloud 2016). Vienna (Austria), 2016, p. 131-138, DOI: 10.1109/FiCloud.2016.26.
4. Melnikov D., Petrov V., Miloslavskaya N., Durakovskiy A., Kondratieva T. Cybertrust in E-learning environment based on network time synchronization. Proceedings of the 8th international conference on Computer supported education (CSEDU 2016), Rome (Italy), p. 402-407, DOI: 10.5220/0005874904020407.
5. Durakovskiy A.P., Melnikov D.A., Gorbatov V.S., Ivanenko V.G., Modestov A.A. Russian model of public keys and validation infrastructure as base of the cloud trust. Proceedings - 2016 IEEE 4th International conference on Future Internet of Things and Cloud, FiCloud 2016, p. 123-130, DOI: 10.1109/FiCloud.2016.25.
6. Kulik S.D. Spetsial'nyye sredstva dlya obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti [Special tools for ensuring information security]. Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy [Security of information technologies], 2015, [S.l], v. 22, no. 2, ISSN 2074-7136, available at: https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/114. (accessed: 02/20/2023).
7. Kulik S.D. Obespecheniye informatsionnoy bezopasnosti i faktograficheskiye sistemy [Ensuring Information Security and Factographic Systems]. Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy[Security of information technologies], 2015, [S.l], v. 22, no. 1, ISSN 2074-7136, available at: https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/199 (accessed: 02/20/2023).
8. Zegzhda P.D., Ivanov D.V., Moskvin D.A., Ivanov A.A. Primeneniye ryadov smezhnosti dlya raspoznavaniya predfraktal'nykh grafov pri otsenke ki-berbezopasnosti VANET-setey [Appliance of contiguity sequences for recognition of self-similar graphs for assessing VANET networks cybersecurity]. Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternyye sistemy [Information Security Problems. Computer Systems], 2018, no.1, pp. 10 - 26. (in Russian).
9. Zegzhda D.P., Pavlenko E.Y. Obespecheniye kiberustoychivosti programmno-konfiguriruyemykh setey na osnove situatsi-onnogo upravleniya [Situational management for cyber-sustainability of software-defined networks]. Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternyye sistemy [Information Security Problems. Computer Systems], 2018, no.1, pp. 160 - 168. (in Russian).
10. Volkova V.N. Sistemnyy analiz informatsionnykh kompleksov[System analysis of information systems]. SPb., Lan', 2016. P. 336. (in Russian).
11. Voronov M.V. Vvedeniye s sistemnyy analiz [Introduction with system analysis]. Tiraspol, Poligrafist [Polygraphist], 2011, pp. 224. (in Russian).
12. Artyukhin G.A. Teoriya sistem i sistemnyy analiz. Praktikum prinyatiya resheniy [System theory and system analysis. Practical decision making]. Kazan': KGASU, 2016, pp. 165. (in Russian).

13. Ermak V.D. Sistemy. Sistemnyye printsipy. Sistemnyy podkhod [Systems. System principles. System Approach]. Sotsionika [Socionics], 1997, no. 2, URL: http://socionicasys.org/ biblioteka/ statji/sistemnij-podhod. (accessed: 02/20/2023). (in Russian).
14. Kulik S.D. Posledovatel'nyy analiz i neyronnyye seti v faktograficheskikh informatsionnykh sistemakh [Sequential analysis and neural networks in factographic information systems], Neyrokomp'yutery: razrabotka, primeneniye [Neurocomputers: development, application], 2018, no.9, pp.53-60 (in Russian).
15. Sokolov A.V. Informatsionno-poiskovyye sistemy [Information retrieval systems]. M.,Radio i svyaz' [Radio and communication], 1981, pp. 152 (in Russian).
16. Kulik S.D. Neyrosetevyye algoritmy i avtomatizirovannyye faktograficheskiye informatsionnyye sistemy[Neural network algorithms and automated factographic information systems]. Neyrokomp'yutery: razrabotka, primeneniye [Neurocomputers], 2015, no.12, pp. 58 - 65 (in Russian).
17. Bezsonov N.V. Metodicheskoye posobiye dlya rascheta ekonomicheskogo effekta ot ispol'zovaniya izobreteniy i ratsionalizatorskikh predlozheniy (instruktivno-metodicheskiye) [Methodological manual for calculating the economic effect of the use of inventions and rationalization proposals (instructive and methodical)]. M., VNIIPI, 1985, 104 p. (in Russian).
18. Kulik S.D. Issledovaniye effektivnosti faktograficheskogo poiska v informatsionnykh sistemakh [Research of the effectiveness of factographic search in information systems]. Izd. Radiotekhnika Ed. Radiotekhnika [Ed. Radio engineering], 2004, no. 1326-B2004, Bibl. Ukazat. №9 (391), M., VINITI, 251 p. (in Russian).
19. ISO/IEC TR 27016 Information technology - Security techniques - Information security management - Organizational economics (ISO/IEC TR 27016:2014).
20. Mirsanova O.A. K voprosu ob otsenke effektivnosti zatrat na informatsionnuyu bezopasnost' [On the issue of evaluating the effectiveness of information security costs], available at: https://www.academia.edu/18137465/ (accessed: 02/20/2023) (in Russian).
21. Lychkina N.N. Imitacionnoe modelirovanie ekonomicheskih processov. Uchebnoe posobie dlya slushatelej programmy eMBI [Simulation modeling of economic processes. Textbook for students of the eMBI program]. Moscow: Akademiya AjTi [IT Academy], 2005, 164 p.
22. Elenberg M.S., Tsygankov N.S. Imitacionnoe modelirovanie: ucheb posobie [Simulation modeling: textbook]. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t. [Siberian Federal University], 2017, 128 p.
23. Borshchyov A. Prakticheskoe agentnoe modelirovanie i ego mesto v arsenale analitika [Practical agent modeling and its place in the analyst's arsenal]. Exponenta PRO [Exponenta PRO], 2004, #3-4(7-8), pp. 38-47.
24. Katalevskij D.Yu. Sistemnaya dinamika i agentnoe modelirovanie: neobhodimost' kombinirovannogo podhoda [System dynamics and agent modeling: the need for a combined approach], available at: https://www.anylogic.ru/upload/iblock/740/ 7408de9e68d2dd7a8f40eac1899f9cf4.pdf.
25. Ulybin A.V., Arzamascev A.A. Mul'tiagentnyj podhod v imitacionnom modelirovanii [Multi–agent approach in simulation modeling]. Vestnik TGU [Tomsk State University Journal], 2010, vol. 15, issue 5, pp. 1470-1471.
26. Massel' L.V. Primenenie ontologicheskogo, kognitivnogo i sobytijnogo modelirovaniya dlya analiza razvitiya i posledstvij chrezvychajnyh situacij v energetike [Application of ontological, cognitive and event modeling for the analysis of the development and consequences of emergency situations in the energy sector]. Problemy bezopasnosti i chrezvychajnyh situacij [Safety and emergencies problems], 2010, no. 2, pp. 34-43.
27. Smirnov S.V. Ontologii kak smyslovye modeli [Ontologies as semantic models]. Ontologiya proektirovaniya [Ontology of designing], 2013, no. 2, pp.12-19.
28. Boyarskij K.K., Kanevskij E.A., Lezin G.V. Konceptual'nye modeli v bazah znanij [Conceptual models in knowledge bases], available at: https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualnye-modeli-v-bazah-znaniy/viewer
29. Arshinskiy L.V., Arshinsky V.L. Neobhodimost' i dostatochnost' pri agregirovanii na osnove neubyvayushchih funkcij [Necessity and sufficiency in aggregation based on non-decreasing functions]. Ontologiya proektirovaniya [Ontology of designing], 2022, vol. 12, no. 1, pp.93-105, DOI: 10.18287/2223-9537-2022-12-1-93-105.
30. Dorofeev R.S., Sosinskaya S.S. Sovmestnoe ispol'zovanie metodologij kvalimetricheskoj ekspertizy i ontologii dlya ocenki kachestva tekhnologij izgotovleniya izdelij [Joint use of methodologies of qualimetric expertise and ontology to assess the quality of manufacturing technologies]. Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii: Sb. trudov XVI Bajkal'skoj vseros. konferencii. Ch. 2 [Information and mathematical technologies in science and management: Proceedings of the XVI Baikal All-Russian Conference. Part 2]. Irkutsk: ISEM SO RAN [Melentiev Energy Systems Institute SB of the RAS], 2010, pp. 138-145.
31. Dorofeev R.S. Metodologiya i programmnaya realizaciya sovmestnogo ispol'zovaniya ontologii i kvalimetricheskoj ekspertizy pri ocenke kachestva stankov [Methodology and software implementation of shared use of ontologies and qualimetric examination when evaluating machine tool quality]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2013, no. 3, pp. 16-23.

32. Sosinskaya S.S., Dorofeev R.S., Dorofeev A.S. Razrabotka sistemy dlya raschyota rejtinga prepodavatelej na osnove kvalimetricheskogo podhoda i ontologii [Developing a system for estimation rating of teachers based on the qualimetric approach and ontology]. Ontologiya proektirovaniya [Ontology of designing], 2019, vol. 9, no. 2(32), pp.214-224, DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9- 2-214-224.
33. Azgaldov G.G. Teoriya i praktika ocenki kachestva tovarov (osnovy kvalimetrii) [Theory and practice of assessing the quality of goods (fundation of qualimetry)]. Moscow, Ekonomika [Economy], 1982, 256 p.
34. Abramova N.A. O nekotoryh mifah v ocenke kachestva programmnogo obespecheniya [About some myths in software quality assessment]. Nadezhnost' [Dependability], 2004, no. 1, pp. 38-63
35. Gluhov N.I., Nasedkin P.N. Razrabotka elementov kompleksnoj sistemy zashchity informacii predpriyatiya [Development of elements of a complex information security system of the enterprise]. Informacionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami [Information technologies and mathematical modeling in the management of complex systems], 2021, no 1 (9), pp. 35-42.
36. Nasedkin P.N., Arshinskij L.V., Gluhov N.I. Primenenie nechyotkogo prisoedinyonnogo logicheskogo vyvoda v ocenke effektivnosti funkcionirovaniya kompleksnoj sistemy zashchity informacii predpriyatij [Application of fuzzy attached logical inference in the evaluation of the effectiveness of the integrated information security system of enterprises]. Teoreticheskie i prikladnye voprosy realizacii proektov v oblasti informacionnoj bezopasnosti. Materialy mezhvuzovskoj nauchno-teoreticheskoj konferencii (v ramkah Sibirskogo foruma «Informacionnaya bezopasnost' – 2021») [Theoretical and applied issues of implementation of projects in the field of information security: Materials of the interuniversity scientific and theoretical conference (within the framework of the Siberian Forum "Information Security-2021")], Novosibirsk, Sibirskij gosudarstvennyj universitet telekommunikacij i informatiki [Siberian State University of Telecommunications and Informatics], 2021, pp. 42-52.
37. Nasedkin P. N. Analiz vostrebovannosti komponentov urovnya programmno-tekhnicheskih reshenij KSZI predpriyatiya s tochki zreniya obespecheniya bazovyh trebovanij po informacionnoj bezopasnosti [Analysis of the demand for components of the level of software and technical solutions of the enterprise's KSZI from the point of view of ensuring basic requirements for information security]. Informacionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami [Information technologies and mathematical modeling in the management of complex systems], 2022, no 2(14), pp. 50-64, DOI 10.26731/2658-3704.2022.2(14).50-64.
38. GOST 28195-89. Ocenka kachestva programmnyh sredstv. Obshchie polozheniya. Mezhgosudarstvennyj standart [GOST 28195-89. Evaluation of the quality of software tools. General provisions. Interstate Standard]. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov [IPK Publishing House of Standards], 2001, 30 p.
39. GOST 15467-79. Upravlenie kachestvom produkcii. Osnovnye ponyatiya terminy i opredeleniya. Mezhgosudarstvennyj standart [Product quality management. Basic concepts, terms and definitions. Interstate Standard]. Moscow, IPK Izdatelstvo standartov [IPK Publishing House of Standards], 2002, 22 p.
40. Arshinskiy L.V. Logiko-aksiologicheskij podhod k ocenke sostoyaniya sistem [Logic axiological approach to assessment of systems]. Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2013, no. 3(39), pp. 140-146.
41. Arshinsky L.V. Arshinsky V.L., Dorzhsuren H. Metodika ekspertnogo ocenivaniya kachestva funkcionirovaniya proizvodstvenno-ekonomicheskih sistem na osnove znanievyh tekhnologij [Knowledge technology-based method of expert estimation of productive-economic system operation quality]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2018, vol. 22, no. 3, pp. 63-78.
42. Arshinskiy L.V. Svidetelstvo ob oficialnoj registracii programmy dlya EVM «lAos 2.H». Zaregistrirovano v Reestre programm dlya EVM 02 noyabrya 2016 g. Svidetelstvo № 2016662218 [Certificate of official registration of the computer program "lAos 2.X". Registered in the Register of computer programs on November 02, 2016. Certificate no. 2016662218.]

Nasedkin Pavel Nikolaevich. *Senior lecturer, postgraduate student of the Department of Information Systems and Information Security at Irkutsk State Transport University, Author ID: 1066448; SPIN: 8365-9541, nasedkin_pn@irgups.ru.*

Arshinsky Leonid Vadimovich. *Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department Information Systems and Information Security of Irkutsk State Transport University, Author ID: 520252; SPIN: 9286-4084; ORCID: 0000-0001-5135-7921, larsh@mail.ru.*

Статья поступила в редакцию 10.03.2023; одобрена после рецензирования 11.03.2023; принята к публикации 24.03.2023.
The article was submitted 03/10/2023; approved after reviewing 03/11/2023; accepted for publication 03/24/2022.

УДК 004.912
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.015

Обработка слабоструктурированных текстовых данных для использования в моделях анализа

Макарова Елена Андреевна
Брянский государственный технический университет,
Россия, Брянск, *m4karova.e@yandex.ru*

Аннотация. При создании моделей анализа данных часто целесообразно использовать в них данные различной формы и структуры – числовые, категориальные, текстовые, видео и т.д. В статье выполнено исследование влияния текстовых данных без чёткой структуры на качество моделей анализа, выявлена зависимость точности моделей анализа от используемых способов обработки слабоструктурированных текстовых данных. Описана модель интеллектуальной обработки слабоструктурированных текстовых данных, включающая в себя методы визуализации и алгоритмы трансформации данных, предложенные автором в предыдущих работах. Предложена модификация алгоритма трансформации ошибочных написаний, построенная на использовании моделей векторного представления слов. Проведен эксперимент по использованию данных разной структуры в рамках решения задачи классификации резюме соискателей. Приведен пример обработки слабоструктурированных текстовых данных для решения задачи классификации резюме соискателей по подходящим им профессиям. Описаны этапы построения модели интеллектуальной обработки данных, включая разведочный анализ, извлечение и трансформацию данных. Описаны проблемы, свойственные данным, использующимся в эксперименте, таким как: орфографические ошибки, использование разной терминологии для описания одних и тех же понятий и т.д. Приведены примеры объединения словосочетаний с высокой степенью семантической близости и поиска ошибочных написаний распространенных в выборке терминов. Рассчитана точность применения моделей классификации, построенных на данных, обработанных различными способами. Эксперименты показали, что использование слабоструктурированных данных для этой задачи почти не даёт прироста точности модели в случае использования их без предварительной обработки и повышает точность классификации на несколько процентов в случае их корректной обработки.

Ключевые слова: слабоструктурированные текстовые данные, анализ данных, классификация данных, анализ резюме соискателей

Цитирование: Макарова Е.А. Обработка слабоструктурированных текстовых данных для использования в моделях анализа / Е.А. Макарова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 178-189. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.015.

Введение. Анализ данных широко применяется в различных предметных областях для быстрого и эффективного нахождения различных закономерностей в данных и извлечения информации, необходимой для принятия решений. При этом в качестве источника для анализа могут выступать данные различной формы и структуры: от табличных данных числового типа до неструктурированных данных видеопотоков. Во многих предметных областях важным источником являются текстовые данные разной степени структурированности – информация из различных Интернет-ресурсов, социальных сетей, внутренних баз данных. В статье рассматривается процесс обработки слабоструктурированных текстовых данных (ССТД). Под слабоструктурированными данными понимаются все промежуточные формы между строгой структурой и её полным отсутствием [1]. В ряде случаев использование ССТД позволяет улучшить качество моделей анализа. Например, добавление информации, полученной из новостей и социальных медиа, в модель оценки риска банкротства юридических лиц даёт прирост точности этой модели [2]. Однако, в некоторых случаях прироста качества может не быть, но увеличивается трудоемкость процесса анализа. В работе [3], связанной с анализом текстовых данных для прогнозирования финансовых рисков, обсуждается, что улучшение качества моделей возможно лишь в случаях, когда данные предварительно корректно обработаны, в ином случае качество построенной модели, наоборот, ухудшится.

1. Степень разработанности темы обработки ССТД. Существуют различные подходы, методы и алгоритмы обработки ССТД для использования в моделях интеллектуального анализа данных (ИАД). В обзоре актуальных тенденций в области предварительной обработки текстовых данных [4] подчеркивается, что при проведении анализа текстовых данных необходимо уделять внимание параметрам их обработки, приводя характеристики используемых данных и методов их преобразования. Это необходимо, так как выбор параметров очистки, трансформации, векторизации будет влиять на итоговый результат исследования данных.

Проблема автоматизированной обработки ССТД с целью дальнейшего использования в моделях анализа данных состоит в том, что особенности структуры представления информации в данных зависят от их источника, и даже в одном источнике информация, введенная разными людьми, может быть структурирована по-разному. В итоге, при разработке программного обеспечения или проведении исследований, использующих подобные данные, специалистам в области анализа данных, совместно со специалистами в предметной области, необходимо настроить конвейер их обработки. Этот этап, по некоторым оценкам, может занимать до 70% трудозатрат проекта, использующего текстовые данные [5]. Ручная обработка подобных данных не является оптимальным подходом в большинстве случаев из-за высоких трудозатрат экспертов и высокой скорости накопления новых данных.

В статье предложена модель интеллектуальной обработки ССТД для дальнейшего использования их в моделях анализа данных. Материалы исследования базируются на результатах, полученных автором ранее [6-9].

2. Модель интеллектуальной обработки ССТД. В моделях, описывающих жизненный цикл анализа данных, помимо этапов постановки задачи и, непосредственно, проведения анализа и интерпретации его результатов, отдельно выделяют этапы разведочного анализа и подготовки данных к анализу. Например, это предусматривает модель CRISP-DM [10]. Для решения описанной во введении проблемы была разработана модель интеллектуальной обработки ССТД, опирающаяся на распространенные модели исследования данных. В рамках предложенной модели не рассматриваются построение и оценка качества готовых моделей, а только этапы изучения и подготовки данных. Схема применения модели для этих этапов представлена на рисунке 1.

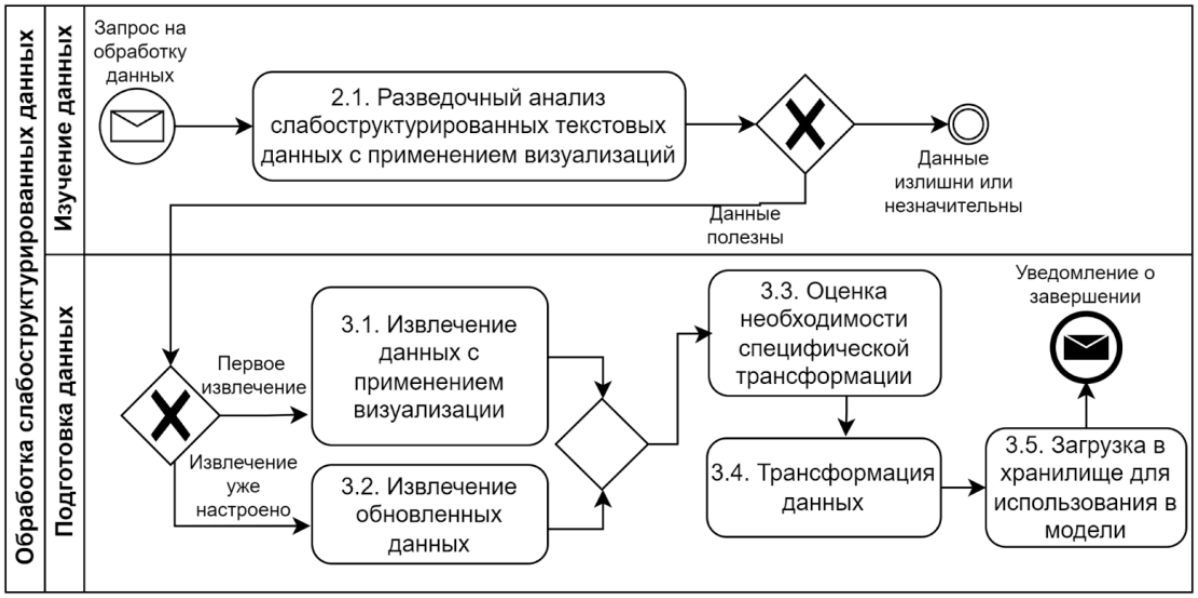


Рис. 1. Модель интеллектуальной обработки ССТД

Основные свойства модели обработки ССТД формально задаются следующим образом:

$$A = < P, S_a, S, O, Pr; T >$$

где P – параметры текстовых данных;
S_a – общее количество текстовых данных в источнике;
S – количество экземпляров текстовых данных, необходимых для обработки в рамках текущей задачи анализа;
O – накопленная информация о прошлых обработках;
Pr – ряд преобразований, которые необходимо осуществить над данными;
T – время на обработку массива данных: показатель, который стремится к уменьшению в данной модели.

В свою очередь, параметры текстовых данных (P) в этой модели описываются такими свойствами, как размер, процент несловарных значений, степень дублирования текстов.

От описанных параметров зависит, какие дополнительные способы обработки необходимо использовать на этапах извлечения и трансформации, чтобы добиться высокого качества данных с минимальным привлечением специалиста в предметной области. Кроме того, от ряда свойств данных зависит, будет ли внедрение модели интеллектуальной обработки в конвейер полезно для увеличения скорости обработки данных, или же наоборот.

Использование предложенной модели интеллектуальной обработки ССТД оказывает положительное влияние на процесс создания модели анализа данных при соблюдении следующих условий:

- данные для анализа не могут быть обработаны полностью автоматически с достаточным уровнем точности и, соответственно, требуют привлечения специалиста в предметной области;
- процесс анализа и, соответственно, обработки, повторяется с появлением новых данных;
- большое количество уникальных значений данных, которые необходимо обрабатывать.

При выполнении всех вышеописанных условий время, затраченное на подготовительный этап обработки, будет оправданно. Формально, данные условия можно описать следующим образом:

$$T_a = P + \sum_{j=1}^{c} S_j * T_E * V,$$

$$T_m = \sum_{j=1}^{c} S_j * T_E,$$

$$T_a < T_m ,$$

где T_a – общее время обработки при полностью ручном подходе; P – время, необходимое на первичную настройку; c – количество циклов обработки; j – номер цикла предобработки; T_E – среднее время работы специалиста в предметной области над одной единицей данных (строкой или документом), включая время простоя; S_j – множество уникальных значений текстовых единиц в цикле обработки j; V – доля данных для ручной валидации, зависит от структурированности и качества исходных текстов, выбирается пользователем на этапе настройки работы системы, по умолчанию взято за 0,05; T_m – общее время обработки при полностью ручном подходе.

Рассмотрим отдельные этапы использования модели интеллектуальной обработки ССТД.

2.1. Этап разведочного анализа ССТД. Разведочный анализ данных важен при работе с новыми данными или с данными сложной структуры. На этапе разведочного анализа ис-

следователь может не только лучше изучить характеристики данных для правильной трансформации, но и сгенерировать новые гипотезы. Для лучшего погружения в сложные данные эффективно используются различные методы визуализации [11]. Сложность заключается в том, что большая часть методов визуализации работает с числовыми или категориальными данными. Адаптация методов визуализации для работы со ССТД описана автором в предыдущей статье [7]. Использование разведочного анализа ССТД необходимо из-за высокой трудоемкости их обработки для дальнейшего использования в моделях анализа. По его результатам часть данных может быть отклонена для использования в модели или, наоборот, добавлена. Пример использования визуализации с целью разведочного анализа будет продемонстрирован далее, в экспериментальной части статьи. Схема применения визуализации в процессе разведочного анализа представлена на рисунке 2. Разработанные автором интерактивные визуализации также используются для настройки извлечения данных из источника по запросу специалиста в предметной области (рисунок 3).

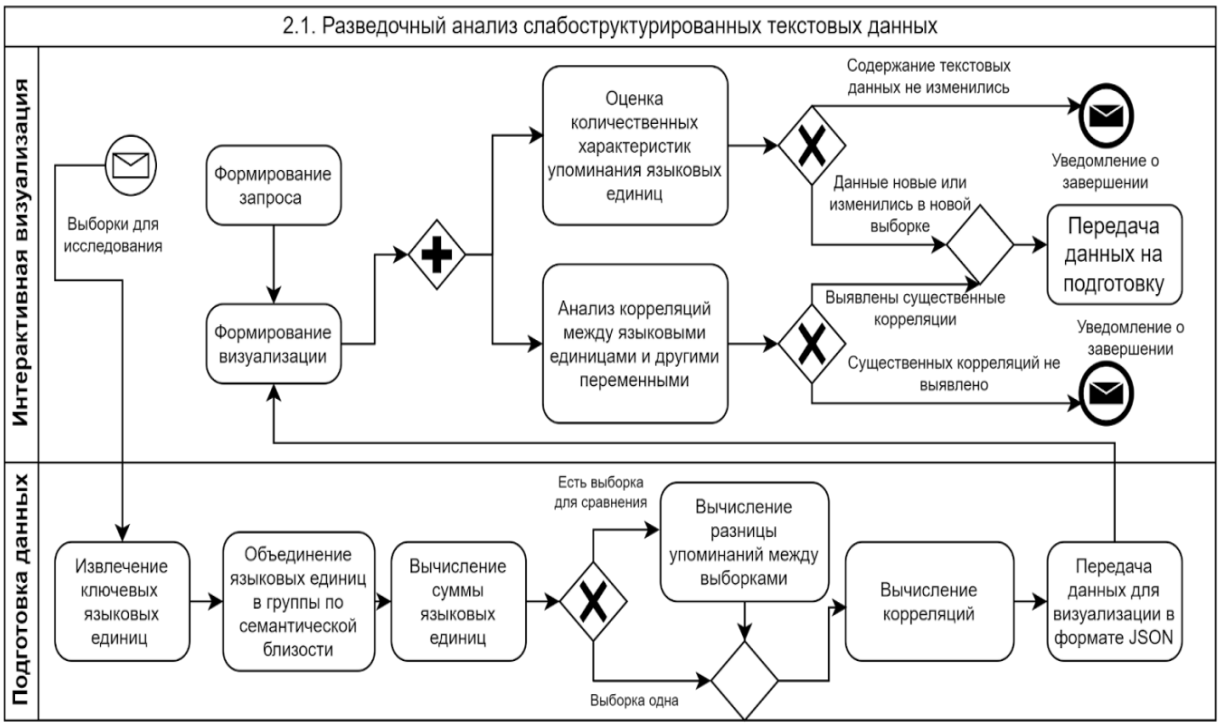


Рис. 2. Использование визуализации для разведочного анализа ССТД

2.2. Особенности трансформации ССТД. Трансформация включает в себя следующие этапы:

1) очистка данных, с учетом особенностей их структуры;
2) оценка количества несловарных значений;
3) оценка количества данных с высокой степенью семантической близости;
4) трансформация специфических сокращений и распространенных в наборе данных орфографических ошибок;
5) вычисление семантической близости между единицами данных и группировка их по этому признаку;
6) извлечение признаков из данных, используя результаты предыдущих этапов и с привлечением специалиста в предметной области.

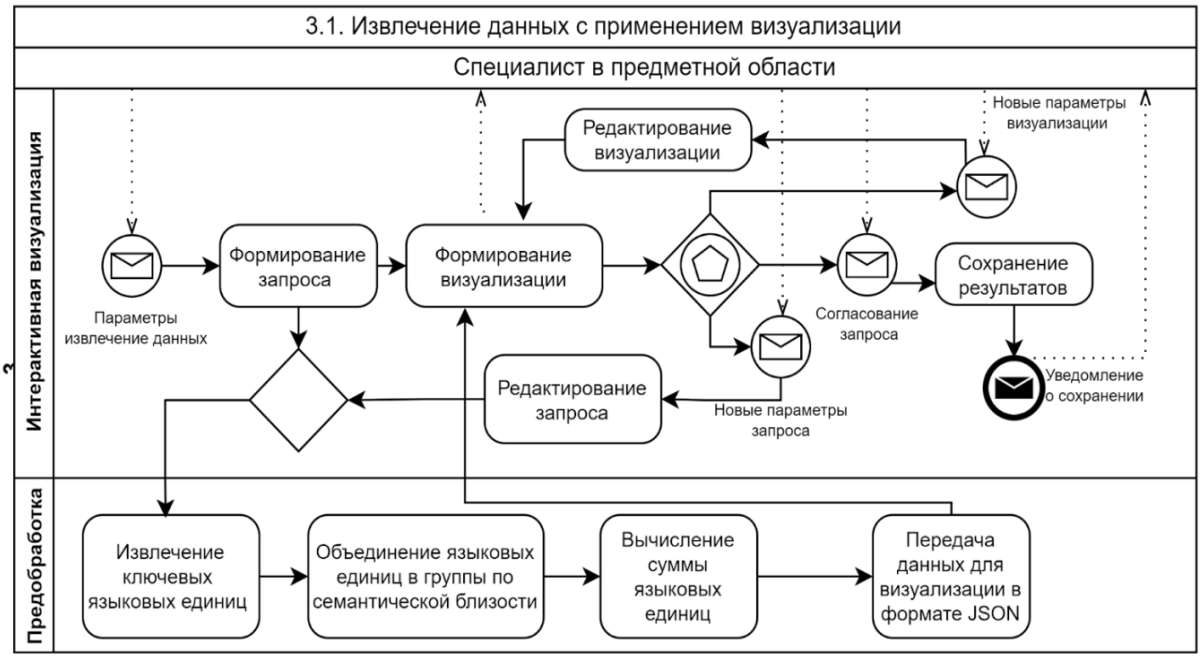


Рис. 3. Извлечение ССТД с применением визуализации

Трансформация специфических сокращений была подробно рассмотрена автором в работе [8]. В алгоритм трансформации были внесены некоторые корректировки, с целью возможности использования его для исправления распространенных в выборке ошибок. Для этого на предварительно обученной модели Word2Vec вычисляются ближайшие, по семантической близости, соседи распространенных в выборке слов. Для автоматической трансформации слов, являющихся ближайшими соседями, как ошибочных написаний исходного слова, должны быть выполнены ряд условий:

1) значение семантической близости находится в диапазоне от 0,7 до 0,99;
2) первый и последний символ сравниваемых слов совпадают;
3) средняя часть слов отличается не более, чем на 20% или 2 символа для слов, короче 8 символов;
4) слово не содержит букв другого алфавита, цифр и иных символов.

Существуют другие методы и инструменты исправления ошибок [12], выбор инструмента будет зависеть от задачи и используемых в проекте технологий.

Экспериментально было выявлено, что для расчёта семантической близости между ошибочными написаниями следует использовать модель, обученную на униграммах [13].

Алгоритм группировки по семантической близости подробно рассматривался в предыдущих работах [9], где на различных данных было опробовано использование классических метрик семантической близости (коэффициент Жаккара, косинусное расстояние) и применение метрики Word Mover Distance, использующей векторное представление слов для оценки близости текстовых единиц со схожим смыслом, но записанных разными словами. Так как метрика Word Mover Distance опирается на значения, которые могут давать нестабильный результат в зависимости от выборки, на которых обучалась модель Word2Vec, она используется совместно с классическими метриками и через обязательную верификацию процесса специалистом в предметной области. Кроме того, алгоритм предусматривает сохранение и повторное использование результатов оценки специалиста, что даёт выигрыш во времени при обработке новых данных.

В качестве этапов трансформации, в зависимости от решаемой задачи, могут выступать извлечение данных, обогащение данных и т.д. Перед применением моделей анализа данных,

построенных на машинном обучении, могут быть использованы различные классические методы обработки естественного языка, как, например, выделение именованных сущностей, извлечение связей, тематическое моделирование и т.д. [14].

Полученные в результате этих процессов данные могут быть использованы в модели анализа данных как отдельные переменные, описывающие ту же сущность, что и исходный текст. Например, переменная может быть дихотомической, отражающей факт упоминания конкретного слова или темы в тексте, или категориальной, описывающей результат извлечения какой-то характеристики исследуемой сущности.

Для использования самих ССТД в моделях анализа данных, необходимо провести их векторизацию. Корректно выбранные параметры векторизации влияют на качество итоговых моделей [15], выбор параметров зависит от параметров ССТД.

3. Описание эксперимента. С целью оценки влияния способов обработки ССТД на качество моделей анализа был проведен эксперимент. В начале эксперимента модель анализа данных была построена на числовых и категориальных данных, а далее в неё были добавлены ССТД, обработанные различными способами. В качестве задачи анализа данных выбрана классификация резюме соискателей по подходящих им профессиям. Для эксперимента взяты данные с сайта «Работа в России» [16]. Так как данный ресурс используется государственными органами по содействию труду и занятости населения, в нём присутствует много резюме людей, которые ищут первую работу или меняют сферу деятельности в связи с потерей работы. С помощью моделей классификации данных, учитывающих навыки, которыми владеет соискатель, и положительный опыт (приглашения на собеседования, полученные другими соискателями), возможна разработка рекомендательной системы, которая будет предлагать соискателю релевантные его образованию, навыкам и опыту позиции. Кроме того, данные из обученных моделей могут использоваться для составления наиболее эффективного с точки зрения привлечения внимания потенциальных работодателей резюме.

Из имеющегося набора данных были собраны 195 272 резюме соискателей, которые подробно описали свои навыки. Помимо навыков, в обезличенных резюме присутствует такая информация, как: возраст, пол, опыт работы, населенный пункт, полученные сертификаты, «гибкие навыки» (личностные качества, как, например, ответственность, исполнительность и т.д.). Первая задача, которая стоит перед исследователем: изучить влияние тех или иных данных на успешность резюме, а также выявить, существует ли значимая разница между упоминанием навыков от людей, претендующих на разные профессии. В таблице 1 приведены примеры описания навыков, которые по смыслу подходят под желаемые позиции.

Таблица 1. Примеры записей поля «навыки»

Описание навыков	Позиция
Умение работать с людьми, ПК (word, excel, power point)	Секретарь
Autocad, компас 3d, Excel, Delphi	Инженер
Вождение более 15 лет: категории b, c, d	Водитель
Знание программы 1с бухгалтерия 8.3, опытный пользователь ПК: MSWord, Excel, Internet, 1с.	Бухгалтер
Кмс по боксу, бывший сотрудник МВД	Охранник

Однако, исходя из визуализации, построенной на выборке 1000 случайных резюме, самыми упоминаемыми навыками являются «ответственность, исполнительность, уверенный пользователь ПК, пунктуальность, коммуникабельность». Модель представлена на рисунке 4, два цвета использованы с целью визуального отделения одних языковых единиц от других.

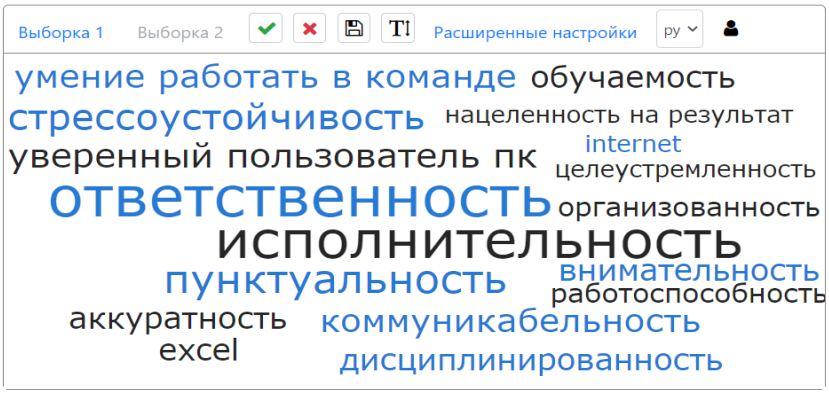


Рис. 4. Визуализация данных о навыках из случайных резюме

Подобные качества присущи представителям многих профессий и, более того, учитывая форму резюме источника данных, большинство из них должны относиться к полю «гибкие навыки». В случае, если подобным образом описывали навыки большинство соискателей, использовать их для модели классификации малоэффективно.

Построим визуализацию, взяв за основу профессию «бухгалтер» и выбрав в качестве выборки для сравнения профессию «водитель», и оценим различающиеся по профессиям упоминания навыков в специально разработанном интерфейсе визуализации. В качестве порога упоминаемости, при котором упоминание какой-либо языковой единицы будет считаться достаточно возросшим или уменьшившимся, выбран коэффициент 1.5. Визуализация представлена на рисунке 5.

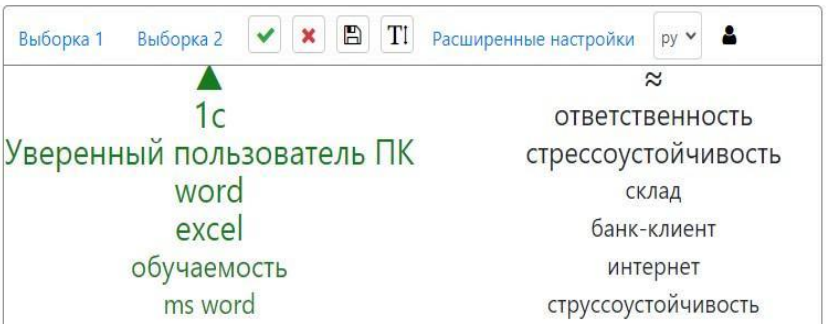


Рис. 5. Визуализация, демонстрирующая разницу упоминаний навыков между разными профессиями

Как видно из приведенной визуализации, ключевые упоминаемые навыки различаются. Следующий шаг разведочного анализа – оценить различие упоминания навыков между соискателями, получившими приглашения на собеседования, и случайными соискателями по профессии «Бухгалтер». Визуализация представлена на рисунке 6.

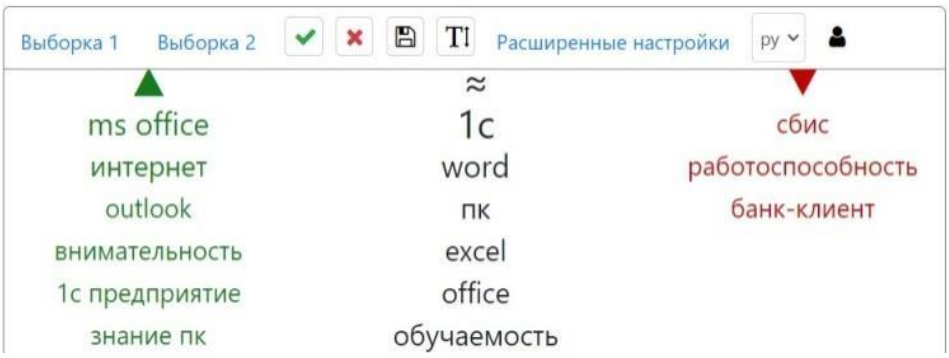


Рис. 6. Визуализация, демонстрирующая разницу упоминаний навыков между выборками резюме

Изучая визуализации, можно сделать вывод, что в качестве ключевых слов выступают не только отдельные слова, но и словосочетания, что может влиять на выбираемые параметры векторизации перед загрузкой данных в модель анализа. Также при изучении визуализаций наблюдается проблема, свойственная данным, заполняемым вручную разными людьми, а именно: обозначение одних и тех же языковых единиц разными словами или сочетаниями слов. Автоматическое объединение подобных слов и словосочетаний возможно при сочетании высокого уровня семантической близости и совпадения лемм исходного и объединяемого слова (словосочетания). Во избежание ошибок, вызванных одинаковым контекстным употреблением разных слов с совпадающими леммами в составе, часть выборки проходит валидацию специалистом в предметной области. Пример семантически близких сочетаний приведён в таблице 2.

Таблица 2. Выражения, близкие к словосочетанию «быстро обучаюсь»

Выражение	Мера семантической близости (от 0 до 1)	Кол-во упоминаний в изучаемой выборке
легко обучаюсь	0,8762	840
быстро обучаема	0,7863	693
быстро учусь	0,7838	269
готова обучаться	0,7747	74
легкообучаема	0,7693	1157
готова учиться	0,7627	56
быстро осваиваю	0,7514	191
легко усваиваю	0,7218	79
легкообучаемая	0,7188	680
быстрообучаема	0,7184	395

Это относится и к различным способам записи названий программного обеспечения или инструментов, которыми владеет соискатель: например, указание сокращенного или полного наименования инструмента, допущение ошибок. Пример представлен в таблице 3.

Таблица 3. Выражения, близкие к словосочетанию «word»

Выражение	Мера семантической близости (от 0 до 1)	Кол-во упоминаний в изучаемой выборке
ms word	0,9011	3841
office word	0,7971	711

Кроме того, статистика употребления несловарных слов в выборке указывает на то, что в ней присутствуют ошибки. Использование моделей векторного представления слов, построенных на контекстном употреблении, позволяет найти самые распространенные ошибки быстро, чтобы трансформировать их автоматически или с привлечением специалиста в предметной области. Пример результатов автоматического поиска ошибочных написаний распространённого в выборке слова представлен в таблице 4. Выделены слова, которые при использовании вышеописанного алгоритма трансформации ошибок могут быть исправлены автоматически.

Решение о необходимости исправления ошибок перед загрузкой данных в модель классификации следует принимать, исходя из потребностей задачи. Например, при анализе приглашений на собеседования, исходя из упоминания тех или иных навыков, исправление ошибок может ухудшить качество моделей, так как наличие ошибок в резюме может повлиять на решение потенциального работодателя не приглашать соискателя на собеседование.

Таблица 4. Слова, близкие к «excel»

Слово	Мера семантической близости (от 0 до 1)	Кол-во упоминаний в изучаемой выборке
exel	0,8737	1688
exsel	0,7910	368
excell	0,7285	130
exell	0,7036	71
ecxel	0,6900	123

3.1. Результаты эксперимента. Для экспериментальной проверки возможности использования обработанных данных в решении задачи классификации исходная выборка была разделена на обучающую (80%) и тестовую (20%) для контроля результатов классификации данных.

Для программной реализации использовалась библиотека Scikit-learn для языка программирования Python. Выбранная библиотека поддерживает различные алгоритмы машинного обучения, в том числе для решения задачи классификации по заранее заданным классам [17]. Из имеющейся выборки были выбраны 20 самых часто встречаемых названий позиций, на которые претендует соискатель. В число выбранных позиций не вошли 2 самых распространенных, но при этом слишком «общих» названий желаемых позиций: «Специалист» и «Менеджер» без указания дополнительных подробностей. Для классификации был выбран метод опорных векторов, который широко используется для решения задач классификации с заранее размеченными классами [18]. Были подсчитаны метрики top-1 и top-3 accuracy [19] на классификации соискателей по позициям, опираясь на имеющиеся категориальные поля и на данные об их навыках. Метрика по трём наиболее подходящим классам была выбрана из-за того, что одно и то же образование может подходить под несколько профессий, как и наборы навыков смежных профессий часто пересекаются. Другие алгоритмы классификации для решения этой задачи не использовались, хотя, в теории, могли показать лучшее качество для решения исходной задачи. Целью эксперимента являлось оценить изменение качества моделей анализа данных при применении одного и того же алгоритма классификации и разными наборами, или же способами обработки данных. Далее представлены 3 способа обработки данных, использованных в ходе эксперимента.

Способ 1 – очистка текста от лишних символов, векторизация по униграммам.

Способ 2 – очистка текста от лишних символов, векторизация по униграммам, биграммам и триграммам.

Способ 3 – очистка текста от лишних символов, объединение самых частоупотребимых семантически близких сочетаний в группы и замена на самое распространенное из них, векторизация по униграммам, биграммам и триграммам. Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты классификации

Входы модели	Точность модели классификации	
	top-1 accuracy	top-3 accuracy
Без данных о навыках (только категориальные поля)	61,9%	75,1%
Содержит необработанные ССТД	62,9%	76,5%
Содержит обработанные ССТД (способ 1)	63,1%	77,6%
Содержит обработанные ССТД (способ 2)	64,9%	80,2%
Содержит обработанные ССТД (способ 3)	65,3%	80,9%

Заключение. Использование ССТД в моделях анализа данных может улучшить их качество. Однако, способы их обработки будут иметь заметное влияние на качество полученной модели анализа данных. В статье предложена модель интеллектуальной обработки ССТД, упор в которой сделан на этапы изучения и подготовки данных.

Был проведён эксперимент построения модели классификации соискателей по подходящим должностям с использованием данных различной структуры из резюме. В ходе обработки данных для построения модели классификации была отмечена важность использования разведочного анализа данных, который позволяет выявить различные особенности данных до их загрузки в модель.

Результаты эксперимента подтверждают, что для данной задачи способ обработки данных перед их использованием в модели классификации имел влияние на качество полученной модели. Таким образом, использование предварительно обработанных данных повысило точность модели на 1,2-3,4%, в зависимости от способа обработки, в то время как загрузка в модель ССТД без предварительной обработки повысило её качество на 1%.

Направлениями дальнейших исследований являются:

- исследование методов оценки результатов обработки ССТД с точки зрения эффективности их использования в моделях анализа данных;
- разработка способов улучшения ССТД, таких как: автоматическое извлечение комплексных признаков, устранение неоднозначностей и т.д.

Список источников

1. Климанская Е.В. Методы обработки слабоструктурированных данных в автоматизированных системах на железнодорожном транспорте / Е.В. Климанская, А.В. Чернов, В.И Янц.// Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки, 2013. – №1 (170). – С. 18-23.
2. Guo L., Shi F., Tu J. Textual analysis and machine leaning: crack unstructured data in finance and accounting. The journal of finance and Data Science, 2016, vol. 2, pp. 163-170, DOI:10.1016/j.jfds.2017.02.001.
3. Dorfleitner G., Priberny Ch., Schuster S. Description-text related soft information in peer-to-peer lending – Evidence from two leading European platforms. Journal of Banking & Finance, 2016, no. 64, pp. 169-187. DOI:10.1016/j.jbankfin.2015.11.009.
4. Hickman L., Thapa St., Tay L. Text preprocessing for text mining in organizational research: review and recommendations. Organizational research methods, 2020, no. 25, DOI:10.1177/1094428120971683.
5. Perez J., Iturbide E., Olivares V. A data preparation methodology in data mining applied to mortality population databases. J Med Syst, 2015, pp. 39-152, DOI:10.1007/978-3-319-16486-1_116.
6. Макарова Е.А. Модель обработки слабоструктурированных текстовых данных на русском языке для интеллектуальной поддержки информационного управления в динамических организационных системах / Е.А. Макарова, Д.Г. Лагерев // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе, 2022. – № 3. – С. 104-125.
7. Makarova E.A., Lagerev D.G., Lozbinev F.Y. Approaches to visualizing big text data at the stage of collection and pre-processing. Scientific Visualization, 2019, no. 11(4), pp. 13-26, DOI: 10.26583/sv.11.4.02.
8. Лагерев Д.Г. Поиск и раскрытие сокращений в русскоязычных данных медицинских информационных систем / Д.Г. Лагерев, Е.А. Макарова // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2020. – № 7. – С. 44-54.
9. Макарова Е.А. Оценка семантической близости новостных сообщений на основе анализа заголовков / Е.А. Макарова, Д.Г. Лагерев // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2021. – № 7. – С. 46-56.
10. Shearer C. The CRISP-DM model: the new blueprint for data mining. J Data Warehousing, 2000, vol. 5, pp.13-22.
11. Захарова А.А. Визуальная аналитика и когнитивные методы для обработки и анализа гетерогенных данных мультисенсорных систем: проблемы и тенденции / А.А. Захарова, А.Г. Подвесовский, Д.Г. Лагерев // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. – №4 (16), – С. 60-74. DOI:10.25729/2413-0133-2019-4-05.
12. Wang Y., Wang Y., Dang K. A comprehensive survey of grammatical error correction. ACM Trans. Intell. Syst. Technol, 2021, no. 12, vol. 5. pp. 1-51, DOI:10.1145/3474840.

13. Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J. Efficient estimation of word representations in vector space. In proceedings of workshop at ICLR, 2013, DOI:10.48550/arXiv.1301.3781.
14. Большакова Е.И. Автоматическая обработка текстов на естественном языке и анализ данных : учеб. пособие / Е.И. Большакова, К.В Воронцов, Н.Э. Ефремова [и др]. –М.: Изд-во НИУ ВШЭ, 2017, – 269 с.
15. Solomonova Y., Khlopotov M. Russian text vectorization: an approach based on SRSTI classifier. In: digital transformation and gobal society. DTGS 2019. Communications in computer and information Science. Springer. Cham, 2019, vol. 1038, DOI:10.1007/978-3-030-37858-5_64.
16. Работа в России: обработанные и объединенные сведения о вакансиях, резюме, откликах и приглашениях портала trudvsem.ru // Роструд; обработка: Бабушкина В.О., Тимошенко А.Ш., Инфраструктура научно-исследовательских данных. АНО «ЦПУР», 2021. Лицензия CC BY-SA. – URL: http://data-in.ru/data-catalog/datasets/186/.
17. Гребнев К. Н. Машинное обучение с помощью библиотеки Scikit-learn языка Python / К. Н. Гребнев // Математический вестник педвузов и университетов Волго-Вятского региона, 2017. – № 19. – С. 277-281.
18. Zhang Y. Support vector machine classification algorithm and its application. Information computing and applications. ICICA 2012, vol. 308, pp 179-186. DOI:10.1007/978-3-642-34041-3_27.
19. Hossin M, Sulaiman M.N. A review on evaluation metrics for data classification evaluations. International journal of data mining & Knowledge management process, 2015, no. 5, pp. 1-11. DOI:10.5121/ijdkp.2015.5201.

Макарова Елена Андреевна. *Аспирант факультета информационных технологий Брянского государственного технического университета. Направления исследований: обработка текстовых данных, интеллектуальный анализ данных. AuthorID: 959125, ORCID: 0000-0002-5410-5890, m4karova.e@yandex.ru. Россия, 241035, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7.*

UDC 004.912
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.015

Processing of semi-structured text data for use in data analysis models

Elena A. Makarova
Bryansk State Technical University, Russia, Bryansk, *m4karova.e@yandex.ru*

Abstract. In creating data analysis models, it is often advisable to use data of various forms and structures in them - numerical, categorical, textual, video, etc. The article studies the influence of text data without a clear structure on the quality of analysis models, reveals the dependence of the accuracy of analysis models on the methods used for processing semi-structured text data. A model for intelligent processing of semi-structured text data is described, which includes visualization methods and data transformation algorithms proposed by the author in previous works. A modification of the algorithm for the transformation of erroneous spellings, based on the use of vector word representation models, is proposed. An experiment was conducted on the use of data of different structures in the framework of solving the problem of classifying resumes of applicants. An example of processing semi-structured text data for solving the problem of classifying resumes of applicants according to their professions is given. The stages of building a data mining model are described, including exploratory analysis, data extraction and transformation. Problems inherent in the data used in the experiment are described, such as: spelling errors, the use of different terminology to describe the same concepts, etc. The accuracy of applying classification models based on data processed in various ways is calculated. Experiments have shown that the use of semi-structured data for this task almost does not increase the accuracy of the model if they are used without preliminary processing and increases the classification accuracy by several percent if they are correctly processed.

Keywords: semi-structured text data, data analysis, data classification, CV analysis

References

1. Klimanskaya E.V., Chernov A.V., Yants V.I. Metody obrabotki slabostrukturirovannyh dannyh v avtomatizirovannyh sistemah na zheleznodorozhnom transporte [Methods of semi-structured data processing in automated systems on railway transport]. Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: tekhnicheskiye nauki [Scientific journal bulletin of higher educational institutions North Caucasus region], 2013, no. 1 (170), pp. 18-23.
2. Guo L., Shi F., Tu J. Textual analysis and machine leaning: crack unstructured data in finance and accounting. The journal of finance and Data Science, 2016, vol. 2, pp. 163-170, DOI:10.1016/j.jfds.2017.02.001.
3. Dorfleitner G., Priberny Ch., Schuster S. Description-text related soft information in peer-to-peer lending – Evidence from two leading European platforms. Journal of Banking & Finance, 2016, no. 64, pp. 169-187. DOI:10.1016/j.jbankfin.2015.11.009.

4. Hickman L., Thapa St., Tay L. Text preprocessing for text mining in organizational research: review and recommendations. Organizational research methods, 2020, no. 25, DOI:10.1177/1094428120971683.
5. Perez J., Iturbide E., Olivares V. A data preparation methodology in data mining applied to mortality population databases. J Med Syst, 2015, pp. 39-152, DOI:10.1007/978-3-319-16486-1_116.
6. Makarova E.A., Lagerev D.G. Model' obrabotki slabostrukturirovannyh tekstovyh dannyh na russkom jazyke dlja intellektual'noj podderzhki informacionnogo upravlenija v dinamicheskih organizacionnyh sistemah [Model of processing semi-structured text data in russian for intellectual support of information management in dynamic organizational systems]. Models, systems, networks in economics, technology, nature and society [Models, systems, networks in economics, technology, nature and society], 2022, vol. 3.
7. Makarova E.A., Lagerev D.G., Lozbinev F.Y. Approaches to visualizing big text data at the stage of collection and pre-processing. Scientific Visualization, 2019, no. 11(4), pp. 13-26, DOI: 10.26583/sv.11.4.02.
8. Lagerev D.G., Makarova E.A. Poisk i raskrytie sokrashhenij v russkojazychnyh dannyh medicinskih informacionnyh sistem [Features of preliminary processing of semi-structured medical data in russian for use in ensembles of data mining models]. Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii [Bulletin of computer and information technologies], 2020, no. 7(193), pp. 44-54.
9. Makarova E.A., Lagerev D.G. Ocenka semanticheskoj blizosti novostnyh soobshhenij na osnove analiza zagolovkov [Determining the semantic proximity of news messages based on titles analysis]. Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii [Bulletin of computer and information technologies], 2021, no. 7(205), vol. 18, pp. 46-56.
10. Shearer C. The CRISP-DM model: the new blueprint for data mining. J Data Warehousing, 2000, vol. 5, pp. 13-22.
11. Zakharova A.A., Podvesovskii A.G., Lagerev D.G. Vizual'naja analitika i kognitivnye metody dlja obrabotki i analiza geterogennyh dannyh mul'tisensornyh sistem: problemy i tendencii [Visual analytics and cognitive methods for processing and analysis of heterogeneous data in multi-sensor systems: issues and trends]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 4 (16), pp. 60-74, DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-05.
12. Wang Y., Wang Y., Dang K. A comprehensive survey of grammatical error correction. ACM Trans. Intell. Syst. Technol, 2021, no. 12, vol. 5. pp. 1-51, DOI:10.1145/3474840.
13. Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J. Efficient estimation of word representations in vector space. In proceedings of workshop at ICLR, 2013, DOI:10.48550/arXiv.1301.3781.
14. Bolshakova E.I., Vorontsov K.V., Efremova N.E. Avtomaticheskaja obrabotka tekstov na estestvennom jazyke i analiz dannyh [Automatic natural language processing and data analysis], M.: Publishing house of the national research university higher school of economics, 2017, 269 p.
15. Solomonova Y., Khlopotov M. Russian text vectorization: an approach based on SRSTI classifier. In: digital transformation and gobal society. DTGS 2019. Communications in computer and information Science. Springer. Cham, 2019, vol. 1038, DOI:10.1007/978-3-030-37858-5_64.
16. Rabota v Rossii: obrabotannye i obiedinennye svedenija o vakansijah, rezjume, otklikah i priglashenijah portala trudvsem.ru [Processed and combined information about vacancies, resumes, responses and invitations of the trudvsem.ru portal]. Rostrud; edited by Babushkina V.O., Timoshenko A.Sh., Research Data Infrastructure, ANO TsPUR, 2021, License CC BY-SA, available at: http://data-in.ru/data-catalog/datasets/186/.
17. Grebnev K. N. Mashinnoe obuchenie s pomoshh'ju biblioteki Scikit-learn jazyka Python [Machine learning using the Python Scikit-learn library]. Matematicheskij vestnik pedvuzov i universitetov Volgo-Vjatskogo regiona [Mathematical bulletin of pedagogical universities and universities of the Volga-Vyatka Region], 2017, vol. 19, pp. 277-281.
18. Zhang Y. Support vector machine classification algorithm and its application. Information computing and applications. ICICA 2012, vol. 308, pp 179-186, DOI:10.1007/978-3-642-34041-3_27.
19. Hossin M, Sulaiman M.N. A review on evaluation metrics for data classification evaluations. International journal of data mining & Knowledge management process, 2015, no.5, pp. 1-11. DOI:10.5121/ijdkp.2015.5201.

Makarova Elena Andreevna. *Postgraduate student of the Information Technologies Faculty at Bryansk State Technical University. Research interests: text data processing, data mining. AuthorID: 959125, ORCID: 0000-0002-5410-5890, m4karova.e@yandex.ru, 241035, Russia, Bryansk, 50 let Oktyabrya blvd., 7.*

Статья поступила в редакцию 23.12.2022; одобрена после рецензирования 11.01.2023; принята к публикации 11.01.2023.

The article was submitted 12/23/2022; approved after reviewing 01/11/2023; accepted for publication 01/11/2023.

УДК 378.14.015.62
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.016

Интеллектуальный анализ образовательных данных учебной дисциплины с использованием программы Orange

Китаева Ольга Игоревна
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, Иркутск, *koi_fk@mail.ru*

Аннотация. В статье рассмотрено понятие интеллектуального анализа образовательных данных и выполнен анализ на основе данных учебной дисциплины ВУЗа. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения качества образовательного процесса. Основным методом является получение интеллектуально улучшенных визуальных форм данных для более эффективного понимания скрытых в них закономерностей. В работе рассмотрены возможности применения программного продукта с открытым кодом «Orange» для реализации интеллектуального анализа данных текущей и промежуточной аттестаций студентов-бакалавров по учебной дисциплине «Исследование операций». В результате проведенного анализа выявлены проблемы в процессе освоения дисциплины и предложены пути их решения.

Ключевые слова: интеллектуальный анализ образовательных данных, Orange, анализ текущей успеваемости студентов, визуализация

Цитирование: Китаева О.И. Интеллектуальный анализ образовательных данных учебной дисциплины с использованием программы Orange / О.И. Китаева // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – № 1(29). – С. 190-200. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.016.

Введение. Анализ данных используется в настоящее время для решения многих задач из разных областей. С его помощью можно исследовать, фильтровать, преобразовывать и моделировать данные для извлечения полезной информации и принятия решений. Интеллектуальный анализ образовательных данных (ИАОД) (от англ. Educational Data Mining, далее – EDM) – совокупность методов и алгоритмов анализа данных, накапливаемых в учебном заведении в процессе его деятельности с целью выявления скрытых, неочевидных, практически полезных и интерпретируемых знаний об учебном процессе и его участниках для поддержки и принятия решений [1]. Это направление исследований, связанное с применением методов интеллектуального анализа данных (Data mining) [2-4], машинного обучения и статистики к информации, производимой образовательными учреждениями. ИАОД направлен на исследование образовательных данных в целях улучшения качества образования [5].

На основе этого анализа возможно извлечь закономерности из данных, генерируемых в процессе обучения, таких как, например, посещаемость, успеваемость или данных из систем дистанционного обучения [6]. Процесс применения методов ИАОД, как правило, состоит из пяти следующих этапов:

1. Предварительная обработка данных.
2. Выявление закономерностей в данных тем или иным методом data mining.
3. Проверка обнаруженных закономерностей.
4. Применение найденных закономерностей для прогнозирования будущих событий в обучающей среде.
5. Использование построенных прогнозов при поддержке принятия решений и выработки образовательной политики.

Методы ИАОД позволяют обнаружить в данных знания об образовательном процессе и его участниках, которые были неизвестны до этого момента, и которые будут практически полезны и интерпретируемы для поддержки принятия решений [7-8]. Эти методы могут помочь в проектировании образовательной среды, в организации материалов учебных курсов и управлении образовательными ресурсами и дают возможность оценить влияние

используемых учебных стратегий на результаты успеваемости студентов. В работе «Прогнозирование результатов учебной деятельности студентов-первокурсников с помощью интеллектуального анализа образовательных данных» [9] авторы предлагают ряд типовых задач, которые могут быть решены средствами ИАОД. В частности, для обучающихся - осознанное формирование индивидуальной образовательной траектории, для преподавателей - оптимизация структуры и содержания лекционного курса, прогнозирование успешности учебной деятельности.

Различные аспекты работы образовательного учреждения могут быть проанализированы и использованы для поддержки принятия эффективных решений по управлению образовательным процессом В том числе возможна схема образовательного процесса, когда детализированная информация о работе студента сохраняется в системе, а впоследствии используется для прогнозирования успешности обучающегося в будущем. [10].

В данном случае основной целью является преобразование имеющихся данных о процессе обучения в значимую информацию и поиск закономерностей для принятия решений, совершенствующих образовательные технологии.

1. Оценка знаний студентов в системе электронного обучения Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ). Очевидно, что качество знаний обучающихся зависит от многих факторов, в числе которых:

1. Качество организации учебного процесса (применение эффективных методик преподавания и современных информационных технологий);
2. Структура и содержание основных образовательных программ по направлениям подготовки;
3. Качество учебно-методического обеспечения;
4. Структура и содержание учебных планов дисциплин;
5. Мотивация студентов к обучению и другие.

Наряду с этим, качество знаний, получаемых обучавшимися несомненно напрямую зависит от того, насколько последовательно и своевременно осваивается учебный материал.

Электронное обучение реализовано в ИРНИТУ на базе одной из наиболее востребованной и широко используемой системы MOODLE [11].

Эта система предоставляет преподавателям и студентам большой набор возможностей, в который входит:

1. Представление учебных материалов в структурированном виде;
2. Проведение тестирования;
3. Организация приема лабораторных и курсовых работ;
4. Обеспечение обратной связи со студентами (форум, чат, личные сообщения);
5. Отслеживание выполнения заданий студентами, журналы оценок и многие другие.

С помощью системы электронного обучения можно эффективно решать задачи коммуникативного взаимодействия между преподавателем и обучающимися, отслеживать:

- какие элементы курса были выполнены;
- фиксировать время выполнения и сдачи заданий;
- когда было сдано задание;
- насколько было просрочено время сдачи задания (если это имело место);
- оценку, выставленную преподавателем;
- комментарии преподавателя по работе, проделанной студентом.

К минусам стандартных отчетов MOODLE можно отнести отсутствие отчетов, демонстрирующих сопоставление действий пользователя на курсе (временной аспект) и

получаемые оценки за эти действия, что не позволяет быстро выявить связи между поведением студента на курсе и его успеваемостью, недостаточная наглядность и функциональность, чтобы сделать практически полезные выводы [11].

Вместе с тем, в системе MOODLE накапливается информация о результатах обучения и после соответствующей обработки возможно выявить поведенческие стратегии в обучении и проследить их связь с характеристиками обучающихся.

Рассмотренный в качестве примера электронный курс «Исследование операций», который изучают студенты-бакалавры в весеннем семестре второго курса обучения, предполагает выполнение курсовой и шести лабораторных работ. Электронный курс по этой дисциплине содержит как теоретическую составляющую, так и компоненты, позволяющие проводить тестирование по изученным разделам, проверять и оценивать отчеты по курсовой и лабораторным работам. Так компонент электронного курса «Отчет по лабораторной работе», содержит поля: Изображение пользователя, Фамилия Имя Отчество, Статус, Оценка, Последнее изменение (ответ), Отчет в виде файла, Комментарии к ответу, Последнее изменение (оценка), Итоговая оценка.

Компонент курса «Отчет по лабораторной работе» фактически представляет собой таблицу, в которой представлена вся информация, зафиксированная и оцененная в процессе выполнения лабораторной работы студентами конкретной группы. Просмотр данных предполагает переход от одной строки к другой и возможность анализировать, насколько своевременно выполнялась работа конкретным студентом, какие замечания он получал по отчетам, как была оценена его работа. Вместе с тем, изучая таблицу с данными, сложно получить информацию о динамике выполнения работы по всей группе студентов, обратить внимание на детали, пропустить важную информацию. Также интересно соотнести информацию текущего контроля с оценкой, полученной конкретным студентом во время промежуточной аттестации, и насколько своевременно был сдан экзамен. Исходя из этого, был определен набор данных (таблица 1), который был использован для анализа.

Таблица 1. Структура данных

Имя переменной	Назначение	Тип переменной	Роль переменной
index	номер студента в списке	числовой	характеристика
date1	дата сдачи отчета по лабораторной работе 1	дата	характеристика
grade1	оценка отчета по лабораторной работе 1	числовой	характеристика
date2	дата сдачи отчета по лабораторной работе 2	дата	характеристика
grade2	оценка отчета по лабораторной работе 2	числовой	характеристика
date3	дата сдачи отчета по лабораторной работе 3	дата	характеристика
grade3	оценка отчета по лабораторной работе 3	числовой	характеристика
date4	дата сдачи отчета по лабораторной работе 4	дата	характеристика
grade4	оценка отчета по лабораторной работе 4	числовой	характеристика
date5	дата сдачи отчета по лабораторной работе 5	дата	характеристика

grade5	оценка отчета по лабораторной работе 5	числовой	характеристика
date6	дата сдачи отчета по лабораторной работе 6	дата	характеристика
grade6	оценка отчета по лабораторной работе 6	числовой	характеристика
exam	экзаменационная оценка	числовой	характеристика
option	своевременность сдачи экзамена	категориальный	цель

2. Программный продукт Orange Data Mining. Аналитическая система Orange – это программа с открытым исходным кодом для машинного обучения и визуализации данных, обладающая большим набором исследовательских функций.

Программный продукт Orange (рус. Оранж), разработан Лабораторией биоинформатики Люблянского университета, предназначен для интеллектуального анализа данных (ИАД), статистических исследований и визуализации данных. Компоненты аналитической платформы называются виджетами, и варьируются от минималистичной визуализации данных, выбора подмножеств и предварительной обработки до эмпирической оценки алгоритмов обучения и прогностического моделирования [12-14].

В программном обеспечении Orange Data Mining применяется визуальное программирование, которое реализуется удобным графическим интерфейсом. В рамках визуального программирования аналитические процедуры создаются путём связывания предопределенных или разработанных пользователем блоков (виджетов), в то время как, более квалифицированные пользователи могут использовать Orange в качестве программной библиотеки Python для манипулирования данными и создания новых блоков (виджетов).

Структурно Orange состоит из интерфейса Canvas, на который пользователь помещает виджеты и создает рабочий процесс анализа данных. Виджеты предлагают базовые функции, такие как чтение данных, отображение таблицы данных, выбор функций, предикторы обучения, сравнение алгоритмов обучения, визуализация элементов данных и т. д. Пользователь может интерактивно исследовать визуализации или передавать выбранное подмножество в другие виджеты.

3. Анализ образовательных данных средствами Orange Data Mining. Средствами Orange Data Mining построенасхема так называемого разведочного анализа данных, целью которого является, как правило, анализ основных свойств данных, нахождение в них общих закономерностей, распределений и аномалий. Схема приведена на рисунке 1.

В данном случае здесь задействованы Компоненты **Data Table** (Таблица данных), **Scatter Plot** (Точечный график), **Distributions** (Распределения), **Feature Statistics** (Статистика функций).

Разведочный анализ данных позволяет опровергнуть или подтвердить наши предположения относительно данных, выдвинуть новые гипотезы относительно того, что может произойти, если понимать, какие переменные находятся под контролем и какими рычагами можно воспользоваться для улучшения показателей, например, число экзаменов, сданных позже установленного срока. В проведенном исследовании в первую очередь рассматривается время выполнения работ и его влияние на итоговые результаты освоения дисциплины. Представляет интерес на первый взгляд, очевидная гипотеза: студенты, умеющие организовать свое время и, как следствие, выполняющие все задания вовремя, имеют более высокие конечные результаты. Далее дано пояснение схемы, использованной для анализа (рис. 1) и приведены полученные результаты. Следует отметить, что

предварительная обработка данных в приведенной схема не использована, т.к. в ней не было необходимости.

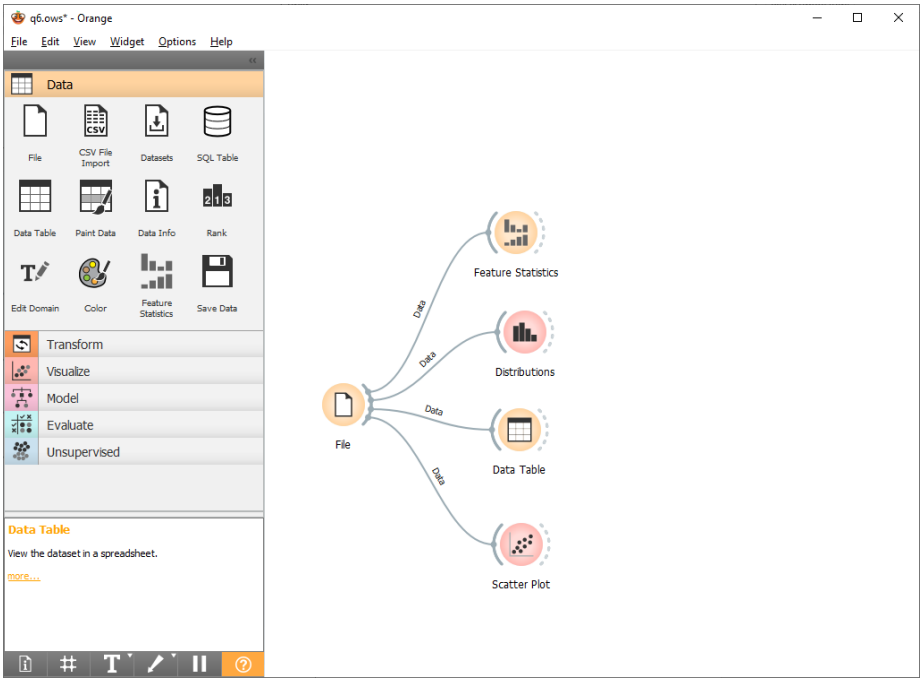


Рис. 1. Схема анализа данных в Orange Data Mining

Таблица данных (Data Table) – виджет принимает набор данных из входного файла и представляет их в виде таблицы. На рис. 2 показаны результаты использования компонента **Data Table** к анализируемым данным, структура которых показана в таблице 1.

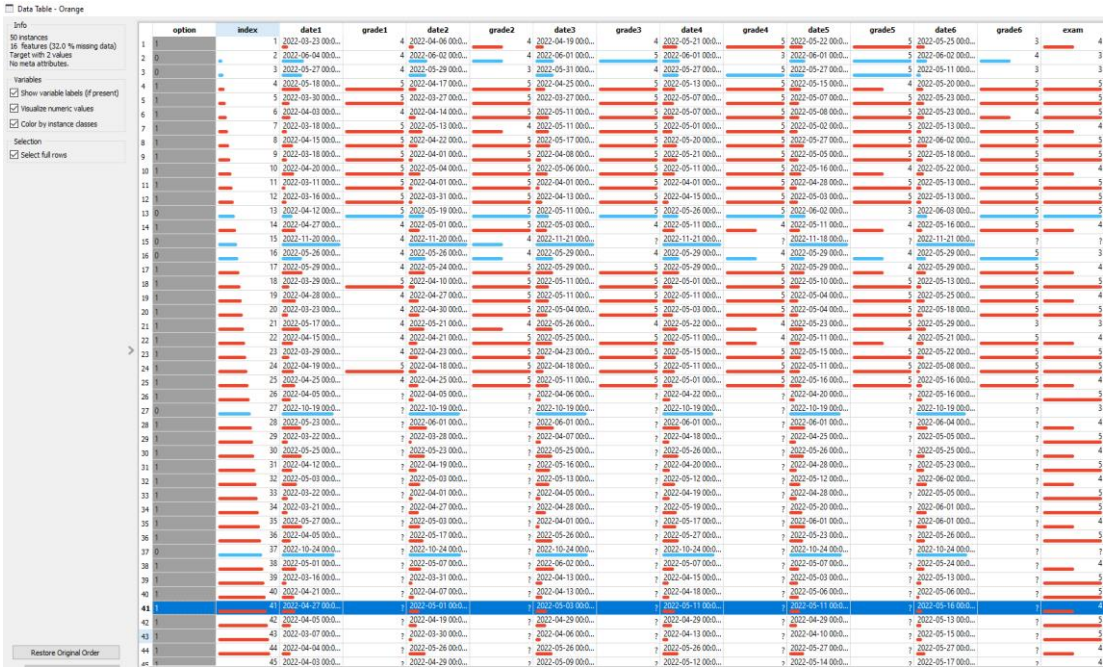


Рис. 2. Результаты вывода таблицы данных (виджет **Data Table**)

В левой части таблицы указано число анализируемых записей – 50. Т.к. переменная option **(**своевременность сдачи экзамена**)** определена как цель, все записи в таблице, соответствующие студентам, сдавшим экзамен не вовремя, подчеркнуты голубой чертой, записи студентов, сдавших экзамен вовремя, подчеркнуты красной. Просматривая таблицу, можно анализировать, как динамика выполнения работ повлияла на конечный результат. На рисунках 3-7 показаны результаты применения компонента **Distributions** для построения

диаграмм, демонстрирующих динамику сдачи отчетов по лабораторным работам 1-6 соответственно, единица измерения на графике одна неделя (1 week).

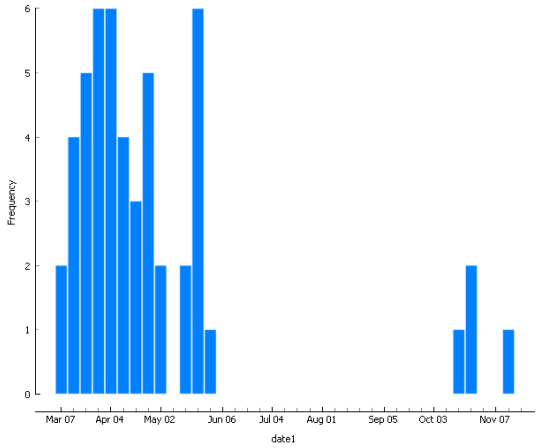


Рис. 3. Диаграмма времени сдачи отчетов по лабораторной работе 1

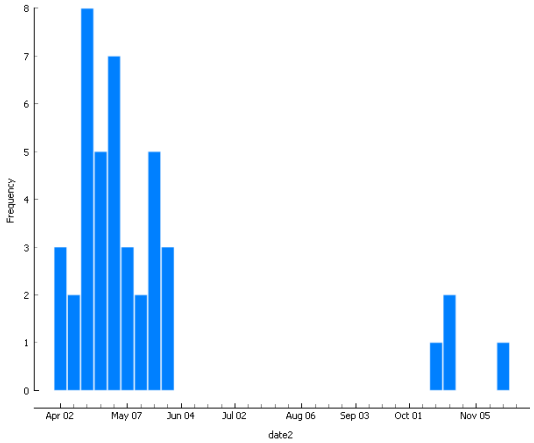


Рис. 4. Диаграмма времени сдачи отчетов по лабораторной работе 2

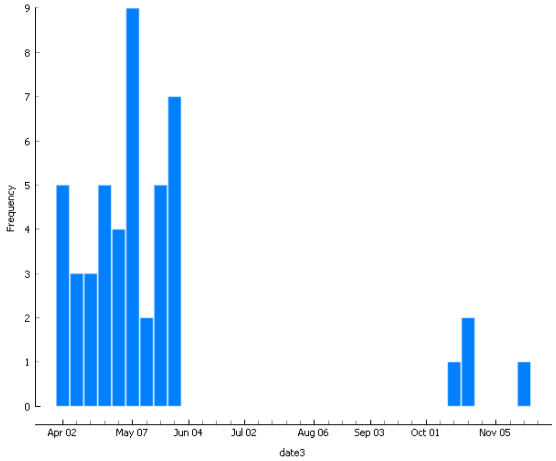


Рис. 5. Диаграмма времени сдачи отчетов по лабораторной работе 3

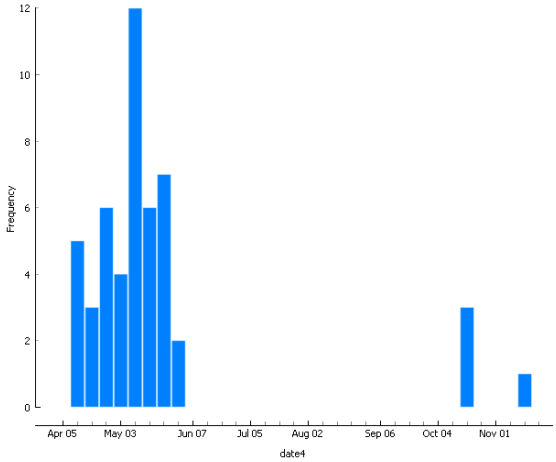


Рис. 6. Диаграмма времени сдачи отчетов по лабораторной работе 4

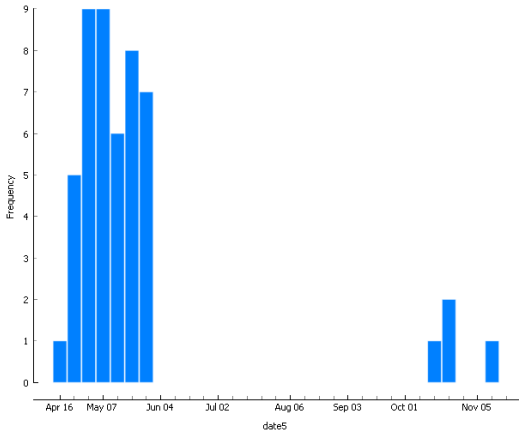


Рис. 7. Диаграмма времени сдачи отчетов по лабораторной работе 5

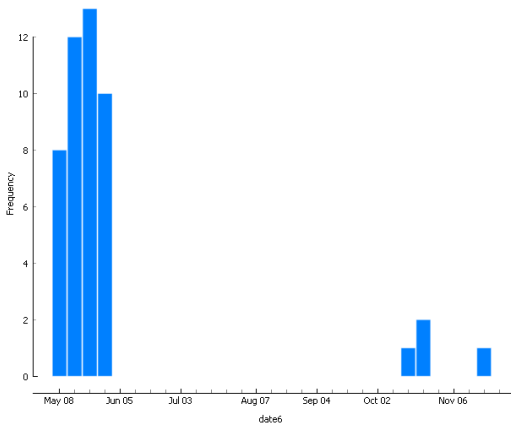


Рис. 8. Диаграмма времени сдачи отчетов по лабораторной работе 6

Scatter Plot выполняет визуализацию точечных графиков с предварительным анализом и интеллектуальными улучшениями визуализации данных. Очевидно, что основная цель – создать визуальную форму для лучшего и более эффективного понимания закономерностей, скрытых в данных.

Результаты построения точечного графика – применение виджета **Scatter Plot** – представлены на рис. 9. Как видно из рисунка, здесь фактически использованы три измерения: оси x, y и цвет. По оси x показана дата сдачи отчета по первой лабораторной работе **date1**, по оси y - дата сдачи отчета по второй лабораторной работе **date2**, цветом выделена оценка, полученная на экзамене. Рисунок демонстрирует вполне очевидный результат – студенты, раньше всех сдавшие отчеты, получили в основном отличные оценки.

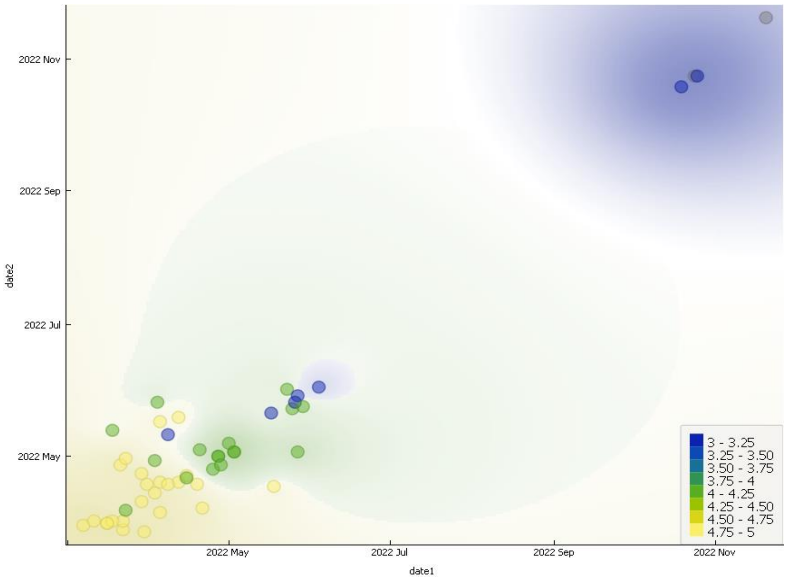


Рис. 9. Результат применения компонента **Scatter Plot**

Следующий из использованных виджетов – **Feature Statistics** дает информацию о текущем размере набора данных, количестве и типах функций. Фрагмент полученных результатов представлен на рис. 10. Измерение «цвет» в данном случае демонстрирует своевременность сдачи экзамена (переменная option). Аналогично выводу таблицы данных, красный цвет соответствует студентам, сдавшим экзамен вовремя, голубой – тем, кто сдал экзамен не вовремя. Таблица справа содержит статистические данные о каждой функции в наборе данных, т.к. на рисунке показаны характеристики переменных, имеющих тип дата, соответствующие значения имеют аналогичный тип. Последний столбец – количество пропущенных значений в данных, в приведенном примере нулевой.

4. Использование интеллектуального анализа данных для улучшения результатов текущей аттестации студентов. Полученные результаты позволяют визуально наблюдать текущую ситуацию работы студентов при изучении учебной дисциплины. Предлагается следующая последовательность действий: преподаватель по окончании учебного семестра собирает все данные хода изучения дисциплины: посещаемость студентов, сроки выполнения запланированных работ, оценки качества выполнения работ и др. и выполняет их интеллектуальный анализ. По результатам анализа рекомендуются изменения, которые необходимо привнести для качественного улучшения всех рассматриваемых характеристик процесса обучения. Возможные изменения показаны в терминах системы менеджмента качества, как совокупности взаимосвязанных и взаимодействующих элементов для руководства и управления процессом обучения.

Предлагаемая корректировка процесса изучения учебной дисциплины «Исследование операций» приведена в таблице 2. Источником указанных в таблице 2 несоответствий являются результаты проведенного исследования (рис. 3-8).

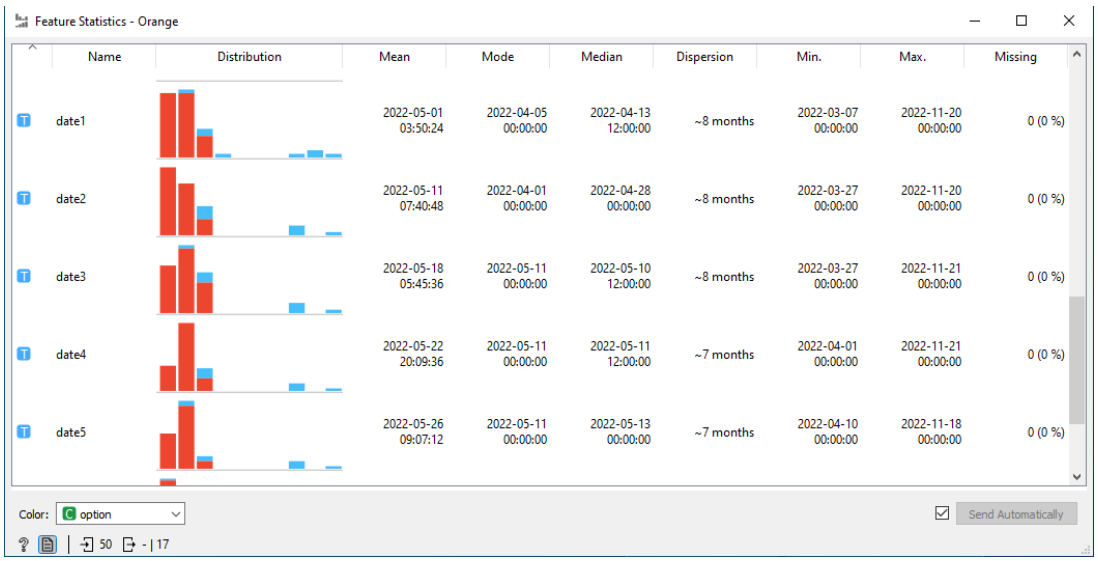


Рис. 10. Результат применения компоненты **Feature Statistics**

Таблица 2. Корректировка процесса изучения учебной дисциплины

Выявленные несоответствия	Корректирующие действия	Исполнитель корректирующих действий
Отчеты по лабораторным работам выполняются и сдаются существенно позже их выполнения	Установить и регистрировать в системе сроки сдачи работ	Преподаватель, ответственный за актуальность электронного курса в MOODLE
Большинство студентов сдают отчеты по лабораторным работам в конце учебного семестра	Определить контрольные точки сдачи работ в системе MOODLE	Преподаватель, ответственный за актуальность электронного курса в MOODLE
В действующей рабочей программе дисциплины (РПД) предполагается изучение разделов, на основании которых выполняются лабораторные работы фактически до конца учебного семестра.	Изменить последовательность изучения разделов дисциплины.	Составитель РПД
Отдельные студенты выполняют и сдают работы с существенным опозданием	Выявлять студентов, не выполняющих работы вовремя, и выяснять причины отставания	Преподаватель, ведущий лабораторные занятия
Студенты не умеют рационально использовать свое учебное время, имеют неравномерный темп обучения	Объяснять студентам необходимость повышения уровня самодисциплины	Дирекция института, кураторы

Заключение. Интеллектуальный анализ образовательных данных позволяет использовать данные об учебном процессе и его участниках для выявления скрытых, неочевидных, практически полезных и интерпретируемых знаний. Научная новизна предлагаемого подхода состоит в обосновании применения ИАОД, с использованием программы Orange Data Mining, для анализа организации учебного процесса с целью повышения его качества и рекомендаций по использованию интеллектуального анализа данных на основе выполненного исследования.

В ходе исследования была собрана схема разведочного анализа данных электронного курса «Исследование операций», изучаемого студентами-бакалаврами. Использован программный продукт с открытым исходным кодом Orange date mining. Визуальные данные, полученные программой Orange, указали на ряд негативных моментов, связанных как с текущей, так и промежуточной аттестацией студентов. В результате предложены корректирующие действия для улучшения качества образовательного процесса и, как следствие, повышения уровня текущей и промежуточной аттестации студентов.

Список источников

1. Оськин А.Ф. Применение интеллектуального анализа образовательных данных для прогнозирования успешности учебной деятельности / А.Ф. Оськин, Д.А. Оськин // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки, 2016. – № 4. – URL: https://elib.psu.by/bitstream/123456789/17089/5/8-12.pdf (дата обращения: 29.01.2023).
2. Дюк В. Data Mining / В. Дюк, А. Самойленко. – Издательство: Питер. Серия: Учебный курс, 2001. – 368 с.
3. Паклин Н.Б. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям / Н.Б. Паклин, В.И. Орешков. – СПб.: Изд.: Питер, – 2013. – 704 с.
4. Агаев Ф.Т. Прогнозирование успеваемости студентов в электронном образовании с использованием методов data mining / Ф.Т. Агаев, Г.А. Мамедова, Р.Т. Меликова. – URL: https://bik.sfu-kras.ru/ft/LIB2/ELIB/b74/free/i-489634964.pdf(дата обращения: 27.01.2023).
5. Трубач Г.Г. Использование анализа данных в образовании / Г.Г. Трубач // 77-я научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета. – Минск, 2020. – URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46204873 (дата обращения: 29.01.2023).
6. Белоножко П.П. Анализ образовательных данных: направления и перспективы применения / П.П. Белоножко, А.П. Карпенко, Д.А. Храмов // Интернет-журнал НАУКОВЕДЕНИЕ, 2017. – Том 9. – № 4. – URL: http://naukovedenie.ru/PDF/15TVN417.pdf (дата обращения: 29.01.2023).
7. Горлушкина Н.Н. Задачи и методы интеллектуального анализа образовательных данных для поддержки принятия решений / Н.Н. Горлушкина, И.Ю. Коцюба, М.В. Хлопотов // Образовательные технологии и общество, 2015. – Т. 18. – № 1. – С. 472-482. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/zadachi-i-metody-intellektualnogo-analiza-obrazova (дата обращения: 29.01.2023).
8. Зорина Н.В. Интеллектуальный анализ образовательных данных: ретроспектива и перспективы развития / Н.В. Зорина, В.М. Панченко, А.Л. Зорин // Научная дискуссия: вопросы математики, физики, химии, биологии, 2017. – М., Изд. «Интернаука». – № 5-6(38). – С. 42-52.
9. Оськин А.Ф., Оськин Д.А., Рачицкий О.И. Прогнозирование результатов учебной деятельности студентов-первокурсников с помощью интеллектуального анализа образовательных данных – URL: https://elib.psu.by/bitstream/123456789/21611/1/%d0%9e%d1%81%d1%8c%d0%ba %d0%b8%d0%bd-26-28.pdf (дата обращения: 21.01.2023).
10. Есин Т.Е. Глухих. И.Н. Использование методов интеллектуального анализа данных для получения знаний об образовательном процессе. – URL: https://core.ac.uk/download/pdf/226255621.pdf (дата обращения: 23.01.2023).
11. Тербушева Е.А. Аналитический потенциал платформы Moodle для мониторинга качества персонифицированного обучения / Е.А. Тербушева, К.Р. Пиотровская. // Общество Коммуникация. Образование, 2021. – Т. 12. – № 4. – С. 19-34. – DOI: 10.18721/JHSS.12402
12. Описание системы Orange. – URL: http://soware.ru:3000/products/orange (дата обращения: 29.01.2023).
13. Юсупов Н. Исследование методов классификации в программе Orange / Н. Юсупов, А. Савельева, О.Г. Леонова // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова, 2020. – Т. 1. – С. 27-30.

14. Юсупов Н. Исследование методов кластеризации в программе Orange / Н. Юсупов. // Молодежная школа-семинар по проблемам управления в технических системах имени А.А. Вавилова, 2020. – Т. 1. – С. 35-37.

Китаева Ольга Игоревна. *Старший преподаватель института информационных технологий и анализа данных Иркутского национального исследовательского технического университета, руководитель отдела по работе со студентами, сфера научных интересов: Интеллектуальный анализ образовательных данных.*

UDC 378.14.015.62
DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.016

Intelligent analysis of educational data of the educational discipline using the Orange program

Olga I. Kitaeva
Irkutsk National Research Technical University,
Russia, Irkutsk, *koi_fk@mail.ru*

Abstract. The article considers the concept of intellectual analysis of educational data and analyzes the educational data of the academic discipline of the university. The relevance of the topic is due to the need to improve the quality of the educational process. The main method is to obtain intellectually improved visual forms of data for a more effective understanding of the patterns hidden in them. The paper considers the possibilities of using the open source software product "Orange" for the implementation of data mining for the current and intermediate certification of bachelor students in the academic discipline “Operations Research”. As a result of the analysis, problems were identified in the process of mastering the discipline and ways to solve them were proposed.

Keywords: intellectual analysis of educational data, Orange, analysis of current student performance, visualization

References

1. Oskin A.F., Oskin D.A. Primenenie intellektualnogo analiza obrazovatelnyh dannyh dlya prognozirovaniya uspeshnosti uchebnoj deyatelnosti [Application of intellectual analysis of educational data to predict the success of educational activities]. Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya S. Fundamental'nyye nauki [Bulletin of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences], 2016, no. 4, available at: https://elib.psu.by/bitstream/123456789/17089/5/8-12.pdf (accessed: 01/29/2023).
2. Dyuk V., Samojlenko A. Data Mining: uchebnyj kurs [Data Mining: training course], 2001, Izdatel'stvo: Piter. Seriya: Uchebnyy kurs [Publisher: Piter. Series: Training course], 368 p.).
3. .Paklin N. B., Oreshkov V. I. Biznes-analitika: ot dannyh k znaniyam [Business Analytics: From Data to Knowledge] SPb., Piter [Piter], 2013, 704 p.
4. Agaev F. T., Mamedova G. A., Melikova R. T. Prognozirovanie uspevaemosti studentov v elektronnom obrazovanii s ispolzovaniem metodov data mining [Forecasting student performance in e-education using data mining methods]. Available at: https://bik.sfu-kras.ru/ft/LIB2/ELIB/b74/free/i-489634964.pdf (accessed: 01/27/2023).
5. Trubach G.G. Ispolzovanie analiza dannyh v obrazovanii [The use of data analysis in education, in the collection]: 77th scientific conference of students and graduate students of the Belarusian State University, 2020, available at: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46204873 (accessed: 01/29/2023).
6. Belonozhko P.P., Karpenko A.P., Hramov D.A. Analiz obrazovatelnyh dannyh: napravleniya i perspektivy primeneniya [Analysis of educational data: directions and prospects of application]. Internet-zhurnal NAUKOVEDENIYe [Internet journal NAUKOVEDENIE], 2017, vol. 9, no. 4, available at: http://naukovedenie.ru/PDF/15TVN417.pdf (accessed: 29/01/2023).
7. Gorlushkina N.N., Kocyuba I.Yu., Hlopotov M.V. Zadachi i metody intellektualnogo analiza obrazovatelnyh dannyh dlya podderzhki prinyatiya reshenij. [Tasks and methods of educational data mining for decision support]. Obrazovatel'nyye tekhnologii i obshchestvo [Educational technologies and society], 2015, vol. 18, no. 1, pp. 472-482, available at: https://cyberleninka.ru/article/n/zadachi-i-methody-intellektualnogo-analiza-obrazova (accessed: 01/29/2023).
8. Zorina N.V. Intellektualnyj analiz obrazovatelnyh dannyh: retrospektiva i perspektivy razvitiya [Intellectual analysis of educational data: retrospective and development prospects. Nauchnaya diskussiya: voprosy

matematiki, fiziki, khimii, biologii[Scientific discussion: questions of mathematics, physics, chemistry, biology], 2017, M.,Internauka, no. 5-6(38), pp. 42-52.

9. Oskin A.F., Oskin D.A., Rachickij O.I. Prognozirovanie rezultatov uchebnoj deyatelnosti studentov-pervokursnikov s pomoshyu intellektualnogo analiza obrazovatelnyh dannyh. [Forecasting the results of educational activity of first-year students using the intellectual analysis of educational data], available at: https://elib.psu.by/bitstream/123456789/21611/1/%d0%9e%d1%81%d1%8c%d0%ba%d0%b8%d0%bd-26-28.pdf (accessed: 21/01/2023).
10. Esin T.E., Gluhih I.N. Ispolzovanie metodov intellektualnogo analiza dannyh dlya polucheniya znanij ob obrazovatelnom processe. [Using data mining methods to gain knowledge about the educational process], available at: https://core.ac.uk/download/pdf/226255621.pdf (accessed 01/23/2023).
11. Terbusheva E.A., Piotrovskaya K.R. Analiticheskij potencial platformy Moodle dlya monitoringa kachestva personificirovannogo obucheniya [Analytical potential of the Moodle platform for monitoring the quality of personalized learning]. Obshchestvo Kommunikatsiya. Obrazovaniye [Society Communication. Education], 2021, vol. 12, no. 4, pp. 19-34, DOI: 10.18721/JHSS.12402.
12. Opisanie sistemy Orange [Description of the Orange system]. available at: http://soware.ru:3000/products/orange (accessed: 01/29/2023).
13. Yusupov N., Saveleva A., Leonova O.G. Issledovanie metodov klassifikacii v programme Orange [Study of classification methods in the Orange program]. Molodezhnaya shkola-seminar po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh imeni A.A. Vavilova [Youth school-seminar on control problems in technical systems named after A.A. Vavilov], 2020, vol. 1, pp. 27-30.
14. Yusupov N. Issledovanie metodov klasterizacii v programme Orange [Investigation of clustering methods in the Orange program]. Molodezhnaya shkola-seminar po problemam upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh imeni A.A. Vavilova [Youth school-seminar on control problems in technical systems named after A.A. Vavilov], 2020, vol. 1, pp. 35-37.

Kitaeva Olga Igorevna. *Senior lecturer at the institute of information technology and data analysis of the Irkutsk National Research Technical University, head of the student relations department, area of expertise: educational data mining.*

Статья поступила в редакцию 20.02.2023; одобрена после рецензирования 28.02.2023; принята к публикации 09.03.2023.
The article was submitted 02/20/2023; approved after reviewing 02/28/2023; accepted for publication 03/09/2023.

ПАМЯТИ НАФИСЫ ИСЛАМОВНЫ ЮСУПОВОЙ

Нафиса Исламовна Юсупова (1953-2023)

19 марта 2023 г. ушла из жизни наш друг и коллега, член программного комитета проводимой нами Байкальской Всероссийской с международным участием конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении», член редколлегии одноименного журнала, организатор зарубежных конференций, в которых мы с удовольствием и благодарностью участвовали.

Нафиса Исламовна родилась 26 января 1953 года в городе Прилуки Черниговской области в семье Ислама Юсуповича и Назии Фатыховны Юсуповых. Ее отец, И. Ю. Юсупов (1925–1991), участник Великой Отечественной войны, в то время военнослужащий, зам. командира полка дальней авиации по радиолокационному оборудованию, впоследствии вел научные исследования в области радиопротиводействия в НИИ Минобороны в Воронеже, после увольнения в запас стал профессором, создателем и руководителем кафедры автоматизированных систем управления в Уфимском ордена Ленина авиационном институте им. Серго Орджоникидзе (УАИ, с 1991 УГАТУ – Уфимский государственный авиационный технический университет).

В 1975 году Нафиса Исламовна с отличием окончила Воронежский ордена Ленина государственный университет им. Ленинского комсомола по специальности «радиофизика и электроника» и далее до конца жизни проработала в УАИ/УГАТУ. В 1980 году под научным руководством профессора Иллариона Мартемьяновича Хомякова защитила кандидатскую диссертацию по управлению летательными аппаратами в критических ситуациях. В 1985 году получила ученое звание доцента по кафедре технической кибернетики. В 1987–88 гг. стажировалась в Техническом университете Дрездена (Германская Демократическая Республика). В 1998 году защитила докторскую диссертацию по управлению сложными техническими системами в критических ситуациях (научный консультант профессор Барый Галеевич Ильясов). В том же году возглавила кафедру вычислительной математики и кибернетики и руководила ею до 2022 г. С 1989 по 2021 год она – бессменный декан факультета информатики и робототехники.

Профессор Н. И. Юсупова развивала научное направление в области интеллектуальных методов обработки информации и управления с приложениями в социальных, экономических и технических системах. Научный коллектив под ее руководством начал формироваться в середине 80-х гг. в ходе решения задач, связанных с построением моделей данных и

применением статистических методов машинного обучения при обработке информации с испытательных стендов по заказу НИИАП имени ак. Пилюгина. В дальнейшем, в 90-е годы, после исследовательских стажировок в университетах Германии, появились работы в области приложения интеллектуальных методов в различных предметных областях (эвристические и генетические алгоритмы для планирования траекторий многозвенных манипуляторов, нейросетевое моделирование для задач прогнозирования параметров экономического объекта, нечеткие модели в задачах предотвращения банкротства, регулирования транспортных потоков на перекрестках. В нулевые годы появляются первые совместные исследовательские работы с немецкими (Техническим университетом Дрездена, Технологическим университетом Карлсруэ, Свободным университетом Западного Берлина) и итальянскими (Университетом Тренто, Университет La Sapienca, Рим) университетами, и уфимские аспиранты в этих университетах. Эти исследования были поддержаны различными международными фондами. В соответствии с интересами отечественных заказчиков были работы по применению экспертных систем для психолого-педагогической поддержки обучаемых, при разработке паспортов безопасности промышленных объектов и др. В это же время в ее научной школе развивались подходы, связанные с построением онтологических моделей, многоагентным моделированием в информационных системах поддержки принятия решений. Появляются первые исследования в области семантического анализа слабоструктурированной информации. Обобщение опыта исследований нескольких десятилетий нашло отражение в докторских и кандидатских диссертациях ее учеников. Российские исследовательские разработки были поддержаны грантами по программам Министерства науки и образования РФ, хоздоговорами с предприятиями Уфы, с Государственным НИИ системного анализа Счетной палаты Российской Федерации, грантами по госзаданиям, Российского фонда фундаментальных исследований, Российского фонда гуманитарных исследований, Российского научного фонда.

Нафиса Исламовна в течение многих лет была организатором и председателем программного комитета международных конференций «Компьютерные науки и информационные технологии» – CSIT, «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений» – ITIDS, «Интеллектуальные технологии обработки информации и управления», «Российско-немецкий и немецко-российские семинары в области информационных технологий». Финансовая поддержка конференций осуществлялась различными российскими и немецкими фондами. Являлась координатором европейских проектов по программе Erasmus (с 2008 по последнее время), участником международных проектов по программам COPERNICUS, INTAS, AMETMASNOE.

Нафиса Исламовна была инициатором издания научного журнала «Системная инженерия и информационные технологии» и его главным редактором, на протяжении всей научной деятельности сама активно публиковалась. Имеет более 560 научных публикаций.

Научные исследования стимулировали успешную подготовку научных кадров. Под ее руководством защищены более 30 кандидатских и 4 докторских диссертации. Более 20 лет активно участвовала в деятельности диссертационных советов (председатель, член совета). В разные годы являлась экспертом РАН, членом экспертного совета РФФИ по информационным технологиям, членом Российской ассоциации искусственного интеллекта, сопредседателем Башкирского отделения Научного совета РАН по методологии искусственного интеллекта, членом Общества информатиков Германии.

Нафисе Исламовне были присвоены звания «Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации», «Заслуженный деятель науки Республики Башкортостан», «Заслуженный профессор УГАТУ»

Светлая память о Нафисе Исламовне Юсуповой навсегда сохранится в наших сердцах.