# ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ



Scientific journal

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

### Научный журнал

**№** 3 (27)



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 Вегеstneva О.G. Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ

Boukhanovsky A.V.Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМОBychkov I.V.Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАНWoern H.Вѐрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (КІТ)Voevodin V.V.Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ

Wolfengagen V.E.Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИGornov A.Y.Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАНGribova V.V.Грибова В.В., д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН

Groumpos P. Грумпос П., Греция, University of Patras

Zorina Т.G. Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси

Казаков А.Л., д.ф.-м.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН

Kalimoldaev M.N. Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ

Кагрепко А.Р. Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана Коmendantova N.Р. Комендантова Н.П., РhD, Австрия, Лаксенбург, IIASA 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 РАНOvtcharova J.Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (КІТ)Ророv G.T.Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет

Sidorov D.N. Сидоров Д.Н., д.ф-м.н., 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 РАНStylios C.Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of EpirusTaratukhin V.V.Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of MuensterKhamisov O.V.Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Ноdashinsky 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 СОРАН
Executive Editor	Выпускающий редак	тор	
Bakhvalova Z.A.		Бахвалова З.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
Editor Gaskova D.A.	Редактор	Гаськова Д.А.	к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СОРАН
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

#### Адрес учредителя, издателя и редакции

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

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

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.

Отпечатано в полиграфическом участке ИСЭМСО РАН СС ВУ

\*Подписка на журнал доступна со второго полугодия 2021г.

Дата выхода 30.09.2022 г. Тираж 100 экз. © Издательство ИСЭМ СО РАН

Цена свободная. (6+)

### Содержание

	Применение ме	етодов иску	сственного	интеллекта
--	---------------	-------------	------------	------------

	<b>Метус А.М., Морозов Р.В., Ноженков А.И.</b> Программные средства Интернет-платформы рейтингового оценивания качества жизни территорий	5
	<b>Пенькова Т.Г., Ноженкова Л.Ф.</b> Исследование территориальных кластеров макрорегиона на основе многомерного анализа показателей качества жизни (на примере Красноярского края)	15
	Просвиркина Т.Д., Ларшутин С.А., Бежаева О.Я., Гвоздев В.Е., Барудкина Е.Ю., Гвоздев Г.В. Оценка состояния распределенных систем методами математико-картографического моделирования на примере данных о заболеваемости ГЛПС на территории Республики Башкортостан	25
	<b>Сенашова М.Ю.</b> Пространственная структура генов фотосинтетической системы хлоропластов водорослей с точки зрения биоинформатики	34
	<b>Фаворская М.Н., Пахирка А.И.</b> Построение карт глубины при обнаружении презентационных атак в системах распознавания лиц	40
Ma	атематические и информационные технологии в энергетике	
	<b>Зорина Т.Г.</b> Атомная энергетика как одно из направлений устойчивого энергетического развития республики Беларусь	49
	<b>Еделева О.А., Стенников В.А., Зароднюк М.С.</b> Разработка методического подхода к оценке комплексного воздействия энерготехнологий на окружающую среду	68
	<b>Николаев А.А., Фискин Е.М., Фискина М.М.</b> Цифровая система мониторинга уровня воды открытых водоемов Байкальской природной территории на основе технологии ИИС «КУМИР-РЕСУРС» для объектов энергетики	84
	<b>Суджян А.М., Осипов А.М.</b> Применение компьютерных технологий на примере программного кода RELAP5 для расчетного воспроизведения экспериментов по изучению теплообмена в трубах с водой сверхкритического давления	95
	<b>Дранко О.И., Благодарный Е.В.</b> Моделирование разрушения стоимости российских энергетических компаний	104
Пр	рограммные системы и комплексы	
	<b>Исаева О.С., Кулясов Н.В., Исаев С.В.</b> Создание инструментов сбора данных для анализа аспектов безопасности Интернета вещей	113
	<b>Курносенко А.Е., Власов А.И.</b> Применение многоуровневой декомпозиции для создания цифрового двойника сборочного производства электронной аппаратуры	126
	<b>Ковалева Е.А., Иваньо Я.М.</b> Модуль «Планирование в условиях рисков» программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства»	135
	атематическое моделирование и его применение	
Ma		
Ma	<b>Клер А.М., Апанович Д.В.</b> Метод динамических расчетов элементов теплоэнергетических установок, сводящий решение систем дифференциальных уравнений в частных производных к решению задач линейного программирования	148
Ma		148 162
M	установок, сводящий решение систем дифференциальных уравнений в частных производных к решению задач линейного программирования Базилевский М.П., Караулова А.В. Исследование критериев нелинейности аддитивных	
Ma	установок, сводящий решение систем дифференциальных уравнений в частных производных к решению задач линейного программирования Базилевский М.П., Караулова А.В. Исследование критериев нелинейности аддитивных степенных регрессий Журов Д.П., Гресс О.А., Сидоров Д.Н. Методика идентификации параметров модели	162
Ma	установок, сводящий решение систем дифференциальных уравнений в частных производных к решению задач линейного программирования  Базилевский М.П., Караулова А.В. Исследование критериев нелинейности аддитивных степенных регрессий  Журов Д.П., Гресс О.А., Сидоров Д.Н. Методика идентификации параметров модели наведения для атмосферных черенковских телескопов IACT  Звонарев Д.А. Улучшение качества поиска штриховых кодов с помощью слабо-	162 174

	Content
Application of artificial intelligence methods	
Metus A.M., Morozov R.V., Nozhenkov A.I. Software tools of the Internet platform for rating assessment of life the quality of territories	5
<b>Penkova T.G., Nozhenkova L.F.</b> Study of territorial clusters of the macroregion based on multidimensional analysis of life quality indicators (in the case of the Krasnoyarsk region)	15
Prosvirkina T.D., Larshutin S.A., Gvozdev V.E., Bezhaeva O.Ya., Barudkina E.Yu., Gvozdev G.V. Estimates of the state of distributed systems by mathematical and mapping simulation methods on the example of HFRS disease data in the territory of the Republic Bashkortostan	· ;
<b>Senashova M.Yu.</b> Spatial structure of the genes of the algal chloroplasts photosynthetic system from the bioinformatics point of view	
<b>Favorskaya M.N., Pakhirka A.I.</b> Building depth maps for detection of presentation attacks in face recognition systems	40
Mathematical and information technologies in energy	
<b>Zoryna T.G.</b> Nuclear energy as one of the directions of sustainable energy development of the republic of Belarus	49
<b>Edeleva O.A., Stennikov V.A., Zarodnjuk M.S.</b> Development of a methodological approach to assessing the complex impact of energy technologies on the environment	68
<b>Nikolaev A.A., Fiskin E.M., Fiskina M.M.</b> Digital system for monitoring the water level of open reservoirs of the Baikal natural territory based on the technology of the IIS "KUMIR-RESOURCE" for energy facilities	
<b>Sujyan A.M., Osipov A.M.</b> Application of computer science on the example of the RELAP5 program code for the computational reproduction of experiments on the study of heat transfer in pipes with supercritical pressure water	
Dranko O.I., Blagodarnyy E.V. Modeling of the value destruction of Russian energy organizations	104
Software systems and complexes	
<b>Isaeva O.S., Kulyasov N.V., Isaev S.V.</b> Creating data collection tools to analyze security aspects Internet of Things	113
<b>Kurnosenko A.E., Vlasov A.I.</b> Using multilevel decomposition to create a digital twin of the electronic equipment assembly production	126
<b>Kovaleva E.A., Ivanyo Ya.M.</b> Module "Planning under risks" of the software package "Ecological and mathematical modeling of agricultural production"	135
Mathematical modeling and its application	
<b>Kler A.M., Apanovich D.V.</b> The method of dynamic calculations of elements of thermal power plants, which reduces the solution of systems of differential equations in partial derivatives to the solution of linear programming problems	
Bazilevskiy M.P., Karaulova A.V. Study of nonlinearity criteria for additive power regressions	162
<b>Zhurov D.P., Gress O.A., Sidorov D. N.</b> Technique for pointing model parameters estimation for imaging atmospheric Cherenkov telescopes	174
Zvonarev D.A. Barcodes detection improvement via weakly labeled data	184
<b>Bozhko A.N., Chernjaev R.V.</b> Linearization of redundant mechanical structures of complex technical systems	192
<b>Nguyen V.V., Repetckii O.V.</b> Prediction and optimization of fatigue life of an axial bladed disk with intentional mistuning	204

### Применение методов искусственного интеллекта

УДК 004.4:332.02

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.001

## Программные средства Интернет-платформы рейтингового оценивания качества жизни территорий

**Метус Анна Михайловна, Морозов Роман Викторович, Ноженков Александр Ильич** Институт вычислительного моделирования СО РАН,

Россия, Красноярск, metus@icm.krasn.ru

Аннотация. Представлено описание программных средств Интернет-платформы для рейтингового оценивания качества жизни территорий в разрезе реализации национальных проектов. Функционирование платформы основано на реализации оригинального метода интегрального аналитического оценивания качества жизни, который обеспечивает формирование комплексных оценок на основе территориально-ориентированной нормативной модели. Платформа обеспечивает пространственно-временной анализ результатов оценивания, картографический анализ и качественную интерпретацию полученных оценок. Аналитическая платформа представляет собой клиент-серверное приложение с web-интерфейсом. Практическим результатом работы является апробация платформы для оценивания качества жизни населения на территориях Красноярского края по данным Автоматизированной информационной системы мониторинга муниципальных образований. Применение аналитической Интернет-платформы позволяет обеспечить информационную поддержку задач планирования мероприятий и контроля достижения целевых показателей национальных проектов на муниципальном уровне.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, клиент-серверное приложение, качество жизни, рейтинговое оценивание

**Цитирование:** Метус А.М. Программные средства Интернет-платформы рейтингового оценивания качества жизни территорий / А.М. Метус, Р.В. Морозов, А.И. Ноженков // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2022. — N 3(27). — С. 5 - 14. — DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.001.

Введение. Стратегические задачи развития Российской Федерации с 2019 года реализуются посредством национальных проектов [1, 2]. Национальные проекты направлены на научно-технологическое и социально-экономическое развитие России, повышение качества жизни граждан, создание комфортных условий для их проживания и самореализации. На сегодняшний день утверждены четырнадцать национальных проектов, соответствующих отдельным направлениям научно-технологической и социальноэкономической деятельности [3]. С субъектами Российской Федерации заключены соглашения, в рамках которых регионы берут на себя обязательства по реализации программ национальных проектов с учетом своей региональной специфики [4]. В большинстве проектов Красноярского края на основании конкурсного региональных осуществляется участие муниципальных образований. Качество жизни населения муниципальных образований региона является мерой эффективности государственного, регионального и муниципального управления. Комплексный анализ качества жизни, учитывающий совокупность социальных и экономических условий, опирающийся на объективные количественные показатели, позволяет выявить приоритетные отрасли, перспективные и требующие дополнительного внимания территории, оценить потенциал для развития и сокращения неравенства в качестве жизни населения муниципальных образований. Для решения этих задач необходимо применение современных методов и программных инструментов.

В статье представлено программное обеспечение аналитической платформы рейтингового оценивания территорий. Целью создания интернет-платформы является реализация методического и программного обеспечения для мониторинга влияния

результатов реализации национальных проектов на повышение качества жизни населения в муниципальных образованиях региона. Интернет-платформа предназначена для формирования рейтинговых оценок качества жизни муниципальных образований на основе данных мониторинга и экспертных знаний. Платформа обеспечивает пространственновременной анализ результатов оценивания, картографический анализ и качественную интерпретацию полученных оценок. Апробация платформы выполнена на основе данных автоматизированной информационной системы мониторинга муниципальных образований (АИС ММО) для территорий Красноярского края [5].

1. Метод интегрального оценивания качества жизни территорий. Рейтинговое оценивание территорий выполняется с применением оригинального метода интегрального аналитического оценивания качества жизни. Метод обеспечивает формирование рейтинговых оценок для измерения качества жизни муниципальных образований в разрезе реализации национальных проектов [6-8]. Особенностью метода является формирование территориально-ориентированной нормативной модели на базе статистических данных и экспертных знаний о физико-географических и социально-экономических условиях территорий. Применение нормативной модели для расчета рейтинговых оценок позволяет учесть индивидуальные особенности муниципальных образований.

Нормативная модель включает иерархическую систему показателей, коэффициенты значимости показателей, нормативные значения показателей, коэффициенты чувствительности оценок. Показатели относятся к одному из двух типов: базовые показатели социально-экономического развития территорий, представляющие нижний иерархии, и комплексные, полученные путем агрегирования базовых показателей согласно соответствующих национальных проектов. Коэффициенты показателей учитывают особенности каждой территории и определяют относительный вклад показателей нижнего уровня иерархии в показатели верхнего уровня. Коэффициенты значимости определяются в соответствии с территориальными кластерами, в числе которых городские округа, муниципальные образования с крупными промышленными объектами, муниципальные образования с развитой сельскохозяйственной и лесопромышленной отраслью, отдаленные (северные) муниципальные образования. Нормативные значения применяются для расчёта оценок базовых показателей. Их диапазон задается с помощью статистических характеристик: медианы и среднеквадратического отклонения, рассчитанных на основе многолетних статистических данных. Коэффициенты чувствительности оценок позволяют регулировать скорость изменения оценок при отклонении фактических значений от заданного норматива.

Интегральные оценки комплексных показателей рассчитываются на основе оценок базовых показателей с учетом их коэффициентов значимости. Оценки базовых показателей характеризуют соответствие фактических значений нормативу и позволяют оценить степень изменения показателя по отношению к интервалу нормативных значений с учетом полярности показателей и чувствительности их оценок. На завершающем этапе выполняется качественная интерпретация оценок базовых и комплексных показателей по оценочным шкалам. Оценочные шкалы применяются для отображения количественных значений оценок показателей в их качественные логико-лингвистические значения. Например, для лингвистической переменной «Уровень качества жизни» задается множество значений: «Улучшенный», «Хороший», «Приемлемый», «Удовлетворительный», «Пониженный», «Низкий», «Критический». Оценочные шкалы строятся для всех оценок на основе применения аппарата нечёткой логики и метода нечёткой кластеризации.

Данный метод позволяет сформировать иерархию оценок в виде количественных характеристик качества жизни, провести сравнительный анализ территорий и, при

необходимости, детализировать оценки по отдельным показателям — национальным проектам и важнейшим сферам развития для выявления перспективных и проблемных направлений. Качественная интерпретация оценок обеспечивает возможность наглядной визуализации результатов оценивания на диаграммах и картограммах.

- **2. Архитектура аналитической платформы.** Платформа предназначена для мониторинга качества жизни в муниципальных образованиях региона и поддержки формирования рейтинговых оценок для измерения качества жизни в разрезе реализации национальных проектов. Платформа поддерживает решение следующих основных задач:
  - формирование нормативной модели на основе накопленных статистических данных о состоянии экономики и социальной сферы территорий, а также экспертных знаний о физико-географических характеристиках и особенностях социально-экономического развития территорий;
  - расчет и качественная интерпретация оценок показателей в соответствии с алгоритмами, предусмотренными методом интегрального оценивания;
  - наглядное визуальное представление полученных рейтинговых оценок.
     Для решения перечисленных задач платформа реализует обширный набор функций:
  - формирование и редактирование иерархической системы комплексных показателей;
  - определение значений элементов территориально-ориентированной нормативной модели: коэффициентов чувствительности и желаемого тренда для базовых показателей, коэффициентов значимости для базовых и промежуточных комплексных показателей с учетом типа территории;
  - обеспечение возможности просмотра сформированных моделей для каждого муниципального образования;
  - обеспечение агрегирования и детализации комплексных показателей по иерархии с учетом их коэффициентов значимости;
  - построение диаграмм для сравнительного анализа территорий по оценкам, или по фактическим значениям показателей в разрезе выбранного показателя и года;
  - построение графиков для анализа динамики развития территорий по фактическим и нормативным значениям показателей за выбранный период в разрезе выбранного показателя.
  - картографическое представление для пространственного анализа территорий в разрезе выбранного показателя и года с качественной интерпретацией оценок.

Разработанная аналитическая платформа представляет собой клиент-серверное приложение с web-интерфейсом (рисунок 1).

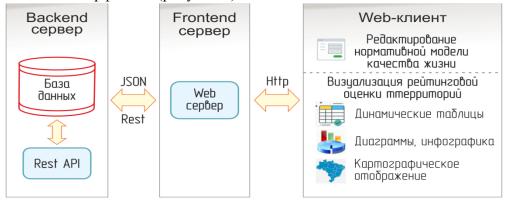


Рис. 1. Архитектура аналитической платформы

Серверная сторона платформы состоит из backend-сервера и frontend-сервера. В текущей реализации платформы они физически размещаются на одном хосте. Backend-

сервер содержит объектно-реляционную систему управления базами данных PostgreSQL, которая обеспечивает консолидацию данных из внешних источников и их анализ, поддерживает унифицированное представление данных, необходимое для функционирования аналитической платформы. На стороне СУБД реализованы алгоритм расчета нормативных значений показателей, алгоритм расчета оценок показателей, алгоритм нечеткой кластеризации для качественной интерпретации оценок [8].

Структура базы данных спроектирована в соответствии с требованиями метода интегрального оценивания качества жизни муниципальных образований и обеспечивает работу с нормативной моделью, базовыми и интегральными показателями, рейтинговыми оценками и их визуальными представлениями (рисунок 2).

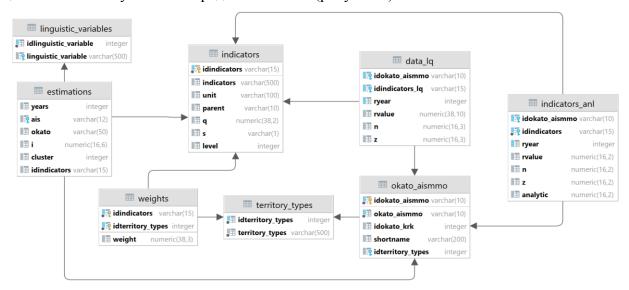


Рис. 2. Структура базы данных аналитической платформы

База данных предусматривает хранение объектов различных типов: статистических данных, справочников, расчетных показателей и экспертных данных. Исходные статистические данные выгружаются из АИС ММО в текстовом формате и импортируются с помощью специальных процедур в таблицу *data\_lq*.

Основные справочники, используемые в системе: *okato\_aismmo* – классификатор административно-территориального деления; *territory\_types* – справочник типов территорий; *indicators* – справочник показателей, который содержит перечень базовых показателей, перечень национальных проектов и группировку национальных проектов по направлениям социально-экономического развития экономики и социальной сферы; *linguistic\_variables* – справочник значений лингвистических шкал. Результаты расчета оценок и их качественной интерпретации размещаются в таблице *estimations*. Таблицы *weights*, *indicators* содержат экспертные оценки нормативной модели, используемые для расчётов оценок показателей качества жизни.

Для предоставления доступа к данным из базы реализован RESTful API интерфейс с помощью хорошо зарекомендовавшего себя приложения PostgREST. PostgREST – это вебсервер с открытым исходным кодом для работы с базой данных PostgreSQL по API. По словам авторов приложения, решение представляет собой альтернативу ручному CRUD-программированию [9]. С его помощью не нужно разрабатывать бизнес-логику, усложняющую структуру базы данных, и заниматься объектно-реляционным отображением данных (ORM mapping). PostgREST реализован на языке Haskell, распространяется по свободной лицензии и имеет обширное сообщество и поддержку. Сегодня PostgREST активно используют в продакшн-версиях таких больших проектов, как аналитический

инструмент от Oracle Moat, платформа iAdvize и система для формирования графиков Imagecharts. Для PostgREST разработаны различные расширения, в том числе для OAuth, websocket и nginx. PostgREST способен обрабатывать запросы ко всем представлениям и таблицам схемы базы данных.

Frontend-сервер содержит web-сервер Apache, который обеспечивает реализацию функциональных задач платформы, построение и отображение пользовательского интерфейса, обработку пользовательских запросов. Основное web-приложение размещается на стороне web-сервера. Обмен данными с Backend-сервером осуществляется в формате JSON посредством HTTP-запросов.

3. Реализация интерфейсной части платформы. Клиентская сторона обеспечивает представление информации, взаимодействие с пользователем через браузер и обмен данными с сервером с помощью протокола НТТР. Клиентская часть платформы реализована на языке JavaScript с использованием библиотеки jQuery, библиотеки интерфейсных компонентов DevExtreme и библиотеки Leaflet для работы с интерактивной картой. jQuery обеспечивает совместимость со всеми основными браузерами и простой доступ к структуре web страницы благодаря селекторам в стиле CSS. DevExtreme предоставляет обширную коллекцию пользовательских компонентов (виджетов) с высокой производительностью и встроенными функциями для взаимодействия с пользователем. Leaflet — одна из наиболее популярных легковесных картографических библиотек, предназначенная для работы с геоданными на веб-сайтах.

Создание и редактирование нормативной модели реализовано с использованием компонентов *TreeList и DataGrid*. Компонент *TreeList* представляет собой дерево с колонками дополнительной информации для элементов дерева. Компонент *DataGrid* представляет собой плоскую таблицу. Компоненты обеспечивают сортировку данных, фильтрацию и поиск, постраничную разбивку больших данных, редактирование и валидацию вводимых пользователем значений. На рисунке 3 показано формирование иерархической системы показателей качества жизни.

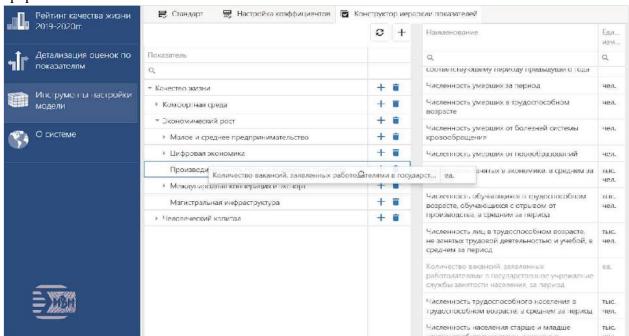


Рис. 3. Формирование иерархии комплексного показателя «Качество жизни»

Экземпляр компонента *DataGrid* (справа) содержит полный перечень базовых показателей качества жизни, доступных в базе данных. Экземпляр компонента *TreeList* (слева) содержит иерархию показателей качества жизни, позволяет добавлять базовые

показатели путем «перетаскивания» мышью и создавать уровни их группировки, при этом обеспечивается уникальность показателей в иерархии. Система показателей — единая для всех территорий региона. Состав показателей может расширяться и группироваться в соответствии с задачами территориального управления.

После формирования иерархии задаются значения остальных параметров нормативной модели. На рисунке 4 показано определение значений коэффициентов чувствительности, желаемых трендов и коэффициентов значимости показателей.

	Рейтинг качества жизни	Стандарт	<b>Ж</b> Настройка коэффициентов	В Конс	груктор	иерархи	ии показателей					
	2019-2020гг.			Единицы измере	Коэ	Же	Коэффициенты значимости показателей					
Детализация оценок по показателям		V			чув	тре	Городские округа	Промышленн территории	Сельхоз. и лесопром. территории	Отдалённые и северные территории		
_		Q		Q	Q	-	Q	Q	Q	Q		
	Инструменты настройки модели	▼ Комфортная среда	1				0.35	0.3	0.3	0.3		
	модели	<ul><li>Экология</li></ul>					0.4	0.2	0.1	0.2		
(F)	О системе	▼ Жилье и городс				0.4	0.5	0.5	0.6			
		Объем отпуск	тыс. Гкал	1.5	+	0.05	0.05	0.05	0.17			
		электрическої	ичина потребления й энергии в многоквартирных те на 1 проживающего	кВт.ч	1.5	+	0.05	0.05	0.05	0.1		
		Объем отпуск	тыс. куб. м.	1.5	+	0.05	0.05	0.05	0.15			
		Общая площа форм собстве	дь жилищного фонда всех нности	тыс. кв. м.	1	+	0.1	0.08	0.08	0.1		
		качестве нужд	емей, состоящих на учете в дающихся в жилых на конец периода	ед.	0.8	-	0.1	0.12	0.12	0.08		
			емей, получивших жилые улучшивших жилищные риод	ед.	0.5	+	0.15	0.17	0.17	0.1		
		предоставлен	в, направленный на ие социальной поддержки по и коммунальных услуг	тыс. руб.	0.8	+	0.15	0.17	0.17	0.1		

Рис. 4. Определение коэффициентов значимости и других экспертных параметров

Экземпляр компонента *TreeList* содержит иерархию показателей качества жизни и обеспечивает контроль вводимых значений в столбцах дополнительной информации. Необходимо определить коэффициенты значимости показателей в интервале [0:1] в зависимости от вклада показателя в показатель вышестоящего уровня для каждого территориального кластера. Для территорий Красноярского края выделены четыре территориальных кластера: городские округа, муниципальные образования с крупными промышленными объектами, муниципальные образования с развитой сельскохозяйственной и лесопромышленной отраслью, отдаленные (северные) муниципальные образования. Дополнительно, для базовых показателей необходимо определить коэффициенты чувствительности в интервале (0:3] и задать положительный, или отрицательный тренд знаками «+» и «-» соответственно.

Расчет оценок показателей выполняется на основе сформированной нормативной модели. Исследование полученных оценок реализовано с использованием компонента *PivotGrid*. Компонент *PivotGrid* представляет собой кросс-таблицу со сложной горизонтальной и вертикальной шапкой. *PivotGrid* обеспечивает агрегирование, детализацию оценок показателей и сортировку территорий или показателей по величине оценки. На рисунке 5 показаны оценки показателей качества жизни, агрегированные до уровня национальных проектов в соответствии с коэффициентами значимости.

Экземпляр компонента *PivotGrid* содержит иерархию показателей в горизонтальной шапке. В области данных показаны оценки и весовые коэффициенты показателей для территорий Красноярского края.

Наглядное визуальное представление полученных оценок обеспечивается с помощью диаграмм, графиков и картограмм.

	Рейтинг качества жизни	<b>₽</b> Кросс-таблица	<b>П</b> Диаграммы	Kaj	рта								
	2019-2020гг.		▼ Комфортная среда						Комфортная среда		▼ Человеческий капитал		
	Детализация оценок по		<ul> <li>Безопасные качественные автомобильные дороги</li> </ul>		<ul> <li>Жилье и городская среда</li> </ul>		<ul><li>Экология</li></ul>		Bcero		<ul> <li>Демография</li> </ul>		▶ Здравоохр
	показателям		Оценка	Вес	Оценка	Bec	Оценка	Bec	Оценка	Вес	Оценка	Вес	Оценка
	Инструменты настройки	Абанский район	0,868	0.4	1,002	0.5	1,176	0.1	0,966	0.3	1,111	0.25	1,068
	модели	Ачинск	1,181	0.2	1,109	0.4	1,128	0.4	1,131	0.35	1,116	0.3	1,007
<b>\$</b>	О системе	Ачинский район	1,001	0.4	1,191	0.5	0,751	0.1	1,071	0.3	0,287	0.25	0,938
		Балахтинский район	-1,586	0.4	1,056	0.5	1,044	0.1	-0,002	0.3	1,098	0.25	1,073
		Березовский район	1,000	0.4	0,966	0.5	-60,754	0.1	-5,192	0.3	1,465	0.25	1,186
		Бирилюсский район	1,121	0.4	1,032	0.5	1,097	0.1	1,074	0.3	1,056	0.25	1,009
	_	Боготол	1,150	0.2	1,048	0.4	1,001	0.4	1,050	0.35	0,759	0.3	1,039
		Боготольский район	1,142	0.4	1,105	0.5	0,969	0.1	1,106	0.3	0,847	0.25	0,969
	_	Богучанский район	0,964	0.3	1,078	0.5	1,018	0.2	1,032	0.3	1,006	0.3	0,899

Рис. 5. Кросс-таблица иерархии оценок показателей

Построение диаграмм для сравнительного анализа территорий по оценкам, или по фактическим значениям показателей в разрезе выбранного показателя и года реализовано с использованием компонентов *BarChart* и *LineChart*. Компонент *BarChart* представляет столбчатые диаграммы, компонент *LineChart* представляет линейный график (рисунок 6). Компоненты обеспечивают интерактивное изменение масштаба графика с помощью мыши и всплывающих подсказок.

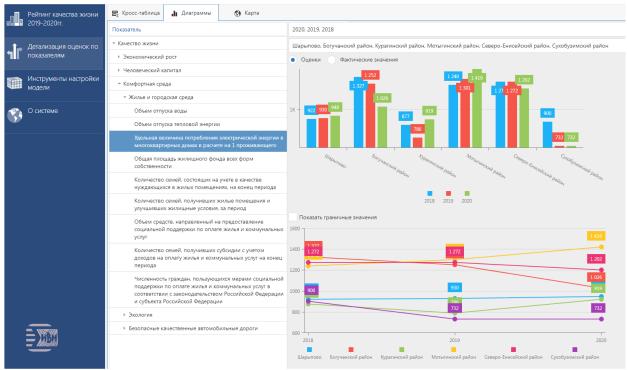


Рис. 6. Визуальное представление оценок

На рисунке 6 слева представлена система показателей качества жизни муниципальных образований. Графические компоненты позволяют сравнивать фактические значения и оценки выбранного показателя в разрезе территорий и года. В области построения графиков предусмотрены фильтры для выбора территорий и лет.

Картограмма позволяет привязать оценки к геоданным и наглядно визуализировать качественную интерпретацию оценок. На рисунке 7 показана качественная интерпретация интегральной оценки комплексного показателя качества жизни для муниципальных образований Красноярского края.

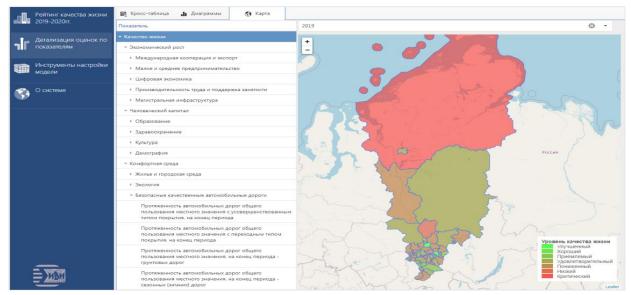


Рис. 7. Качество жизни в муниципальных образованиях Красноярского края

Дерево показателей позволяет получить картограмму для любого выбранного комплексного, или базового показателя. Предусмотрена также возможность выбора года. На рисунке показана качественная интерпретация интегральной оценки комплексного показателя «Качество жизни» по данным за 2019 год. Большинство муниципальных образований Красноярского края демонстрируют пониженный и удовлетворительный уровень качества жизни. Самые большие по площади северные территории получили оценку качества жизни «критическая». Платформа предоставляет возможность детализации комплексного показателя любого уровня, что позволяет определить первопричины текущего состояния территорий и направления развития.

Заключение. Представленная аналитическая платформа оценивания качества жизни населения муниципальных образований регионов предназначена для информационно-аналитической поддержки принятия решений в территориальном управлении. Рейтинговое оценивание позволяет выполнять сравнительный анализ муниципальных образований по качеству жизни населения и исследовать состояние территорий, требующих повышенного внимания. Разработано программное обеспечение интернет-платформы. В основу положена программная реализация метода формирования рейтинговых оценок для измерения качества жизни в муниципальных образованиях региона в разрезе реализации национальных проектов для выявления проблемных и перспективных направлений экономики и социальной сферы территорий. Выполнена апробация платформы для оценивания качества жизни населения на территориях Красноярского края. Применение аналитической интернет-платформы позволяет обеспечить информационную поддержку задач планирования мероприятий и контроля достижения целевых показателей национальных проектов на муниципальном уровне.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта N 20-47-242910.

### Список источников

- 1. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» // Президент России: официальный сайт, 2018. URL: http://kremlin. ru/events/president/news/57425 (дата обращения 07.06.2022).
- 2. Указ Президента Российской Федерации от 21.07.2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» // Президент России: официальный сайт, 2020. URL: http://www.kremlin.ru/acts/news/63728 (дата обращения 07.06.2022).

- 3. Национальные проекты России // Национальные проекты: официальный сайт, 2022. URL: https://национальныепроекты.pф/projects (дата обращения 11.07.2022).
- 4. Постановление Правительства РФ от 31.10.2018 г. № 1288 «Об организации проектной деятельности в Правительстве Российской Федерации» // Консультант, 2018. URL: http://www.consultant.ru/document/cons\_doc\_LAW\_310151/ (дата обращения: 07.06.2022).
- 5. Автоматизированная система мониторинга муниципальных образований. URL: http://aismmo.ru (дата обращения 29.03.2022).
- 6. Nozhenkova L., Penkova T., Morozov R., Nozhenkov A. Conception of life quality estimation of the municipal territories in the context of national project implementation. CEUR Workshop Proceedings. "SibDATA 2021 Short Paper Proceedings of the 2nd Siberian Scientific Workshop on Data Analysis Technologies with Applications", 2021, pp. 98-103.
- 7. Пенькова Т.Г. Метод построения территориально-ориентированной нормативной модели для оценивания качества жизни с учетом спецификации территорий (на примере Красноярского края / Т.Г. Пенькова, А.М. Метус, В.В. Ничепорчук и [др.] // Информатизация и связь, 2021. № 5. С. 39-46. DOI:10.34219/2078-8320-2021-12-5-39-46.
- 8. Пенькова Т.Г., Метус, А.М., Ничепорчук В.В., Морозов Р.В. Проектирование интернет-платформы для формирования рейтинговых оценок качества жизни муниципальных образований региона / Т.Г. Пенькова, А.М. Метус, В.В. Ничепорчук и [др.] // Информатизация и связь, 2022. № 1. С. 82-87. DOI: 10.34219/2078-8320-2022-13-1-82-87.
- 9. PostgREST Documentation. PostgREST Documentation, 2022, available at: https://postgrest.org/en/stable/index.html (accessed: 29.03.2022).

**Метус Анна Михайловна.** Программист І категории, отдел прикладной информатики Института вычислительного моделирования СО РАН. Основные направления исследовани: методы и технологии интеллектуального анализа данных, базы данных, информационные системы. AuthorID: 847927, SPIN-код: 6760-0584, ORCID: 0000-0003-0547-5999, metus@icm.krasn.ru, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44.

**Морозов Роман Викторович.** К.т.н., научный сотрудник Института вычислительного моделирования СО РАН. Основные направления исследований лежат в области разработки методов представления и структурирования знаний, технологий экспертных систем, анализа данных, AuthorID: 601089, ORCID: 0000-0001-5092-1586, frozzen@icm.krasn.ru, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44.

**Ноженков Александр Ильич.** К.т.н. научный сотрудник отдела прикладной информатики Института вычислительного моделирования СО РАН, AuthorID: 601088, ORCID: 0000-0001-6887-364X, alex\_n@icm.krasn.ru, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44.

UDC 004.4:332.02

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.001

### Software tools of the Internet platform for rating assessment of life the quality of territories

### Anna M. Metus, Roman V. Morozov, Alexander I. Nozhenkov

Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russsia, Krasnoyarsk, *metus@icm.krasn.ru* 

Annotation. This paper presents the software tools of the Internet platform for rating assessment of the life quality of territories in the context of thenational projects implementation. The platform functioning is based on the original method of integrated analytical assessment of the life quality, which provides the formation of comprehensive assessments using a geographically-oriented normative model. The platform provides spatio-temporal analysis of assessment results, cartographic analysis and qualitative interpretation of the obtained assessments. The analytical platform presents a client-server application with a web interface. The practical result of the work is an implementation of platform for assessing the life quality of the population in the Krasnoyarsk Region according to data provided by Automated Information System for Municipalities Monitoring. Application of the analytical Internet platform makes it possible to provide information support for the tasks of planning events and monitoring the achievement of national projects target indicators at the municipal level.

**Keywords:** software, client-server application, life quality, rating estimation

**Acknowledgements:** The research was funded by RFBR, Krasnoyarsk Territory and Krasnoyarsk Regional Fund of Science, project number 20-47-242910.

### References

- 1. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 07.05.2018 № 204 «O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda [Decree of the President of the Russian Federation of 07.05.2018 No. 204 "On national goals and strategic objectives for the development of the Russian Federation for the period up to 2024]. Prezident Rossii: ofitsial'nyy sayt [President of Russia: official website], available at: http://kremlin.ru/events/president/news/57425 (accessed 07 June 2022).
- 2. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 21.07.2020 no. 474 «O natsional'nykh tselyakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda» [Decree of the President of the Russian Federation of July 21, 2020 no. 474 "On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030"]. Prezident Rossii: ofitsial'nyy sayt [President of Russia: official website], available at: http://www. kremlin. ru/acts/news/63728 (accessed 07 June 2022).
- 3. Natsional'nyye proyekty Rossii [National projects of Russia]. Natsional'nyye proyekty: ofitsial'nyy sayt [National projects: official site], available at: https://национальныепроекты.рф/projects (accessed 07 November 2022).
- 4. Postanovleniye Pravitel'stva RF ot 31.10.2018 no. 1288 «Ob organizatsii proyektnoy deyatel'nosti v Pravitel'stve Rossiyskoy Federatsii» [Decree of the Government of the Russian Federation of October 31, 2018 No. 1288 "On the organization of project activities in the Government of the Russian Federation"], available at: http://www.consultant.ru/document/cons\_doc\_LAW\_310151/ (accessed 07 June 2022).
- 5. Avtomatizirovannaya sistema monitoringa munitsipal'nykh obrazovaniy [Automated monitoring system for municipal territories], available at: http://aismmo.ru (accessed 29 March 2022).
- 6. Nozhenkova L., Penkova T., Morozov R., Nozhenkov A. Conception of life quality estimation of the municipal territories in the context of national project implementation. CEUR Workshop Proceedings. "SibDATA 2021 Short Paper Proceedings of the 2nd Siberian Scientific Workshop on Data Analysis Technologies with Applications", 2021, pp. 98-103.
- 7. Penkova T.G., Metus, A.M., Nicheporchuk V.V., Nozhenkov A.I. Metod postroyeniya territorial'no-oriyentirovannoy normativnoy modeli dlya otsenivaniya kachestva zhizni s uchetom spetsifikatsii territoriy (na primere Krasnoyarskogo kraya) [Method for constructing a territorial-oriented normative model for estimation of the life quality taking into account the territories specification (in the case of Krasnoyarsk region)]. Informatizatsiya i svyaz' [Informatization and communication], 2021, no 5, pp. 39-46, DOI:10.34219/2078-8320-2021-12-5-39-46.
- 8. Penkova T.G., Metus, A.M., Nicheporchuk V.V., Morozov R.V. Proyektirovaniye internet-platformy dlya formirovaniya reytingovykh otsenok kachestva zhizni munitsipal'nykh obrazovaniy regiona [Design of an analytical internet platform for rating estimation of the municipal territories life quality]. Informatizatsiya i svyaz' [Informatization and communication], 2022, no 1, pp. 82-87, DOI: 10.34219/2078-8320-2022-13-1-82-87.
- 9. PostgREST Documentation, available at: https://postgrest.org/en/stable/index.html (accessed 29 March 2022).

Metus Anna Mikhailovna. Programmer of the 1st category, Department of Applied Informatics, Institute of Computational Modeling, SB RAS. Main areas of research: methods and technologies of data mining, databases, information systems. AuthorID: 847927, SPIN code: 6760-0584, ORCID: 0000-0003-0547-5999, metus@icm.krasn.ru, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, building 44.

Morozov Roman Viktorovich. Candidate of Technical Sciences, Researcher at the Institute of Computational Modeling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The main areas of research lie in the development of methods for representing and structuring knowledge, expert system technologies, data analysi. AuthorID: 601089, ORCID: 0000-0001-5092-1586, frozzen@icm.krasn.ru, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, building 44.

Nozhenkov Alexander Ilyich. Ph.D. Researcher, Department of Applied Informatics, Institute of Computational Modeling SB RAS, AuthorID: 601088, ORCID: 0000-0001-6887-364X, alex\_n@icm.krasn.ru, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, building 44.

Статья поступила в редакцию 05.08.2022; одобрена после рецензирования 06.09.2022; принята к публикации 16.09.2022.

The article was submitted 08/05/2022; approved after reviewing 09/06/2022; accepted for publication 09/16/2022.

УДК 332.12:004.02

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.002

## Исследование территориальных кластеров макрорегиона на основе многомерного анализа показателей качества жизни (на примере Красноярского края)

### Пенькова Татьяна Геннадьевна, Ноженкова Людмила Федоровна

Институт вычислительного моделирования СО РАН,

Россия, Красноярск, penkova\_t@icm.krasn.ru

Аннотация. Выполнено исследование территориальных кластеров макрорегиона с применением методов многомерного анализа – анализа главных компонент и кластерного анализа – к данным, характеризующим качество жизни населения на уровне муниципальных образований Красноярского края. В разрезе показателей качества жизни определены ключевые характеристики и особенности существующих территориальных кластеров региона. На основе анализа фактических значений показателей и расчётных интегральных оценок качества жизни выполнена кластеризация территорий, определены принципы распределения муниципальных образований по кластерам. Результаты исследования позволили выявить особенности социально-экономического развития муниципальных образований, определить перспективные и проблемные направления экономики и социальной сферы, что дает возможность более эффективно планировать и проводить стратегические мероприятия по повышению качества жизни на территориях Красноярского края, используя преимущества кластерного подхода.

**Ключевые слова:** территориальные кластеры, многомерный анализ, показатели качества жизни, макрорегион

**Цитирование:** Пенькова Т.Г. Исследование территориальных кластеров макрорегиона на основе многомерного анализа показателей качества жизни (на примере Красноярского края) / Т.Г. Пенькова, Л.Ф. Ноженкова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 3(27). − С. 15-24. − DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.002.

Введение. Улучшение качества жизни – главнейшая стратегическая задача органов государственной власти всех уровней. С целью повышения уровня жизни, создания опережающего социально-экономического прогресса и обеспечения сбалансированности пространственного развития экономики и социальной сферы, в соответствии с Указами Президента Российской Федерации, с 2019 года в нашей стране реализуются национальные проекты [1, 2]. Помимо федеральных министерств, ответственность за достижение плановых показателей, направленных на обеспечение экономического роста, создание комфортной среды и повышение конкурентоспособности регионов возложена на органы власти субъектов Российской Федерации. С учётом специфики территорий формируются региональные проекты, создаются территориальные и ведомственные управленческие структуры, планирующие мероприятия и контролирующие результативность проектов [3]. При этом обширность территорий, неоднородность природных условий, социально-экономических процессов и инфраструктурного развития обусловливают необходимость применения кластерного подхода к управлению развитием территорий. Кластерная политика также рассматривается как одно из условий развития конкурентоспособных регионов за счет создания условий для внедрения инноваций. Территориальные кластеры представляют инструмент реализации национальных и региональных стратегий развития, позволяющий повысить эффективность взаимодействия между предприятиями бизнеса, органами управления, образовательными и научными учреждениями [4, 5]. Поэтому важной задачей является исследование принципов формирования территориальных кластеров макрорегиона как основы планирования и реализации мероприятий по повышению качества жизни населения в рамках национальных проектов.

Красноярский край — один из крупнейших регионов Российской Федерации, имеющий сложную национальную, климатическую, биологическую и производственную структуры. Административно-территориальное устройство края включает 17 городских округов, 3 му-

ниципальных округа и 41 муниципальный район. В работе представлены результаты исследования территориальных кластеров макрорегиона на основе применения методов многомерного анализа – анализа главных компонент и кластерного анализа – к данным о качестве жизни муниципальных образований Красноярского края. В разрезе показателей качества жизни выполнено исследование существующих территориальных кластеров Красноярского края, определены их особенности и ключевые характеристики. Выполнено исследование кластерных структур, сформированных по результатам автоматической кластеризации территорий на основе фактических значений показателей и расчетных интегральных оценок качества жизни.

Исходные данные. Исследование территориальных кластеров выполнено на основе статистических данных социально-экономического развития территорий Красноярского края за 2019 год. В соответствии с теорией многомерного анализа, исходные данные представляют собой множество объектов и атрибутов, объекты – муниципальные образования Красноярского края; атрибуты – показатели качества жизни в разрезе национальных проектов [6, 7]. Для анализа выделены 70 показателей, собранных по группам, представляющим национальные проекты и определяющим важнейшие направления развития экономики и социальной сферы: «Здравоохранение» (HLC), «Образование» (EDC), «Демография» (DMG), «Культура» (CLT), «Автомобильные дороги» (SFR), «Жилье и городская среда» (HSE), «Экология» (ECL), «Малое и среднее предпринимательство» (BSN), «Цифровая экономика» (DEC), «Производительность труда и занятость» (ЕМР), «Международная кооперация и экспорт» (EXP), «Магистральная инфраструктура» (HGW). Каждая из групп содержит от 5 до 12 показателей. В свою очередь, национальные проекты охватывают три сферы территориального развития: «Человеческий капитал", Комфортная среда и Экономический рост. На рисунке 1 приведен список показателей, характеризующих качество жизни муниципальных образований. Данные для анализа получены из Автоматизированной информационной системы мониторинга муниципальных образований («АИС Регион MO»), функционирующей в Министерстве экономики региона с 2006 года, где ежегодно собираются сотни показателей социальноэкономического развития территорий края, включая планы, прогнозы и достигнутые результаты [8].

Исследование территориальных кластеров, выявление их особенностей, характерных условий и принципов формирования основаны на применении методов многомерного анализа — анализа главных компонент и кластерного анализа [9-11]. Метод главных компонент (Principal Component Analysis) — один из широко используемых методов интеллектуального анализа, направленный на изучение закономерностей в структуре многомерных данных. Метод представляет эффективный способ понижения размерности, состоящий в переходе к новому ортогональному базису, оси которого ориентированы по направлениям максимальной дисперсии входных данных. Кластерный анализ (Cluster Analysis) — один из методов классификации, направленный на обнаружение скрытых зависимостей и выявление структуры данных. Метод заключается в объединении объектов в непересекающиеся группы — кластеры на основе близости значений их атрибутов. Анализ и визуализация многомерных данных выполняются с помощью инструментальных средств «VidaExpert» [12].

Обозначение	Описание	Обозначение	Описание
ILC_dhospital	Обеспеченность местами в дневных стационарах	ECL_naturewater	Объем использования воды, забранной из природных источнив
HLC_proph	Доля населения, охваченного профилактическими осмотрами	ECL_wconstruct	Количество водозаборных сооружений, оснащенных системам: vчета
ILC_doctor	Обеспеченность врачами, на 10 тыс. человек населения	ECL_waterrate	Темп роста объема оборотного и повторно-последовательного
LC_nurse	Обеспеченность средним медицинским персоналом, на 10 тыс. человек населения	ECI montamentar	использования воды Объем сброса загрязненных сточных вод в водные объекты, на
LC_fdiag	Число заболеваний, зарегистрированных у больных	ECL_wastewater	рельеф, в подземные горизонты
LC_Idiag	с впервые в жизни установленным диагнозом, на 1 тыс.	ECL_clfacilities	Количество очистных сооружений, оснащенных средствами уч
	человек населения	ECE_chiachines	иконтроля
ILC_bldiag	Зарегистрировано больных с диагнозом болезней системы	ECL_statsource	Объем выбросов в атмосферный воздух загрязняющих веществ
	кровообращения, на 100 тыс. человек населения		стационарных источников
LC_neopdiag	Зарегистрировано больных с диагнозом злокачественных	ECL_dinsource	Объем выбросов в атмосферный воздух загрязняющих вещест
	новообразований, на 100 тыс. человек населения		передвижных источников
LC_alcdiag	Заболеваемость наркологическими заболеваниями,	ECL_waste	Образование отходов производства и потребления
	на 100 тыс. человек населения	ECL_wasteorg	Количество организаций, использующих отходы в качестве
	Численность лиц трудоспособного возраста, впервые	FOI 131	вторичных материальных ресурсов
LC_invalid	признанных инвалидами	ECL_killorg	Количество организаций по обезвреживанию отходов
II Cl	Фонд заработной платы работников в области	ECL_nwasteobj	Количество объектов размещения отходов, выполненных и
ILC_salary DC chrelax	здравоохранения и социальных услуг Доля детей школьного возраста, охваченных	ECL pwasteobj	эксплуатирующихся в соответствии с нормами Мощность объектов размещения отходов, выполненных и
DC_cinetax	оздоровительной кампанией	ECL_pwasteodj	эксплуатирующихся в соответствии с нормами
MG_empl	Численность постоянного населения в трудоспособном	ECL_recyclingorg	Количество предприятий по утилизации и переработке бытовы
wo_cmpi	возрасте	ECE_recyclingorg	промышленных отходов
MG born	Численность родившихся	BSN smorg	Количество малых и средних организаций
MG dead	Численность умерших		
MG empldead	Численность умерших в трудоспособном возрасте	BSN_smempl	Доля среднесписочной численности работников малых и сред
MG bldead	Численность умерших от болезней системы	DOM simus	организаций
-	кровообращения	BSN_sinvest	Объем инвестиций в основной капитал организаций малого
MG neopdead	Численность умерших от новообразований	DOM	предпринимательства
MG_empl	Численность постоянного населения в трудоспособном	BSN_minvest	Объем инвестиций в основной капитал средних организаций
	возрасте	DEC_window	Количество утвержденных административных регламентов
LT_cultorg	Обеспеченность учреждениями культурно-досугового типа,	EVDlusus	оказания муниципальной услуги по принципу «одного окна»
	на 100 тыс. человек населения	EMP_emplpop	Численность трудоспособного населения в трудоспособном
FR_improvroad	Протяженность автомобильных дорог с	EMP_unemplpop	возрасте Численность населения старше и младше трудоспособного
mn	усовершенствованным типом покрытия	Eivii _unempipop	возраста, занятого в экономике
FR_transitroad	Протяженность автомобильных дорог с переходным типом	EMP_foreignpop	Численность иностранных граждан, осуществляющих трудову
	покрытия		деятельность
ED Jiman	Протяженность автомобильных дорог с грунтовым	EMP_emplpopecon	Численность занятых в экономике
FR_dirtroad	покрытием Протяженность автомобильных дорог сезонного (зимнего)		Численность обучающихся в трудоспособном возрасте,
FR winterroad	протяженность автомоомльных дорог сезонного (зимнего)	EMP_empleduc	обучающихся с отрывом от производства
FR_repairroad	Протяженность автомобильных дорог - отремонтированных	_cmpreduc	Численность лиц в трудоспособном возрасте, не занятых трудо
FR_unnormroad	Протяженность автомобильных дорог - отремонтированных Протяженность автомобильных дорог, не отвечающих	EMP freepop	деятельностью и учебой
	нормативным требованиям	EMP unemplrate	Уровень зарегистрированной безработицы
ISE water	Объем отпуска воды	EMP vacancy	Количество вакансий, заявленных работодателями
ISE energy	Объем отпуска тепловой энергии	EXP_fabricprod	Объем отгруженных товаров собственного производства,
ISE electric	Удельная величина потребления электрической энергии в	Zrsi _taoricprod	выполненных работ и услуг - Обрабатывающие производства
-	многоквартирных домах в расчете на 1 проживающего	EXP_agrorg	Количество организаций, занятых производством
ISE housebase	Общая площадь жилищного фонда		сельскохозяйственной продукции
ISE_indigentfam	Количество семей, состоящих на учете в качестве	EXP indfarm	Количество личных подсобных хозяйств
	нуждающихся в жилых помещениях	EXP agrprod	Объем отгруженных товаров собственного производства,
ISE_improvefam	Количество семей, получивших жилые помещения и		выполненных работ и услуг - Сельское хозяйство
	улучшивших жилищные условия	EXP_animalprod	Объем отгруженных товаров собственного производства,
	Объем средств, направленный на предоставление		выполненных работ и услуг - Животноводство
	социальной поддержки по оплате жилья и коммунальных	EXP_comharvest	Урожайность зерновых культур
ISE_supportfund	услуг	EXP agrland	Площадь земель сельскохозяйственного назначения
TOT	Количество семей, получивших субсидии на оплату жилья	HGW transplace	Численность населения, проживающего в населенных пунктах
ISE_supportfam	и коммунальных услуг		имеющих регулярное сообщение с административным центрох
ISE_subsidy	Численность граждан, пользующихся мерами социальной поддержки по оплате жилья и коммунальных услуг	HGW_wtransplace	Доля населения, проживающего в населенных пунктах, не имеющих регулярного сообщения с административным центро
		HGW_passenger	Количество перевезенных (отправленных) пассажиров всеми

Рис. 1. Показатели анализа качества жизни муниципальных образований

Исследование существующих территориальных кластеров Красноярского края в разрезе показателей качества жизни. Для Красноярского края существуют два вида кластерного деления территорий. Восьмикластерная структура исторически сложилась по географическому принципу и включает в качестве кластеров группы районов: Ангарская группа, Восточная группа, Енисейская группа, Западная группа, Центральная группа, Южная группа, Таймырский автономный округ, Эвенкийский автономный округ. Четырехкластерная структура была выделена экспертами с точки зрения социально-экономических условий развития муниципальных образований края, где в качестве отдельных кластеров выступают городские округа, территории с крупными промышленными объектами, территории с развитой сельскохозяйственной и лесопромышленной отраслью, отдаленные (северные) территории.

С целью исследования существующих территориальных кластеров, выявления закономерностей в структуре данных и понижения размерности многомерного пространства атрибутов выполнен анализ главных компонент. Для исходного набора данных на основе правила Кайзера и правила сломанной трости определены три главных компоненты (РС1, РС2, РС3), описывающие 65% дисперсии. На рисунках 2 и 3 для двух видов кластеризации территорий представлено распределение кластеров на карте края и в пространстве главных компонент. На рисунках объекты кластеров выделены цветом, кружочками обозначены центроиды кластеров.

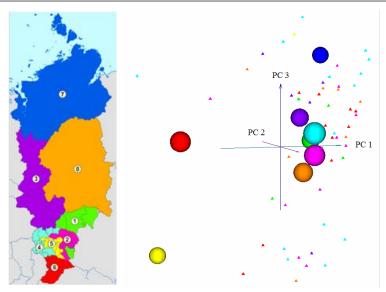
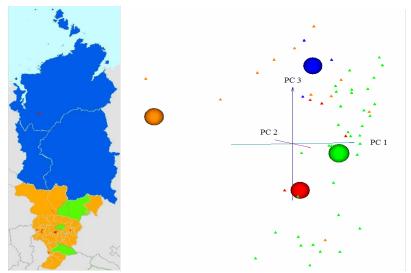


Рис. 2. Распределение групп районов на карте края и в пространстве главных компонент:

- 1 Ангарская группа (зеленый); 2 Восточная группа (розовый);
- 3 Енисейская группа (фиолетовый); 4 Западная группа (бирюзовый);
  - 5 Центральная группа (желтый); 6 Южная группа (красный);
- 7 Таймырский автономный округ (синий); 8 Эвенкийский автономный округ (оранжевый)



**Рис. 3.** Распределение территориальных кластеров на карте края и в пространстве главных компонент: кластер 1 – городские округа (оранжевый); кластер 2 – территории с крупными промышленными объектами (красный);

кластер 3 – территории с развитой сельскохозяйственной и лесопромышленной отраслью (зеленый); кластер 4 – отделённые (северные) муниципальные образования (синий)

Характер главных компонент определяется весами атрибутов (собственными значениями ковариационной матрицы). Первая главная компонента (PC1) отражает выявленную в данных сильную линейную зависимость между показателями четырех групп: «Демография», «Жилье и городская среда», «Малое и среднее предпринимательство», «Производительность труда и занятость». Первая компонента характеризуется низким уровнем численности трудоспособного населения и занятости населения в трудоспособном возрасте, плохим состоянием жилищного фонда и низким качеством реализации мер социальной поддержки, низким уровнем государственной поддержки среднего и малого предпринимательства. При этом для первой компоненты характерен низкий уровень смертности от болезней системы кровообращения и новообразований. Вторая главная компонента (РС2) характеризуется высоким объемом

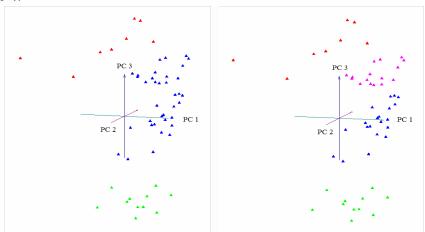
отгруженных товаров, выполненных работ и услуг в части обрабатывающего производства, удовлетворительным состоянием экологии, включая высокий уровень выбросов в атмосферный воздух загрязняющих веществ от стационарных источников, большое количество объектов размещения отходов, выполненных и эксплуатирующихся в соответствии с нормами и большое количество очистных сооружений, оснащенных средствами учета и контроля. Третья главная компонента (РСЗ) характеризуется высоким уровнем обеспеченности медицинским персоналом, низким уровнем больных с диагнозом злокачественных новообразований и наркологическими заболеваниями, низким уровнем производства сельскохозяйственной продукции и низким уровнем выбросов в атмосферный воздух загрязняющих веществ от передвижных источников.

Из рисунка 2 видно, что группы районов 1, 2, 3, 4 и 8 в пространстве главных компонент расположены близко друг к другу, формируя самостоятельный кластер, имеющий положительные значения проекций на первую главную компоненту, что соответствует пониженным значениям социально значимых показателей. При рассмотрении второй и третьей главных компонент кластер занимает нейтральные позиции, хотя внутри кластера можно заметить, что группа районов 3 (Енисейская группа) имеет небольшие положительные значения проекций на вторую и третью компоненту, а группы районов 2 и 8 (Восточная группа и Эвенкийский автономный округ) – отрицательные. Противоположный характер, с отрицательными значениями проекций на первую главную компоненту и небольшими отрицательными значениями проекций на вторую главную компоненту, соответствующие высокому уровню социально значимых показателей, имеет кластер группы районов 6 (Южная группа). Максимальные положительные значения проекций на первую, вторую и третью главную компоненты имеет кластер группы районов 7 (Таймырский автономный округ), для которого характерен низкий уровень социально значимых показателей, кроме показателей обеспеченности медицинским персоналом и численности больных с диагнозом злокачественных новообразований и наркологическими заболеваниями, а также развитие обрабатывающего производства и удовлетворительное экологическое состояние. Противоположный характер наблюдается у группы районов 5 (Центральная группа).

Из рисунка 3 видно, что кластер 3, объединяющий территории с развитой сельскохозяйственной и лесопромышленной отраслью, имеет положительные значения проекций на первую главную компоненту, что соответствует пониженным значениям социально значимых показателей. Противоположный характер имеет кластер 1, объединяющий городские округа. Максимальные положительные значения проекций на первую, вторую и третью главную компоненты имеет кластер 4, объединяющий отделённые (северные) муниципальные образования, а противоположный ему характер наблюдается у кластера 2, объединяющего территории с крупными промышленными объектами.

Полученные результаты анализа главных компонент в контексте территорий показывают, что восьмикластерная структура преобразуется в четырехкластерную и по существу воспроизводит экспертный принцип деления муниципальных образований. Северные территории занимают особое место в экономике края и социальном обеспечении населения. Одними из важнейших отраслей края являются сельскохозяйственная и лесопромышленная отрасли. Городские округа по социальной обеспеченности в значительной степени отличаются от остальных территорий. Результаты анализа демонстрируют достаточно понятную зависимость уровня жизни от мощного экономического потенциала, связанного, прежде всего, с переработкой природного сырья и наличием средств контроля воздействия на окружающую среду. При этом высокие показатели заболеваемости и смертности, наблюдаемые у территорий с хорошим общим состоянием здравоохранения, могут объясняться миграционными процессами и разным уровнем диспансеризации населения.

Формирование территориальных кластеров Красноярского края на основе фактических значений показателей качества жизни. С целью обнаружения структуры данных и выявления территориальных кластеров на основе близости значений показателей качества жизни, выполнен кластерный анализ с помощью алгоритма кластеризации на основе плотности DBSCAN [13]. Результаты кластеризации в пространстве главных компонент представлены на рисунке 4.



**Рис. 4.** Результаты кластеризации данных — трехкластерная структура (слева), четырехкластерная структура (справа)

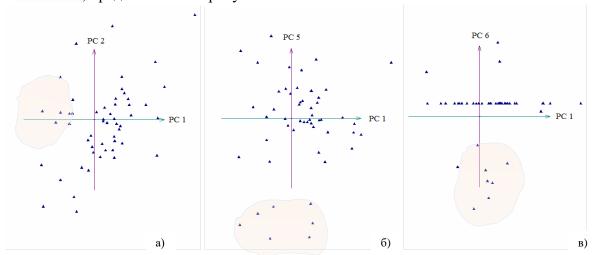
на основе фактических значений показателей качества жизни

Анализ фактических значений показателей в пространстве главных компонент выявил трехкластерную структуру (рисунок 4, слева): кластер 1 (синий) содержит 37 объектов, кластер 2 (красный) содержит 8 объектов, кластер 3 (зелёный) содержит 13 объектов. Первый кластер объединяет муниципальные образования, для которых характерны средние значения по всем показателям качества жизни. Одним из представителей данного кластера, но при этом самым удаленным от центра кластера муниципальным образованием, является город Красноярск. Центр региона значительно выделяется среди остальных муниципальных образований по многим показателям. Большие объёмы финансирования обусловливают высокие темпы строительства жилья и инфраструктуры, положительную миграцию, сосредоточение ведущих учреждений здравоохранения, образования и культуры. Второй кластер объединяет отдаленные и арктические территории, для которых характерны высокие значения показателей по группам Здравоохранение, Демография, Жилье и городская среда, Малое и среднее предпринимательство. Кроме этого, высокие значения наблюдаются у показателей, определяющих численность трудоспособного населения и объем отгруженных товаров, выполненных работ и услуг в части обрабатывающего производства. В третий кластер вошли муниципальные образования с развитой сельскохозяйственной и фермерской деятельностью. Наиболее удаленными от центра кластера объектами являются муниципальные образования, где в большей степени развита лесопромышленная отрасль, например, Курагинский район. Четырёхкластерная структура данных (рисунок 4, справа) образуется путем выделения внутри наибольшего кластера двух кластеров: один из них (синий) содержит 21 объект, другой (розовый) – 16 объектов. Второй отличается более высокими значениями показателей группы «Экология».

Полученные результаты автоматической кластеризации территорий края по фактическим значениям показателей качества жизни соответствуют экспертному принципу разделения муниципальных образований, выделяя среди территорий главным образом сельскохозяйственную отрасль и отдаленные (северные) территории.

Формирование территориальных кластеров Красноярского края на основе расчетных интегральных оценок качества жизни. С целью выявления территориальных кластеров, учитывающих особенности реализации национальных проектов, выполнен анализ главных компонент и кластерный анализ по интегральным оценкам качества жизни. Интегральные оценки были получены на основе авторского метода оценивания качества жизни муниципальных образований [14, 15]. В качестве атрибутов рассматриваются комплексные показатели качества жизни, соответствующие национальным проектам.

Для анализируемого набора данных определено шесть главных компонент (РС1, РС2, РС3, РС4, РС5, РС6), описывающих 75% дисперсии. Первая главная компонента (РС1) характеризуется высоким уровнем показателя «Экология» и низким уровнем показателя Международная кооперация и экспорт. Вторая главная компонента (РС2) характеризуется высоким уровнем показателя Малое и среднее предпринимательство и Международная кооперация и экспорт, а также низким уровнем показателя «Здравоохранение». Третья главная компонента (РС3) характеризуется высоким уровнем показателя «Демография» и низким уровнем показателя «Производительность труда и занятость». Четвертая главная компонента (PC4) характеризуется высоким уровнем показателя «Цифровая экономика» и низким уровнем показателя «Производительность труда и занятость». Пятая главная компонента (PC5) характеризуется высоким уровнем показателя «Автомобильные дороги» и низким уровнем показателей «Образование» и «Культура». Шестая главная компонента (РС6) характеризуется высоким уровнем показателей «Демография» и «Магистральная инфраструктура», а также низким уровнем показателя «Жилье и городская среда». Большое количество главных компонент определяет многокластерную структуру в данных. Результаты кластеризации в пространстве главных компонент с более выраженной структурой, выявленной на основе алгоритма DBSCAN, представлены на рисунке 5.



**Рис. 5.** Результаты кластеризации данных на основе интегральных оценок качества жизни

Первая главная компонента формирует двухкластерную структуру, в которой наименьший кластер объединяет муниципальные образования с низкими интегральными оценками показателя «Экология» (рис. 5а). Пятая главная компонента формирует двухкластерную структуру, в которой наименьший кластер содержит муниципальные образования с низкими интегральными оценками показателей «Образование» и «Культура» (рис. 5б). Шестая главная компонента формирует двухкластерную структуру, в которой наименьший кластер содержит муниципальные образования с низкими интегральными оценками показателя «Жилье и городская среда» (рис. 5в).

Таким образом, результаты кластеризации территорий по интегральным оценкам качества жизни позволили акцентировать внимание на условия реализации национальных проектов и обнаружить группы «отстающих» муниципальных образований края по важнейшим направлениям качества жизни.

Заключение. В работе на основе применения методов многомерного анализа к данным о качестве жизни муниципальных образований Красноярского края выполнено исследование территориальных кластеров. Исследованы существующие восьмикластерная и четерехкластерная структуры, в разрезе показателей качества жизни определены их особенности и ключевые характеристики. На основе анализа фактических значений показателей выполнена кластеризация территорий и выявлены принципы распределения муниципальных образований по кластерам. Результаты показали, что северные территории занимают особое место в экономике края и социальном обеспечении населения. Одними из важнейших отраслей края являются сельскохозяйственная и лесопромышленная отрасли. Городские округа по социальной обеспеченности в значительной степени отличаются от остальных территорий. Выявленная зависимость показателей свидетельствует о том, что уровень жизни во многом зависит от экономического потенциала, связанного, прежде всего, с переработкой природного сырья, но при этом важным элементом является наличие средств контроля воздействия на окружающую среду. Результаты кластеризации территорий по интегральным оценкам качества жизни позволили акцентировать внимание на условиях реализации национальных проектов и обнаружить группы «отстающих» муниципальных образований края по важнейшим направлениям качества жизни: «Экология», «Образование», «Культура», «Жилье и городская среда». Таким образом, результаты исследования позволили выявить особенности и условия развития муниципальных образований, определить проблемные и перспективные направления экономики и социальной сферы макрорегиона, и тем самым обеспечить обоснование для эффективного планирования и реализации стратегических мероприятий по повышению качества жизни на территориях Красноярского края, используя преимущества кластерного подхода.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-47-242910.

### Список источников

- 1. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» // Президент России: официальный сайт, 2018. URL: http://kremlin.ru/events/president/news/57425 (дата обращения 15.06.2022).
- 2. Указ Президента Российской Федерации от 21.07.2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» // Президент России: официальный сайт, 2020. URL: http://www. kremlin. ru/acts/news/63728 (дата обращения 15.06.2022).
- 3. Региональные проекты Красноярского края // Красноярский край: официальный сайт, 2022. URL: http://project.krskstate.ru/nacprojects (дата обращения 12.06.2022).
- 4. Мекуш Г.Е. Кластерный подход в развитии сибирских регионов / Г.Е. Мекуш, Е.О. Ушакова // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2017. T. 3., № 2. C. 3-7.
- 5. Печерица Е.В. Кластерный подход к изучению территориальных социально-экономических систем / Е.В. Печерица, Е.Е. Шарафанова // Теория и практика сервиса: экономика, социальная сфера, технологии, 2013. №. 3 (17). С. 144-150.
- 6. Коробко А.В., Ничепорчук В.В, Метус А.М. Иерархическая модель показателей качества жизни и реализации национальных проектов / А.В. Коробко, В.В. Ничепорчук, А.М. Метус // Информатизация и связь. -2021.-№ 5.- C. 47-53.-DOI:10.34219/2078-8320-2021-12-5-47-53.
- Nozhenkova L, Penkova T., Morozov R., Nozhenkov A. Conception of life quality estimation of the municipal territories in the context of national projects implementation. CEUR Workshop Proceedings, 2<sup>nd</sup> Siberian Scientific Workshop on Data Analysis Technologies with Applications (SibDATA-2021), 2021, vol. 3047, pp. 98-103.

- 8. Автоматизированная система мониторинга муниципальных образований: сайт. URL: http://aismmo.ru (дата обращения 29.03.2022).
- 9. Многомерный статистический анализ в экономике: учебное пособие для вузов. / Л.А. Сошникова, В.Н. Тамашевич,  $\Gamma$ . Усбе, М. Шефер; Под ред. В.Н. Тамашевича. М.: БНИТИ Дана, 1999. 598 с.
- 10. Gorban A.N., Zinovyev A.Y. Principal graphs and manifolds. Handbook of research on machine learning applications and trends: algorithms, methods, and techniques, IGI Global, 2010, pp. 28-59.
- 11. Мокеев В.В. Метод главных компонент и метод собственных состояний в задачах анализа и прогнозирования / В.В. Мокеев. Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2014. 144 с.
- 12. Gorban A.N., Pitenko A., Zinovyev A. ViDaExpert: user-friendly tool for nonlinear visualization and analysis of multidimensional data // Нейроинформатика, ее приложения и анализ данных, 2014. С. 45-58.
- 13. Кириченко Л.О. Кластеризация зашумленных временных рядов / Л.О. Кириченко, А.Е. Ткаченко, Т.А. Радивилова, 2020.
- 14. Пенькова Т.Г. Метод построения территориально-ориентированной нормативной модели для оценивания качества жизни с учётом спецификации территорий (на примере Красноярского края) / А.М. Метус, В.В. Ничепорчук [и др.] // Информатизация и связь, 2021. № 5. С. 39-46. DOI:10.34219/2078-8320-2021-12-5-39-46.
- 15. Penkova T. Method of wellbeing estimation in territory management. Lecture Notes in Computer Science, 2014, part. IV, vol.8582, pp. 57-68, DOI 10.1007/978-3-319-09147-1\_5.

**Пенькова Татьяна Геннадьевна.** К.т.н., доцент кафедры информатики Сибирского федерального университета, с.н.с., отдел прикладной информатики Института вычислительного моделирования СО РАН. Основные направления исследований включают методы и технологии интеллектуального анализа данных, экспертные системы, системы поддержки принятия решений. AuthorID: 604225, SPIN-код: 2281-3852, ORCID: 0000-0002-0057-0535. penkova\_t@icm.krasn.ru, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44.

**Ноженкова Людмила Федоровна.** Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий отделом прикладной информатики. Научная деятельность посвящена исследованиям в области интеллектуальных информационных технологий и анализа данных. AuthorID: 70114, SPIN-код: 8354-3536, OR-CID: 0000-0002-9277-8981, expert@icm.krasn.ru, Poccus, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, cmp. 44.

UDC 332.12:004.02

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.002

## Study of territorial clusters of the macroregion based on multidimensional analysis of life quality indicators (in the case of the Krasnoyarsk region)

### Tatiana G. Penkova, Ludmila F. Nozhenkova

Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, Krasnoyarsk, *penkova\_t@icm.krasn.ru* 

**Annotation.** The paper presents the results of a study of territorial clusters of a macro-region by applying the multidimensional analysis methods – principal component analysis and cluster analysis – to data on the life quality of municipal territories in the Krasnoyarsk region. In the context of life quality indicators, the key characteristics and features of the existing territorial clusters of the region are identified. Based on the analysis of the actual values of the indicators and the calculated integral assessments of the life quality, the territories were clustered, and the principles for distribution of municipal territories by clusters were determined. The results of the study made it possible to identify the features and conditions for the development of municipal territories, to identify problematic and promising directions of the economy and social sphere of the macro-region, which allow more efficient planning and implementation of strategic actions to improve the life quality in the territories of the Krasnoyarsk region using the advantages of the cluster approach.

Keywords: Territorial clusters, Multidimensional analysis, Life quality indicators, Macroregion

**Acknowledgements:** The research was funded by RFBR, Krasnoyarsk Territory and Krasnoyarsk Regional Fund of Science, project number 20-47-242910.

### References

1. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 07.05.2018 № 204 «O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2024 goda [Decree of the President of the Russian

- Federation of 07.05.2018 No. 204 "On national goals and strategic objectives for the development of the Russian Federation for the period up to 2024]. Prezident Rossii: ofitsial'nyy sayt [President of Russia: official website], available at: http://kremlin.ru/events/president/news/57425 (accessed 15 June 2022).
- 2. Ukaz Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 21.07.2020 no. 474 «O natsional'nykh tselyakh razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda» [Decree of the President of the Russian Federation of July 21, 2020 no. 474 "On the national development goals of the Russian Federation for the period up to 2030"]. Prezident Rossii: ofitsial'nyy sayt [President of Russia: official website], available at: http://www. kremlin. ru/acts/news/63728 (accessed 15 June 2022).
- 3. Regional'nyye proyekty Krasnoyarskogo kraya [Regional projects of the Krasnoyarsk Territory]. Krasnoyarskiy kray: ofitsial'nyy sayt [Krasnoyarsk krai: official site], available at: http://project.krskstate.ru/nacprojects (accessed 12 June 2022).
- 4. Mekush G.E., Ushakova E.O. Klasternyy podkhod v razvitii sibirskikh regionov [Cluster approach in the development of Siberian regions]. Inter ekspo Geo-Sibir' [Interexpo Geo-Siberia], 2017, vol. 3, no. 2, pp. 3-7.
- 5. Pecheritsa E.V., Sharafanova E.E. Klasternyy podkhod k izucheniyu territorial'nykh sotsial'no-ekonomicheskikh sistem [Cluster approach to the study of territorial socio-economic systems]. Teoriya i praktika servisa: ekonomika, sotsial'naya sfera, tekhnologii [Theory and practice of service: economics, social sphere, technology], 2013, no. 3 (17), pp. 144-150.
- 6. Korobko A.V., Nicheporchuk V.V., Metus A.M. Iyerarkhicheskaya model' pokazateley kachestva zhizni i realizatsii natsional'nykh proyektov [Hierarchical model of indicators of quality of life and implementation of national projects]. Informatizatsiya i svyaz' [Informatization and communication], 2021, no. 5, pp. 47-53, DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-5-47-53.
- 7. Nozhenkova L, Penkova T., Morozov R., Nozhenkov A. Conception of life quality estimation of the municipal territories in the context of national projects implementation. CEUR Workshop Proceedings, 2<sup>nd</sup> Siberian Scientific Workshop on Data Analysis Technologies with Applications (SibDATA-2021), 2021, vol. 3047, pp. 98-103, DOI: 10.47813/sibdata-2-2021-14.
- 8. Avtomatizirovannaya sistema monitoringa munitsipal'nykh obrazovaniy [Automated monitoring system for municipal territories], available at: http://aismmo.ru (accessed 29 March 2022).
- 9. Mnogomernyy statisticheskiy analiz v ekonomike: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Multivariate statistical analysis in economics: textbook for universities], M.: BNITI Dana, 1999, 598 p.
- 10. Gorban A.N., Zinovyev A.Y. Principal graphs and manifolds. Handbook of research on machine learning applications and trends: algorithms, methods, and techniques, IGI Global, 2010, pp. 28-59.
- 11. Mokeev V.V. Metod glavnykh komponent i metod sobstvennykh sostoyaniy v zadachakh analiza i prognozirovaniya [Principal component method and eigenstate method in problems of analysis and forecasting], Chelyabinsk: YuUrGU, 2014, 144 p.
- 12. Gorban A.N., Pitenko A., Zinovyev A. ViDaExpert: user-friendly tool for nonlinear visualization and analysis of multidimensional data. Neyroinformatika, yeye prilozheniya i analiz dannykh [Neyroinformatika, yeye prilozheniya i analiz dannykh], 2014, pp. 45-58.
- 13. Kirichenko L.O., Tkachenko A.E., Radivilova T.A. Klasterizatsiya zashumlennykh vremennykh ryadov [Clustering Noisy Time Series], 2020.
- 14. Penkova T.G. Metus, A.M., Nicheporchuk V.V. et al. Method for constructing a territorially-oriented normative model for assessing the quality of life, taking into account the specification of territories (in the case of the Krasnoyarsk Territory). Informatizatsiya i svyaz' [Informatization and communication], 2021, no. 5, pp. 39-46, DOI: 10.34219/2078-8320-2021-12-5-39-46.
- 15. Penkova T. Method of wellbeing estimation in territory management. Lecture Notes in Computer Science, 2014, part. IV, vol.8582, pp. 57-68, DOI 10.1007/978-3-319-09147-1\_5.

Penkova Tatyana Gennadievna. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics, Siberian Federal University, Senior Researcher, Department of Applied Informatics, Institute of Computational Modeling, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The main areas of research include methods and technologies of data mining, expert systems, decision support systems. AuthorID: 604225, SPIN: 2281-3852, ORCID: 0000-0002-0057-0535. penkova\_t@icm.krasn.ru, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, building 44.

Nozhenkova Ludmila Fyodorovna. Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Head of the Department of Applied Informatics. Scientific activity is devoted to research in the field of intelligent information technologies and data analysis. AuthorID: 70114, SPIN: 8354-3536, ORCID: 0000-0002-9277-8981, expert@icm.krasn.ru, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, building 44.

Статья поступила в редакцию 05.08.2022; одобрена после рецензирования 06.09.2022; принята к публикации 16.09.2022.

The article was submitted 08/05/2022; approved after reviewing 09/06/2022; accepted for publication 09/16/2022.

УДК 681.5

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.003

# Оценка состояния распределенных систем методами математико-картографического моделирования на примере данных о заболеваемости ГЛПС на территории Республики Башкортостан

Просвиркина Татьяна Дмитриевна<sup>1</sup>, Ларшутин Сергей Александрович<sup>1</sup>, Бежаева Оксана Яковлевна<sup>2</sup>, Гвоздев Владимир Ефимович<sup>2</sup>, Барудкина Екатерина Юрьевна<sup>2</sup>, Гвоздев Георгий Владимирович<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Башкирский государственный медицинский университет, Россия, Уфа, prosvirkinatd@mail.ru,

Аннотация. Одним из эффективных технологических методов обеспечения сопоставимости данных, характеризующих состояние территориальных систем с разных позиций, является преобразование их в форму картографических моделей, известную как зонирование территориальных систем. В данной статье рассматриваются проблемы районирования территории Республики Башкортостан на примере данных о заболевании геморрагической лихорадкой с почечным синдромом (ГЛПС). Результаты зонирования служат основой для решения других информационных проблем. В статье также рассматриваются вопросы выявления схожих состояний территориальной системы по данному показателю в разных временных срезах. Анализ состояния территории в целом сводится к сравнению результатов, полученных с помощью математических и геоинформационных моделей относительно всей исследуемой территории при различных условиях моделирования. Предлагаемый подход позволяет увеличить количество частных характеристик, то есть количество точек зрения на состояние территориальной системы.

**Ключевые слова:** территориальные системы, системообразующие факторы, оценки состояния, картографическое моделирование, ГЛПС, сетецентрическое управление

**Цитирование:** Просвиркина Т.Д., Оценка состояния распределенных систем методами математико-картографического моделирования на примере данных о заболеваемости ГЛПС на территории Республики Башкортостан / Т.Д. Просвиркина, С.А. Ларшутин, О.Я. Бежаева, В.Е. Гвоздев, Е.Ю. Барудкина, Г.В. Гвоздев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 3(27). − С. 25-33. − DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.003.

**Введение.** В литературных источниках подчёркивается, что комплексное использование результатов, соответствующих разным точкам зрения на сложную систему, является необходимым условием выработки обоснованных управленческих решений. Территориальные системы являются разновидностью распределённых сложных систем. В управлении их состоянием на разных уровнях (стратегическом, тактическом, операционном) задействованы разные государственные и негосударственные структуры, которые имеют собственные представления о ценностях и возможных путях их достижения. Это обстоятельство является причиной различия в целях управления и, как следствие, различия в подходах и технологиях изучения, сбора, передачи, систематизации и хранения данных, которые в различных ракурсах характеризуют состояние территориальной системы.

В [1] отмечается, что к числу базовых проблем сетецентрического управления относится разработка подходов и технологий, обеспечивающих семантическую интеграцию информации и данных, существующих в локальных информационных системах структур, задействованных в управлении состоянием территориальных систем. Там же [1] обсуждаются системообразующие факторы этой проблемы, к числу которых относится обеспечение сопоставимости характеристик состояний, получаемых в разных структурах по различным, между собой несопоставимым, регламентам.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Россия, Уфа,

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Городская детская клиническая больница № 17, Россия, Уфа

Эффективным технологическим приемом обеспечения сопоставимости данных, с одной стороны, характеризующих состояние территориальных систем с разных позиций, с другой стороны, получаемых в рамках локальных целей управления, является преобразование их к виду картографических моделей, известных как районирование территориальных систем [2]. Результаты районирования создают основу для решения других информационных задач, связанных с анализом пространственно-временной изменчивости состояния территориальных систем, таких, как анализ динамики интегральных характеристик состояния; выявление закономерностей возникновения схожих состояний; анализ тенденций изменения состояний, как отдельных участков, так и территориальной системы в целом.

В настоящей статье рассматриваются задачи районирования территории Республики Башкортостан по данным о заболеваемости геморрагической лихорадкой с почечным синдромом (ГЛПС). ГЛПС – острое вирусное природно-очаговое заболевание, характеризующееся поражением мелких сосудов с тромбо-геморрагическим синдромом и развитием острой почечной недостаточности. По уровню заболеваемости ГЛПС занимает в Российской Федерации первое место среди природно-очаговых болезней, причем самый крупный очаг находится на территории Республики Башкортостан. В России 30% липовых лесов приходится на Башкортостан, а обильное плодоношение липы обеспечивает кормом рыжую полевку, которая считается основным резервуаром инфекции. Республиканские показатели заболеваемости ГЛПС значительно превышают федеральные, но эпидемическая активность очагов на территории районов Башкортостана распределена неравномерно. Так же в статье рассматриваются вопросы выявления схожих состояний территориальной системы по данному показателю в разных временных срезах.

- 1. Районирование территориальных систем по частным характеристикам состояния. В работах, посвященных исследованию сложных систем, отмечается, что решение задач классификации составляет основу анализа гетерогенных динамических объектов [3-6]. Применительно к анализу территориальных систем (ТС) это выражается в классификации территорий по значениям характеристик состояния [7-11]. Классификация участков территорий основана на разработке формальных методов регуляризации пространственных данных, позволяющих отнести каждый участок территории к тому или другому классу состояния. Задача классификации имеет две составляющие:
  - назначение ограниченного числа классов состояния и отнесение отдельных участков исследуемой территории к какому-либо классу;
  - создание механизма интерпретации результатов классификации: геоинформационная (картографическая) модель, в которой каждой точке исследуемой территории ставятся в соответствие значения характеристик состояния, представляет собой контейнер данных, в то время как геоинформационная модель, характеризующая классы состояния территории, представляет собой контекст для анализа состояния.

В общем случае задача классификации представляется в виде

$$\varphi(x, y) \to S(x, y), \tag{1}$$

где  $\varphi(x, y)$  – рельеф поверхности, образуемый характеристикой состояния;

S(x,y) — пространственная мозаика, образуемая участками исследуемой территории, причем каждому элементу мозаики ставится в соответствие определенный класс состояния территориальной системы [2].

Основой преобразования  $\varphi(x,y)$  в S(x,y) является использование различных шкал, устанавливающих соответствие между диапазонами значений показателей рельефа характеристик состояния и классами состояния территории, то есть

$$\alpha_i \le \varphi(x, y) < \beta_i \to C_i,$$
 (2)

где  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  — границы *i*-го подинтервала классификационной шкалы;

 $C_i - i$ -й класс состояния участка территории.

При решении практических задач, связанных с оценкой состояния ТС, достаточно типичной является ситуация, когда вместо  $\varphi(x,y)$  известны лишь выборочные значения рельефа характеристик состояния  $z(x_i,y_i)=\varphi(x_i,y_i), (i=\overline{1;N})$ , соответствующие узлам сетки измерений. При этом число узлов сетки может оказаться весьма ограниченным, а сами значения  $z(x_i,y_i)$  фиксироваться со значительными погрешностями.

В этом случае модель преобразуется к виду:

$$z(x_i, y_i) \xrightarrow{P_{\alpha}} \widehat{S}(x, y), i = \overline{1; N},$$
 (3)

где  $\widehat{S}(x,y)$  — оценка S(x,y), зависящая от N, местоположения узлов сетки измерений и выбранного способа  $P_{\alpha}$  преобразования рельефа в пространственную мозаику.

При решении прикладных задач классификации участков ТС достаточно часто приходится сталкиваться с ситуацией, когда классификационная шкала априорно неизвестна. В этом случае оценка  $\hat{P}_{\alpha}$  должна строиться по фактически доступным выборочным данным.

Решение задачи классификации заранее выделенных участков территорий по показателям состояния должно соответствовать уровням управления: оперативного, тактического, стратегического. В связи с этим целесообразно ввести понятие «абсолютная» и «относительная» классификационная шкала.

Целью построения относительной классификационной шкалы является представление в наглядной картографической форме текущей (оперативной) обстановки, соответствующей l-му условию исследований. При этом в качестве элементов выборки выступают данные  $z^{(l)}(x_i,y_i)$   $(i=\overline{1;N})$ , соответствующие l-му условию исследований.

Абсолютная шкала формируется на основе данных, соответствующих совокупности временных срезов и предназначена для сопоставления состояний территорий в различных временных срезах (l=1, 2, ..., g). В качестве элементов выборки в этом случае выступает объ-

единенная выборка 
$$\{z\} = \bigcup_{l=1}^{g} z^{(l)}(x_i, y_i) \ (i = \overline{1; N})$$
.

Целью построения абсолютной классификационной шкалы является создание информационной основы для сравнительного анализа состояния территорий по совокупности временных срезов.

В работе [12] описана процедура построения классификационных шкал для случаев, когда задача сводится к сопоставлению состояния участков ТС по данным, относящимся к фиксированному временному срезу; либо, когда задача состоит в сравнительном анализе изменения состояния разных участков ТС на основании данных, относящихся к временному интервалу.

Формальная процедура построения классификационных шкал в обоих случаях остается одной и той же, различия касаются подхода к формированию массивов исходных данных. В первом случае выборочные данные соответствуют временному срезу, во втором выборка формируется на основе характеристик состояния, соответствующих временному интервалу.

$$\begin{array}{ccc}
& & & & \\
& & & & \\
z(x_i, y_i) & \longrightarrow & \hat{S}(x, y)
\end{array}$$
(4)

На рисунках 1 и 2 в качестве примера приведены результаты районирования территории одного из субъектов Российской федерации — Республики Башкортостан — по данным о заболеваемости ГЛПС, относящимся к десятилетнему периоду наблюдения.

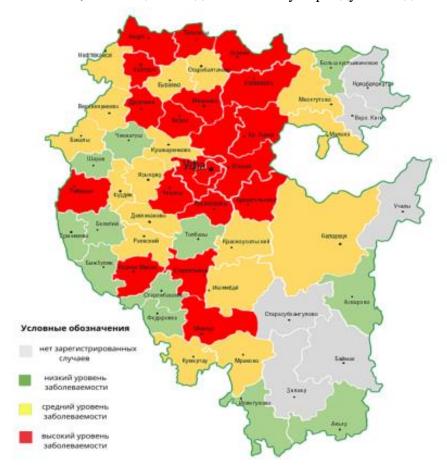


Рис. 1. Результаты районирования территории Республики Башкортостан за 2009 год

Границами участков территориальной системы являлись границы муниципальных образований. На рисунке 3 приведены гистограммы, соответствующие представленным картографическим материалам, и характеризующие долю муниципальных образований, относящихся к каждому из классов состояний.

**2. Анализ изменчивости состояния ТС в целом.** Анализ состояния ТС в целом сводится к сопоставлению результатов, получаемых посредством математико-геоинформационных моделей относительно всей исследуемой территории при различных условиях выполнения моделирования: различные временные срезы, различные режимы функционирования техногенных источников, различные объемы исходных данных и т.п., а также при различном составе моделей, используемых для описания одних и тех же явлений.

Анализ изменчивости состояния TC сводится к расчету и исследованию скалярных показателей, получаемых в результате преобразований

$$\rho_k^{(l,g)} = R_k[M^{(l)}(x,y), M^{(g)}(x,y)], \tag{5}$$

где  $\rho_{\it k}^{(l,g)}$  – значение показателя, характеризующего степень совпадения/различия результатов моделирования  $M^{(l)}(x, y)$ ,  $M^{(g)}(x, y)$ , получаемых в l-х и g-х условиях;

 $R_{k}[\ ]-k$ -е правило, используемое для сопоставления результатов, получаемых в l-х и д-х условиях.

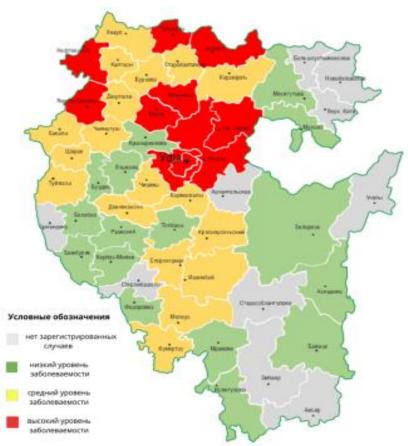
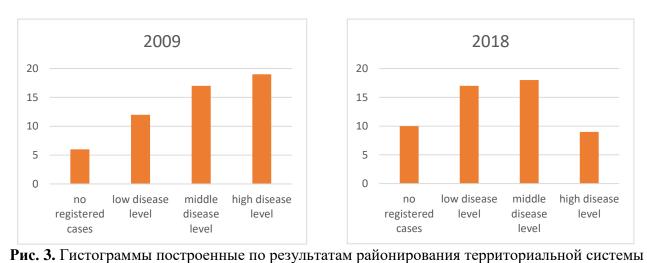
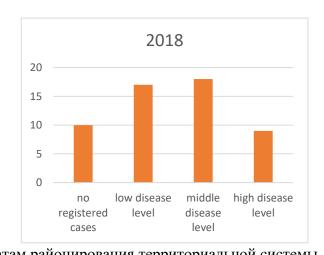


Рис. 2. Результаты районирования территории Республики Башкортостан за 2018год





Можно предложить различные правила сопоставления оценок, получаемых в результате решения задачи районирования. Описание различных правил, основанных на использовании коэффициентов ассоциативности, приводится в работе [14]. В рамках настоящей работы основу сопоставления характеристик состояния составили гистограммы, примеры которых

представлены выше. Основываясь на этих гистограммах, были сформированы таблицы, ха-

рактеризующие расхождение в интегральных характеристиках состояния. Опираясь на известный критерий *XII*-квадрат проверки о равенстве законов распределения случайных величин [13], можно оценить схожесть состояния ТС в разных временных срезах. Основанием для сведения задачи сопоставления оценок состояния ТС к задаче проверки статистических гипотез является известное положение о том, что закон распределения является исчерпывающей характеристикой случайной величины.

Ниже в качестве примера представлена таблица, сформированная на основе полученных в ходе исследований гистограмм. Цифры выше главной диагонали соответствует случаю, когда в качестве теоретического закона распределения выбирались гистограммы, соответствующие в таблице годам, проиндексированным по оси ординат. Числа, расположенные ниже главной диагонали, соответствуют годам, проиндексированным по оси абсцисс.

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
2009	-	18,630	6,130	1,279	36,200	4,037	9,281	9,981	5,020	10,072
2010	33,146	-	9,701	35,051	4,816	69,472	22,867	5,859	8,441	2,307
2011	5,636	5,736	-	9,098	11,660	17,806	16,339	3,937	3,577	1,893
2012	1,450	22,556	11,256	-	46,959	3,139	4,210	9,813	5,129	15,241
2013	67,588	5,522	23,998	73,126	-	126,526	55,660	21,781	27,843	11,185
2014	5,074	34,741	20,061	3,011	62,869	-	12,403	17,126	13,394	27,442
2015	9,061	26,680	19,643	4,172	59,069	13,124	-	10,743	6,690	21,738
2016	9,359	4,679	4,220	9,182	17,329	23,073	7,723	-	0,982	4,170
2017	5,845	6,302	3,242	5,881	20,575	18,357	5,131	1,214	-	3,373
2018	14,237	2,014	2,337	16,698	8,708	36,149	14,760	3,184	3,071	-

Таблица 1. Результаты, сформированные на основе гистограмм

Из данных таблицы следует, что в случае выбора уровня доверия 0.9, можно заключить, что схожими являются состояния, соответствующие 2009 и 2012 годам; 2010, 2011 и 2018 годам; 2016 и 2017 годам.

Ниже приведены картографические материалы, соответствующие 2010, 2011 и 2018 годам.

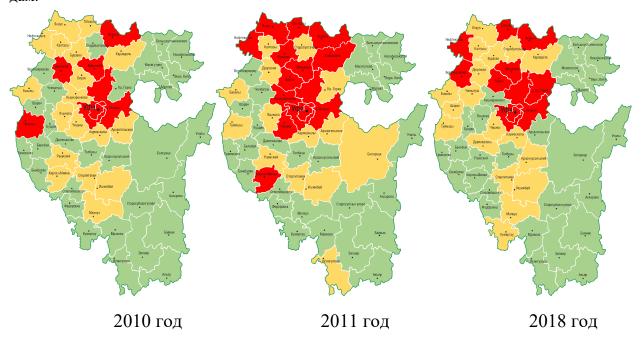


Рис. 4. Картографические материалы, соответствующие 2010, 2011 и 2018 годам

Ограничениями предлагаемого подхода являются:

- 1. Неопределенность выбора теоретического закона распределения случайной величины. В приведенной таблице симметрично расположенные относительно главной диагонали элементы имеют разные значения.
  - 2. Неопределенность в выборе уровня значимости величины расхождения.
- 3. Учет в разных временных срезах лишь числа участков, относящихся к определенному классу состояния, и игнорирование того, совпадает или нет местоположение этих участков в различных временных срезах.

Заключение. Отнесение каждого из участков TC к одному из классов состояний при условии, что разным характеристикам ставится в соответствии одно и тоже число классов, обеспечивает, с одной стороны, сопоставимость оценок состояния по частным характеристикам, с другой стороны, возможность формирование комплексных оценок состояния. В рамках предлагаемого подхода можно увеличивать число частных характеристик, то есть число точек зрения на состояние TC.

Методическим ограничением предлагаемого подхода является то, что основу построения классификационных школ составляют эмпирические оценки законов распределения случайных величин по данным статического рельефа. В силу многих причин эту задачу в большинстве случаев приходится решать при малом числе однородных данных. Отмеченное обстоятельство ограничивает применимость «традиционных» математико-статистических методов и требует использования специальных методов обработки малых выборок.

#### Список источников

- 1. Systems Engineering Guide for Systems of Systems, Version 1.0. Washington, DC: ODUSD(A&T) SSE, 2008.
- 2. Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник // Н.Ф. Реймерс. М.: Мысль, 1990. 637 с.
- 3. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности // С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков [и др.]. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
- 4. Губанов В.А. Введение в системный анализ // В.В. Захаров, А.Н. Коваленков. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. 232 с.
- 5. Дэйвисон М. Многомерное шкалирование: Методы наглядного представления данных // М. Дэйвисон, пер. с англ. В. С. Каменского. М.: Финансы и статистика, 1988. 254 с
- 6. Олдендерфер М.С., Блэшфилд Р.К. Кластерный анализ // Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / М.С. Олдендерфер, Р.К. Блэшфилд; под ред. Енюкова Н.С. М.: Финансы и статистика, 1989. С. 139–210.
- 7. Викторов А.С. Рисунок ландшафта // А.С. Викторов. М.: Мысль, 1986. 179 с.
- 8. Мильков Ф.Н. Физическая география: современное состояние, закономерности, проблемы // Ф.Н. Мильков. Воронеж, 1981.-136 с.
- 9. Михайлов Н.И. Физико-географическое районирование // Н.И. Михайлов. М.: МГУ, 1985. 184 с.
- 10. Розенберг Г.С. Экологическое прогнозирование (функциональные предикторы временных рядов) // Г.С. Розенберг, В.К. Шитиков, П.М. Брусиловский. Тольятти, 1994. 182 с.
- 11. Федина А.Е. Физико-географическое районирование // А.Е. Федина. М.: МГУ, 1981. 128 с.
- 12. Гузаиров М.Б. Статическое исследование территориальных систем // М.Б. Гузаиров, В.Е. Гвоздев [и др.]; под общ. ред. В.Е. Гвоздева. М.: Машиностроение, 2008. 187 с.
- 13. Вентцель Е.С. Теория вероятностей // Е.С. Вентцель. 6-е изд. М.: Наука, 1999. 576 c.

**Просвиркина Татьяна Дмитриевна,** кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры инфекционных болезней Башкирского государственного медицинского университета, ORCID: 0000-0001-7903-6804, prosvirkinatd@mail.ru, 450008, г. Уфа, ул. Ленина, 3.

**Ларшутин Сергей Александрович,** кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры инфекционных болезней Башкирского государственного медицинского университета, ORCID: 0000-0003-4258-1643, larshutin@mail.ru, 450008, г. Уфа, ул. Ленина, 3.

**Гвоздев Владимир Ефимович,** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета, ORCID: 0000-0002-1481-0982, SPIN-код: 7043-9040, AuthorID: 174520, gvozdev.ve@ugatu.su, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

**Бежаева Оксана Яковлевна,** кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета, ORCID: 0000-0002-3373-7266, AuthorID: 271220, Author ID (Scopus): 57216845244, SPIN-код: 9785-3875, bezhaeva.oya@ugatu.su, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

**Барудкина Екатерина Юрьевна**, магистрант кафедры технической кибернетики Уфимского государственного авиационного технического университета, ORCID: 0000-0002-9658-3081, katerina.barudkina@gmail.com, 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

**Гвоздев Георгий Владимирович,** врач-травматолог-ортопед, Городская детская клиническая больница №17, ORCID: 0000-0003-4874-0895, doktor.gvozdev03@yandex.ru, 450065, г. Уфа, ул. Свободы, 29.

UDC 681.5

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.003

## Estimates of the state of distributed systems by mathematical and mapping simulation methods on the example of HFRS disease data in the territory of the Republic Bashkortostan

Tatyana D. Prosvirkina<sup>1</sup>, Sergey A. Larshutin<sup>1</sup>, Vladimir E. Gvozdev<sup>2</sup>, Oksana Ya. Bezhaeva<sup>2</sup>, Ekaterina Yu. Barudkina<sup>2</sup>, Georgiy V. Gvozdev<sup>3</sup>

- <sup>1</sup> Bashkir State Medical University, Russia, Ufa, prosvirkinatd@mail.ru,
- <sup>2</sup> Ufa State Aviation Technical University, Russia, Ufa,
- <sup>3</sup> City Children's Clinical Hospital № 17, Russia, Ufa

**Abstract.** One of the effective technological methods for ensuring the comparability of data, characterizing the state of territorial systems from different position is to convert it to a form of mapping models, known as zoning of territorial systems. This paper discusses the problems of zoning the territory of the Republic Bashkortostan on the example of hemorrhagic fever with renal syndrome (HFRS) disease data. Zoning results provide the basis for solving other information problems. The paper also discusses the issues of identifying similar states of the territorial system for this indicator in different time slices. Analysis of the state of the territory as a whole is reduced in a comparison of the results obtained by means of mathematical and geoinformation models relative to the entire studied territory under various conditions of simulation. Proposed approach, allows to increase the number of particular characteristics, that is, the number of points of view on the state of the territory system.

**Keywords:** territory systems, system-forming factors, mapping simulation, estimates of the state, HFRS, network-centric control

### References

- 1. Systems Engineering Guide for Systems of Systems, Version 1.0. Washington, DC: ODUSD(A&T) SSE, 2008.
- 2. Reymers N.F. Prirodopol'zovaniye: Slovar'-spravochnik [Nature management: Dictionary-reference], Moscow, Mysl [Thought], 1990, 637 p.
- 3. Aivazyan S.A., Bukhshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Prikladnaya statistika. Klassifikatsiya i snizheniye razmernosti [Applied statistics. Classification and dimensionality reduction], M., Finansy i statistika [Finance and statistics], 1989, 607 p.
- 4. Gubanov V.A., Zakharov V.V., Kovalenkov A.N. Vvedeniye v sistemnyy analiz [Introduction to systems analysis], L. Izd-vo LGU [Publishing house of Leningrad State University], 1988, 232 p.
- 5. Deyvison M. Mnogomernoye shkalirovaniye: Metody naglyadnogo predstavleniya dannykh [Multidimensional scaling: Methods of visual presentation of data]. M., Finansy i statistika [Finance and statistics], 1988, 254 p.
- 6. Oldenderfer M.S., Bleshfild R.K. Klasternyy analiz // Faktornyy, diskriminantnyy i klasternyy analiz [Cluster analysis // Factor, discriminant and cluster analysis]. M., Finansy i statistika [Finance and statistics], 1989, pp. 139-210.
- 7. Viktorov A.S. Risunok landshafta [Landscape drawing]. M., Mysl [Thought], 1986, 179 p.
- 8. Mil'kov F.N. Fizicheskaya geografiya: sovremennoye sostoyaniye, zakonomernosti, problemy [Physical geography: current state, patterns, problems]. Voronezh, 1981, 136 p.
- 9. Mikhaylov N.I. Fiziko-geograficheskoye rayonirovaniye [Physical and geographical zoning]. M., MGU [Moscow State University], 1985, 184 p.

- 10. Rozenberg G.S., Shitikov V.K., Brusilovskiy P.M. Ekologicheskoye prognozirovaniye (funktsional'nyye prediktory vremennykh ryadov) [Environmental forecasting (functional time series predictors)]. Tol'yatti [Tolyatti], 1994. 182 p.
- 11. Fedina A.Ye. Fiziko-geograficheskoye rayonirovaniye [Physical and geographical zoning]. M., MGU [Moscow State University], 1981, 128 p.
- 12. Guzairov M.B., Gvozdev V.E., Ilyasov B.G., Kolodenkova A.E. Staticheskoye issledovaniye territorial'nykh sistem [Statistical research of territorial systems]. M., Mashinostroenie [Mechanical engineering], 2008, 187 p.
- 13. Venttsel' Ye.S. Teoriya veroyatnostey [Probability Theory]. 6th edition, Moscow, 1999, 576p.

**Tatiana Dmitrievna Prosvirkina,** PhD, Associate Professor of the Department of Infectious Diseases of the Bashkir State Medical University, ORCID: 0000-0001-7903-6804, prosvirkinatd@mail.ru, 450008, Russia, Ufa, Lenin str., 3.

Sergey Aleksandrovich Larshutin, PhD, Associate Professor of the Department of Infectious Diseases of the Bashkir State Medical University, ORCID: 0000-0003-4258-1643, larshutin@mail.ru, 450008, Russia, Ufa, Lenin str., 3.

Vladimir Efimovich Gvozdev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technical Cybernetics of Ufa State Aviation Technical University, ORCID: 0000-0002-1481-0982, SPIN: 7043-9040, AuthorID: 174520, gvozdev.ve@ugatu.su, 450008, Russia, Ufa, K. Marx str., 12.

Oksana Yakovlevna Bezhaeva, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Technical Cybernetics of Ufa State Aviation Technical University, ORCID: 0000-0002-3373-7266, AuthorID: 271220, Author ID (Scopus): 57216845244, SPIN: 9785-3875, bezhaeva.oya@ugatu.su, 450008, Russia, Ufa, K. Marx str., 12.

Ekaterina Yuryevna Barudkina, Master's student of the Department of Technical Cybernetics of the Ufa State Aviation Technical University, ORCID: 0000-0002-9658-3081, katerina.barudkina@gmail.com, 450008, Russia, Ufa, K. Marx str., 12.

Georgy Vladimirovich Gvozdev, Orthopedic Traumatologist, City Children's Clinical Hospital No. 17, ORCID: 0000-0003-4874-0895, doktor.gvozdev03@yandex.ru, 450065, Russia, Ufa, Svobody str., 29.

Статья поступила в редакцию 14.07.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 19.09.2022.

The article was submitted 07/14/2022; approved after reviewing 09/07/2022; accepted for publication 09/19/2022.

УДК 57.015 + 573.2

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.004

### Пространственная структура генов фотосинтетической системы хлоропластов водорослей с точки зрения биоинформатики

### Сенашова Мария Юрьевна

Институт вычислительного моделирования СО РАН,

Россия, Красноярск, msen@icm.krasn.ru

**Аннотация.** Рассмотрена пространственная структура генов фотосистем I и II хлоропластов водорослей. Под пространственной структурой понимается распределение точек, соответствующих частотным словарям генов, в пространстве частот триплетов. Гены фотосистем образуют два основных кластера, соответствующих прямому и обратному стренду. Не обнаружено группирования точек внутри основных кластеров ни по видам организмов, ни по типам генов, как это характерно для хлоропластов наземных растений и цианобактерий. Распределение по значениям GC-состава неоднородно. Часть надтипов имеют градиентное распределение, часть не обнаруживают выраженного порядка распределения.

Ключевые слова: порядок, кластеризация распределения, эволюция, триплеты

**Цитирование:** Сенашова М.Ю. Пространственная структура генов фотосинтетической системы хлоропластов водорослей с точки зрения биоинформатики / М.Ю. Сенашова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. -2022. -№ 3(27). - C. 34-39. - DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.004.

Введение. Термин «водоросли» является собирательным для огромной группы эукариотических организмов и прокариот, имеющих разное происхождение и не обязательно родственных друг другу. Существует несколько отдельных филогенетических ветвей эукариот, которые эволюционировали независимо друг от друга и содержат фотосинтезирующие организмы. Вопрос о происхождении и эволюции водорослей очень сложен из-за разнообразия этих растений, особенно их субмикроскопического строения и биохимических признаков. Решение этой проблемы затруднено, кроме того, плохой сохранностью большинства водорослей в ископаемом состоянии и отсутствием связующих звеньев между современными отделами растений в виде организмов промежуточного строения.

Не меньший интерес вызывает эволюция фотосинтеза, как с точки зрения изменения структуры фотосистемы в целом, так и ее отдельных единиц. В работах [1-11] рассматриваются различные структурные единицы фотосистем I и II цианобактерий, водорослей и наземных растений с точки зрения биологии и молекулярной генетики, их сходство и различия, возникшие в процессе эволюции. В работах [1-3] анализируются особенности фотосистем I и II красных водорослей, которые являются эволюционным звеном между цианобактериями и растениями. В работах [4-11] сравнивается структура фотосистем I и II цианобактерий, водорослей и высших растений. Показано, что фотосистема имеет высоко консервативное ядро, которое практически не изменяется в процессе эволюции и изменяющуюся часть, которая связана с большим разнообразием среды обитания фотосинтезирующих организмов.

Задачей этой работы было выяснить, можно ли проследить эволюцию фотосинтеза с точки зрения биоинформатики по генетическим текстам. Ранее в [12, 13], были рассмотрены пространственные структуры генов фотосистем I и II цианобактерий и хлоропластов наземных растений. Водоросли являются промежуточным звеном между этими группами организмов. Рассмотрим, чем похожи и чем отличаются структуры, образующиеся в пространстве частот триплетов, для трех этих групп.

**1. Материалы и методы.** Введём основные понятия. Будем рассматривать гены фотосинтетических систем как символьные последовательности различной длины, состоящие из символов алфавита  $\mathcal{M} = \{A, C, G, T\}$ . Каждой из этих последовательностей мы будем ста-

вить в соответствие частотный словарь толщины 3. Частотный словарь толщины 3 символьной последовательности, соответствующей ДНК — это список всех троек  $^{V_1V_2V_3}$  идущих подряд нуклеотидов с указанием частот этих троек; всего может быть 64 триплета. Частота  $^{f_{\varpi}}$  — это отношение числа копий  $^{n_{\varpi}}$  данного слова к общему числу всех триплетов  $^{N}$  , где  $^{N}$  — сумма всех  $^{n_{\varpi}}$ :

$$f_{\omega} = \frac{n_{\omega}}{N} \tag{1}$$

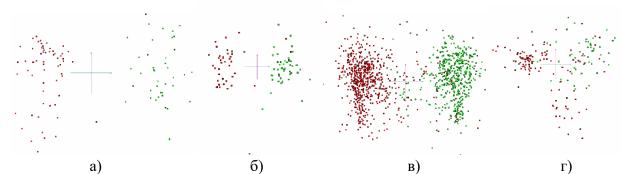
Всякий частотный словарь  $W_3$  отображает символьную последовательность в 64-мерное метрическое пространство; близость двух геномов задается естественным образом – например, как близость двух точек в Евклидовой метрике:

$$\rho\left(W_3^1, W_3^2\right) = \sqrt{\sum_{\omega=AAA}^{TTT} \left(f_\omega^1 - f_\omega^2\right)^2} . \tag{2}$$

Для каждого гена был построен частотный словарь  $W_{(3,3)}$ . Частотный словарь  $W_{(3,3)}$ представляет собой множество частот триплетов, причем триплеты в гене брались без пересечения троек символов. Для генов, находящихся в обратном стренде, частотный словарь строился с учетом того, что символьная последовательность, относящаяся к таким генам, инвертировалась. Частотный словарь соответствует точке в 64-мерном пространстве. Таким образом, каждому гену соответствует точка в пространстве частот триплетов. Для визуализации пространственной структуры, образованной множеством этих точек, была построена проекция в пространство первых трех главных компонент. Для выявления структуры в наборе генов проводилась предварительная обработка, которая ставила в соответствие данному набору символьных последовательностей множество точек в 64-мерном пространстве триплетов. Каждому гену соответствует своя точка. Кроме названия гена, с точкой связаны название вида, которому принадлежит ген, к какому стренду ген относится – прямому или обратному, GC-состав гена. По полученному множеству точек в программе VidaExpert(http://bioinfo-out.curie.fr/projects/vidaexpert/) строился вид данных в пространстве первых трёх главных компонент, вычисленных для 64-мерного пространства триплетов. Рассматривались проекции на плоскости пространства первых главных компонент.

2. Результаты. Были проанализированы 142 генома хлоропластов одноклеточных и многоклеточных водорослей, имеющихся на настоящий момент в EMBL-банке, в том числе одноклеточные водоросли следующих надтипов: Alveolata — 4 вида, Chlorophyta — 57 видов, Cryptophyta — 3 вида, Euglenozoa — 4 вида, Glaucophyta — 1 вид, Haptophyta — 4 вида, Ochrophyta Bacillariophyta — 37 видов, Rhodophyta — 4 вида, Streptophyta — 10 видов. Для многоклеточных водорослей число имеющихся надтипов существенно меньше: Chlorophyta — 4 вида, Ochrophyta Bacillariophyta — 4 вида, Rhodophyta — 7 видов, Streptophyta — 3 вида. К сожалению, EMBL-банк содержит далеко не все надтипы водорослей, а количество видов в имеющихся надтипах сильно отличается. Во всех геномах выделялись гены фотосинтетических систем I и II, для которых анализировалось пространственное распределение точек, соответствующих генам в пространстве частот триплетов, в соответствии со стрендами, принадлежности к определенным видам, типам генов и величине *GC*-состава.

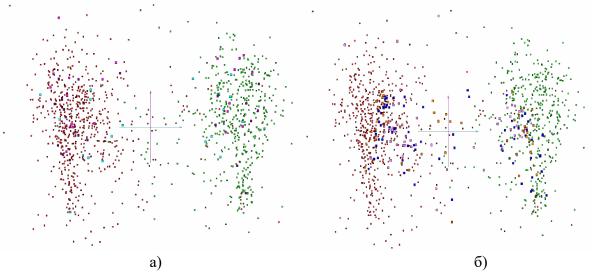
Ранее для генов наземных растений и цианобактерий было обнаружено четкое разделение соответствующих им точек пространства триплетов на кластеры прямого и обратного стрендов. Аналогичное разделение обнаружено для генов фотосистем одноклеточных и многоклеточных водорослей.



**Рис. 1.** Проекция в плоскость двух первых главных компонент. Гены, лежащие в прямом стренде, обозначены красным цветом, гены, лежащие в обратном стренде, обозначены зеленым цветом

В качестве примера на рисунке 1a) показано разделения на кластеры, соответствующие прямому и обратному стренду, генов надтипа *Alveolata*. Однако существуют три исключения из такого распределения: гены одноклеточных водорослей надтипа *Chlorophyta* (рисунок 1б), *Cryptophyta* (рисунок 1в), *Euglenozoa* (рисунок 1г).

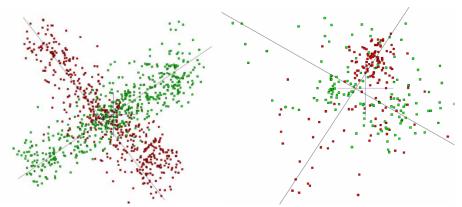
Гены фотосистемы хлоропластов наземных растений образуют плотные кластеры внутри кластеров, относящихся к прямому и обратному стренду. Гены фотосистемы цианобактерий, напротив, образуют кластеры по видовой принадлежности организмов. Гены фотосистемы как одноклеточных, так и многоклеточных водорослей не группируются ни по одному из этих признаков, как видно из рисунка 2. На рисунке 2а) показаны одинаковым цветом точки, относящиеся к одному и тому же виду из надтипа *Chlorophyta*. Малиновым цветом обозначены точки, относящиеся к виду *Auxenochlorella protothecoides*, бирюзовым – к виду *Botryococcus braunii*, фиолетовым – к виду *Chlorella sorokiniana*. Красными и зелеными квадратами меньшего размера обозначены другие точки прямого и обратного стренда. На рисунке 2б) одинаковым цветом показаны точки, относящиеся к одному и тому же типу гена. Синим цветом обозначены точки, относящиеся к гену *psaA*, оранжевым – к гену *psaB*, розовым – к гену *psaC*.



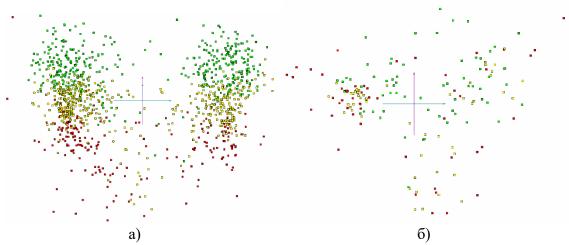
**Рис. 2.** Распределение точек, относящихся к одному виду (2a) и одному типу гена (2б) в плоскости первой и второй главных компонент

Кластеры прямого и обратного стрендов генов фотосистемы цианобактерий могут быть аппроксимированы вложенными плоскостями [13]. В плоскости 2-ой и 3-ей главных компонент эти плоскости перпендикулярны друг другу (рисунок 3a). Для всех остальных рассмот-

ренных генов фотосистемы (хлоропластов наземных растений и водорослей) такого не наблюдалось. Наиболее похожая структура наблюдается у водорослей надтипа *Rhodophyta* (рисунок 36). Это очень древняя группа водорослей. Хлоропласты у этих водорослей возникли в результате первичного эндосимбиоза с цианобактериями. При этом у красных водорослей сохраняются фикобилисомы — белковые комплексы, характерные для цианобактерий. К сожалению, в EMBL-банке довольно мало водорослей надтипа *Rhodophyta* (всего 11 видов) и это может давать не точную картину.



**Рис. 3.** Структура множества точек, соответствующих прямому и обратному стренду у генов фотосистемы цианобактерий 3a) и водорослей надтипа *Rhodophyta* 3б) в плоскости второй и третьей главных компонент



**Рис. 4.** Пространственное расположение значений *GC* - состава генов фотосинтетических систем надтипа *Chlorophyta* 4a) и надтипа *Euglenozoa* 4б) в плоскости первой и второй главных компонент

Для каждого гена вычислялся его GC - состав, то есть отношение количества нуклеотидов G и C к общему числу нуклеотидов в гене. Точки, соответствующие генам со значением GC - состава меньше среднего, обозначены на рис. 4 зеленым цветом, точки, соответствующие генам со средним значением GC - состава, обозначены желтым цветом и точки со значением GC - состава больше среднего обозначены красным цветом. При анализе пространственного расположения значений GC - состава для генов фотосистем хлоропластов наземных растений и цианобактерий было обнаружено, что для цианобактерий характерно градиентное распределение значений GC - состава, а для хлоропластов наземных растений отсутствие какой-либо упорядоченности. Аналогичный анализ был выполнен для генов фотосистем водорослей. Было обнаружено, что градиентное распределение значений GC -

состава наблюдается для надтипов *Alveolata*, *Bacillariophyta*, *Chlorophyta*, *Ochrophyta*, *Streptophyta* (рис. 4a). Для всех остальных исследованных надтипов не наблюдается какойлибо упорядоченности (рис. 4б).

Заключение. Водоросли являются промежуточным звеном эволюции фотосинтеза между цианобактериями и наземными растениями. Водоросли встречаются в основном в водной среде обитания, но широко встречаются и в наземных экосистемах. Отдельные представители обитают в горячих источниках, на скалах, льду, снегу, известковом субстрате. Большое разнообразие среды их обитания обусловливает различия в морфологии и других параметрах организмов. Как было показано выше, нет типичной картины пространственной структуры генов фотосистем хлоропластов водорослей, как это наблюдается для цианобактерий и наземных растений, которые гораздо более однородны по морфологии и выполняемым функциям. Следует обратить внимание, что отсутствие кластеризации как по видам организмов (наблюдаемое у цианобактерий), так и по типам генов (наблюдаемое у наземных растений) может свидетельствовать в пользу того, что водоросли являются промежуточным звеном эволюции между цианобактериями и наземными растениями.

## Список источников

- 1. Vanselow C. et al. Genetic analysis of the Photosystem I subunits from the red alga, Galdieria sulphuraria. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics, 2009, vol. 1787, no. 1, pp. 46-59.
- 2. Gardian Z. et al. Organisation of photosystem I and photosystem II in red alga Cyanidium caldarium: encounter of cyanobacterial and higher plant concepts. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics, 2007, vol. 1767, no. 6, pp. 725-731.
- 3. Enami I. et al. Structures and functions of the extrinsic proteins of photosystem II from different species. Photosynthesis research, 2008, vol. 98, no. 1, pp. 349-363.
- 4. Antoshvili M. et al. Structure and function of photosystem I in Cyanidioschyzon merolae. Photosynthesis research, 2019, vol. 139, no. 1, pp. 499-508.
- 5. Kato K. et al. Structure of a tetrameric photosystem I from a glaucophyte alga Cyanophora paradoxa. Nature communications, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 1-11.
- 6. Caspy I. et al. Structure and energy transfer pathways of the Dunaliella Salina photosystem I supercomplex. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics, 2020, vol. 1861, no. 10, pp. 148253.
- 7. Mulo P., Sakurai I., Aro E. M. Strategies for psbA gene expression in cyanobacteria, green algae and higher plants: from transcription to PSII repair. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics, 2012, vol. 1817, no. 1, pp. 247-257.
- 8. Hippler M., Nelson N. The plasticity of photosystem I. Plant and Cell Physiology, 2021, vol. 62, no. 7, pp. 1073-1081.
- 9. Busch A., Hippler M. The structure and function of eukaryotic photosystem I. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics, 2011, vol. 1807, no. 8, pp. 864-877.
- 10. Alboresi A. et al. Conservation of core complex subunits shaped the structure and function of photosystem I in the secondary endosymbiont alga Nannochloropsis gaditana. New Phytologist, 2017, vol. 213, no. 2, pp. 714-726.
- 11. Nugent J.H. A., Purton S., Evans M.C.W. Oxygenic photosynthesis in algae and cyanobacteria: electron transfer in photosystems I and II. Photosynthesis in algae, Springer, Dordrecht, 2003, pp. 133-156.
- 12. Senashova M. Yu. Spatial Structure of Chloroplast Genes of Photosynthetic Systems I And II. CEUR Workshop Proceedings of the 2nd Siberian Scientific Workshop on Data Analysis Technologies with Applications, 2021, vol. 3047, pp. 115-120.
- 13. Senashova M. Yu. Unusual Distribution Structure of the Cyanobacteria Photosystem Genes in the Frequency Space of Triplets. CEUR Workshop Proceedings of the 2nd Siberian Scientific Workshop on Data Analysis Technologies with Applications, 2021, vol. 3047, pp. 121-125

**Сенашова Мария Юрьевна.** К.т.н., доцент, с.н.с. Института вычислительного моделирования СО РАН. Основные направления исследований: анализ данных, динамика популяций, биоинформатика. AuthorID: 133140, SPIN-код: 1178-6320, ORCID: 0000-0002-1023-7103, msen@icm.krasn.ru, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44.

UDC 57.015 + 573.2

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.004

## Spatial structure of the genes of the algal chloroplasts photosynthetic system from the bioinformatics point of view

### Maria Yu. Senashova

Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, Krasnoyarsk, *msen@icm.krasn.ru* 

**Annotation.** The photosynthetic systems I and II chloroplasts genes spatial structure is considered. The spatial structure is understood as the distribution of points corresponding to the frequency dictionaries of genes in the space of triplets frequencies in this work. The photosystems I and II genes are clustered according to their belonging to the forward and reverse strands. Points corresponding to genes in the forward and reverse strands are located at a distance from the main clusters. Any structure wasn't found for the distribution of the genes' GC-content values in the frequency space.

Keywords: Order, Distribution clustering, Evolution, Triplets

### References

- 1. Vanselow C. et al. Genetic analysis of the Photosystem I subunits from the red alga, Galdieria sulphuraria. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics, 2009, vol. 1787, no. 1, pp. 46-59.
- 2. Gardian Z. et al. Organisation of photosystem I and photosystem II in red alga Cyanidium caldarium: encounter of cyanobacterial and higher plant concepts. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics, 2007, vol. 1767, no. 6, pp. 725-731.
- 3. Enami I. et al. Structures and functions of the extrinsic proteins of photosystem II from different species. Photosynthesis research, 2008, vol. 98, no. 1, pp. 349-363.
- 4. Antoshvili M. et al. Structure and function of photosystem I in Cyanidioschyzon merolae. Photosynthesis research, 2019, vol. 139, no. 1, pp. 499-508.
- 5. Kato K. et al. Structure of a tetrameric photosystem I from a glaucophyte alga Cyanophora paradoxa. Nature communications, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 1-11.
- 6. Caspy I. et al. Structure and energy transfer pathways of the Dunaliella Salina photosystem I supercomplex. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics, 2020, vol. 1861, no. 10, pp. 148253.
- 7. Mulo P., Sakurai I., Aro E. M. Strategies for psbA gene expression in cyanobacteria, green algae and higher plants: from transcription to PSII repair. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics, 2012, vol. 1817, no. 1, pp. 247-257.
- 8. Hippler M., Nelson N. The plasticity of photosystem I. Plant and Cell Physiology, 2021, vol. 62, no. 7, pp. 1073-1081.
- 9. Busch A., Hippler M. The structure and function of eukaryotic photosystem I. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics, 2011, vol. 1807, no. 8, pp. 864-877.
- 10. Alboresi A. et al. Conservation of core complex subunits shaped the structure and function of photosystem I in the secondary endosymbiont alga Nannochloropsis gaditana. New Phytologist, 2017, vol. 213, no. 2, pp. 714-726.
- 11. Nugent J.H. A., Purton S., Evans M.C.W. Oxygenic photosynthesis in algae and cyanobacteria: electron transfer in photosystems I and II. Photosynthesis in algae, Springer, Dordrecht, 2003, pp. 133-156.
- 12. Senashova M. Yu. Spatial Structure of Chloroplast Genes of Photosynthetic Systems I And II. CEUR Workshop Proceedings of the 2nd Siberian Scientific Workshop on Data Analysis Technologies with Applications, 2021, vol. 3047, pp. 115-120.
- 13. Senashova M. Yu. Unusual Distribution Structure of the Cyanobacteria Photosystem Genes in the Frequency Space of Triplets. CEUR Workshop Proceedings of the 2nd Siberian Scientific Workshop on Data Analysis Technologies with Applications, 2021, vol. 3047, pp. 121-125.

Senashova Maria Yurievna. Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher Institute of Computational Modeling SB RAS. Main areas of research: data analysis, population dynamics, bioinformatics. AuthorID: 133140, SPIN: 1178-6320, ORCID: 0000-0002-1023-7103, msen@icm.krasn.ru, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, building 44.

Статья поступила в редакцию 05.08.2022; одобрена после рецензирования 06.09.2022; принята к публикации 16.09.2022.

 $The \ article \ was \ submitted \ 08/05/2022; \ approved \ after \ reviewing \ 09/06/2022; \ accepted \ for \ publication \ 09/16/2022.$ 

УДК 004.93

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.005

## Построение карт глубины при обнаружении презентационных атак в системах распознавания лиц

## Фаворская Маргарита Николаевна, Пахирка Андрей Иванович

Сибирский государственный университет науки и технологий имени акад. М.Ф. Решетнева, Россия, Красноярск, *favorskaya@sibsau.ru* 

Аннотация. В настоящее время системы распознавания лиц являются широко распространенным способом биометрической идентификации на практике. Однако такие системы требуют защиты от несанкционированных действий в виде так называемых презентационных атак, когда злоумышленник осуществляет подмену подлинных изображений поддельными изображениями или короткими видеопоследовательностями. В статье предлагается метод обнаружения презентационных атак с использованием глубины сцены без применения специальных датчиков. Задача заключается в том, чтобы усилить тонкую разницу между подлинными и поддельными изображениями. Для этого была обучена и протестирована глубокая сеть, состоящая из блоков свертки центральной разности и многомасштабного модуля внимания. Эксперименты показали, что предварительное преобразование входных изображений лиц в цветовое пространство HSV имеет преимущество по точности обнаружения поддельных изображений. Так, точность обнаружения на собственном наборе данных, наборах данных КІТТІ и Cityscapes возросла на 3-7% в зависимости от устройств захвата, условий освещения и настроек самого алгоритма.

Ключевые слова: презентационные атаки, распознавание лиц, карты глубины, глубокое обучение

**Цитирование:** Фаворская М.Н. Построение карт глубины при обнаружении презентационных атак в системах распознавания лиц / М.Н. Фаворская, А.И. Пахирка // Информационные и математические технологии в науке и управлении. -2022. № 3(27). - С. 40-48. - DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.005.

Введение. Распознавание лиц в системах биометрической идентификации занимает ведущее положение среди других способов идентификации, например, идентификации личности по отпечаткам пальцев и радужной оболочки глаза, которые требуют наличия дорогостоящего оборудования. Распознавание лиц с использованием видеокамер используется для выполнения широкого спектра видеонаблюдения, начиная от неинвазивного городского видеонаблюдения и завершая доступом для ограниченного круга лиц. В последнем случае, как правило, осуществляется двойная или даже тройная биометрическая проверка, не ограничивающаяся анализом визуального представления лица в оптическом диапазоне. Наиболее широкое применение системы распознавания лиц нашли в платежных системах, системах общественной безопасности, контрольно-пропускных системах с невысоким уровнем секретности и т.д. Однако изображения лиц или видеоролики могут быть легко украдены, например, из социальных сетей или файлообменников, что приводит ко всем видам презентационных атак (presentation attacks, PAs) на системы распознавания лиц. Презентационные атаки включают три основных типа: атаки с использованием печати (print attack), атаки воспроизведения (replay attack), под которыми понимается предъявление с помощью электронных средств (смартфонов, планшетов) отдельных изображений или коротких видеороликов, а также атаки с использованием 3D масок (3D mask attack), макияжа или профессионального гримирования. Такие атаки или их совокупность могут нанести значительный ущерб безопасности и имуществу. Таким образом, разработка методов и средств обнаружения поддельных изображений лиц (антиспуфинг, от англ. face anti-spoofing, FAS) является важным направлением исследований для академических кругов и промышленности. В данном исследовании рассматриваются атаки печати и воспроизведения. Атаки с использованием 3D масок, как правило, представляют собой отдельные исследования.

Следует отметить, что с точки зрения конечного пользователя осуществление презентационной атаки может преследовать две цели. Первая цель заключается в том, чтобы обмануть систему и выдать себя за другое лицо, которое имеет доступ. Вторая цель состоит в том,

чтобы выдать себя за другое лицо, хотя изначально пользователь имеет доступ. В обоих случаях основное внимание уделяется предотвращению презентационной атаки, а мотивировка конечного пользователя может быть легко выяснена с помощью базы данных персональной информации или другими способами.

1. Обзор методов антиспуфинга для обнаружения презентационных атак. Развитие антиспуфинговых методов можно разделить на два этапа. Этап, основанный на традиционных методах обработки изображений, предполагал извлечение признаков с участием эксперта и продолжался до этапа появления нейросетевых моделей глубокого обучения. Традиционные подходы, такие, как локальные бинарные шаблоны [1–3], гистограммы направленных градиентов [4–5] и точечные дескрипторы [6], характеризуются плохим обобщением, поскольку качество изображений или видеопоследовательности (в частности, текстура) зависит от конкретной видеокамеры. Методы глубокого обучения, способные автоматически извлекать богатую семантическую информацию, предоставляют надежные решения и в данной области [7–10].

По сравнению с традиционными подходами методы, основанные на глубоком обучении, извлекают информацию об отличительных признаках поддельных образцов поэтапно [7, 9]. В настоящее время существуют около 100 моделей глубоких искусственных нейронных сетей, использующих различные признаки для нахождения поддельных образцов лиц. Однако в данном исследовании мы ориентируемся на методы обнаружения поддельных изображений с использованием глубины. Глубина представляет собой значимый признак, особенно в презентационных атаках, в виде распечатанных фотографий, снимков со смартфонов и ноутбуков, а также в атаках воспроизведения, когда демонстрируется непродолжительный видеоклип. При атаках с использованием недорогих эластичных масок признак глубины фактически теряет значимость и целесообразен только при применении инфракрасных камер.

Кратко рассмотрим известные методы на основе глубины как степени расхождения между реальными и поддельными образцами. Одной их первых значимых работ была статья Атоум и др., опубликованная в 2017 г. [7]. Была построена двухпотоковая сверточная нейронная сеть (СНС), извлекающая локальные признаки спуфинга независимо от их пространственного расположения и строящая карту глубины изображения в целом. Предположение основано на том, что карта глубины отражает изображение реального лица как трехмерного объекта, в то время как изображение поддельного лица является плоскостью при атаках печати или атаках воспроизведения. Однако такое предположение верно для RGB-D систем, когда помимо плоского изображения строится карта глубины с помощью датчика расстояния. Именно таким образом была обучена сеть с использованием больших RGB-D наборов данных внутренних сцен помещений (не изображений лиц) [11]. В работе [8] предложен пространственно-временной подход, основанный на моделировании карт глубины и сигналов дистанционной фотоплетизмографии (remote PhotoPlethysmoGraphy, rPPG) с помощью СНС и рекуррентной нейронной сети соответственно. Для построения карты глубины 2D изображения лица был использован метод плотного выравнивания [12], который оценивает 3D-форму лица. В свою очередь, дистанционная фотоплетизмография – это метод отслеживания жизненно важных сигналов (например, частота сердечных сокращений) без контакта с кожей человека. Для анализа RGB-изображений метод определяет разницу в цвете, используя хроматические составляющие. Отметим, что обычно метод rPPG используется для противодействия атакам маскирования. В работе [13] изучались признаки шума и глубины для обобщенной защиты от спуфинга. Однако использование обычных СНС не обеспечивает создание детализированных шаблонов для оценки глубины.

В работе [9] разработан метод обнаружения презентационных атак по нескольким кадрам на основе оценки величина пространственного градиента между реальными и поддельными изображениями лиц, а также динамики движущихся 3D лиц. Блок остаточного пространственного градиента анализирует контуры, а пространственно-временная информация кодируется в модуле пространственно-временного распространения. Показано, что предложенная функция потерь контраста глубины обеспечивает более точные результаты.

Из краткого обзора видно, что использование данных о глубине оказывает существенное влияние на процесс обнаружения презентационных атак.

- **2.** Модели цветовых искажений при атаках печати и воспроизведения. Артефакты цвета являются одними из основных видов артефактов при атаках печати и воспроизведения. Они обусловлены погрешностями принтеров и видеокамер при воспроизведении цветовой гаммы. Приведем основные артефакты, связанные с искажением цвета:
  - цветовая гамма изображение лица в виде распечатанной фотографии или на цифровом экране моделируется цветовой моделью СМҮК- или RGB-преобразованием, что ограничивает цветовую гамму кожи. В результате подлинные изображения лиц имеют более богатую цветовую гамму, чем поддельные изображения;
  - распределение цвета дополнительные цветовые преобразования изменяют цветовое распределение, что приводит к хроматическим различиям по насыщенности цвета, пикам цветовой гистограммы и интервальным распределениям;
  - цветовое искажение поскольку устройства захвата имеют погрешности, поддельные изображения подвергаются цветовому искажению дважды, а подлинные изображения только один раз, что приводит к более серьезным искажениям цвета поддельных изображений;
  - цвет текстуры атаки печати и воспроизведения искажают изображения кожи, что приводит к несоответствию хроматической текстуры поддельного и подлинного изображений;
  - артефакты захвата изображения поскольку поддельное изображение на фотографии или экране представлено массивом дискретных значений, возникают артефакты в виде муара при захвате видеокамерой поддельного изображения.

В соответствии с законом Ламберта яркость поддельного изображения  $I^L$  в точке с координатами (x, y) определяется как

$$I^{L}(x,y) = K(x,y)L_{A}, \tag{1}$$

где  $K(x, y) \in [0, 1]$  — коэффициент отражения в точке (x, y),  $L_A \in [0, \infty)$  — интенсивность окружающего освещения. При фиксированном значении  $L_A$  величина  $I^L(x, y)$  определяется коэффициентом K(x, y).

Предположим, что интенсивность в заданном пикселе (x, y) подлинного изображения  $I_R$  является линейной комбинацией яркости и цветности

$$I_R(x, y) = I_R^L(x, y) + I_R^C(x, y) = K_S(x, y)L_A + C_R(x, y)D_C,$$
 (2)

где  $I_R^L(x,y)$  – яркость подлинного изображения в точке (x,y),  $I_R^C(x,y)$  – цветность подлинного изображения в точке (x,y),  $K_S(x,y)$  – коэффициент отражения поверхности,  $C_R(x,y)$  – цветовая гамма кожи,  $D_C$  – параметр искажения цвета, обусловленный устройством захвата.

В случае атаки печати интенсивность в заданном пикселе  $I_P(x, y)$  при фиксированном окружающем освещении и искажении от устройства захвата определится следующим образом:

$$I_{P}(x,y) = K_{P}(x,y)L_{A} + I_{R}(x,y)D_{P}D_{C},$$
 (3)

где  $K_P(x, y) \in [0, 1]$  — коэффициент отражения в точке (x, y) поддельного напечатанного изображения,  $I_R(x, y)$  — подлинное изображение лица или подлинное видео, использованное при атаке печати,  $D_P$  — параметр искажения цвета при атаке печати.

Подставив выражение (2) в выражение (3) и выделив компоненты яркости и цветности, получим следующие выражения для компонент яркости и цветности при атаке печати:

$$I_{P}^{L}(x,y) = (K_{P}(x,y) + K_{S}(x,y)D_{P}D_{C})L_{A},$$

$$I_{P}^{C}(x,y) = C_{R}(x,y)D_{P}D_{C}^{2}.$$
(4)

Аналогичным образом можно представить выражения для компонент яркости  $I_D^L(x,y)$  и цветности  $I_D^C(x,y)$  при атаке воспроизведения:

$$I_D^L(x,y) = (K_D(x,y) + K_S(x,y)D_TD_C)L_A,$$
  

$$I_D^C(x,y) = C_R(x,y)D_TD_C^2,$$
(4)

где  $K_D(x, y) \in [0, 1]$  — коэффициент отражения в точке (x, y) экрана дисплея,  $D_T$  — параметр искажения цвета при атаке воспроизведения.

Из приведенных выражений (1)–(4) видно, что презентационные атаки вносят искажения в значения яркости и цветности. Далее рассмотрим, каким образом эти искажения проявляются на картах глубины подлинных и поддельных изображений лиц.

3. Построение карты глубины изображения лица. Часто задача обнаружения поддельных изображений лиц рассматривается как задача бинарной классификации. Однако в этом случае не учитывается природа спуфинговых изображений, например, потеря контурной информации, искажение цвета, появление муара и других артефактов. Один из способов преодоления таких проблем основан на разработке методов обнаружения презентационных атак с использованием глубины сцены. Интуитивно понятно, что подлинные изображения лиц имеют более явные признаки глубины, в то время как поддельные изображения лиц при атаках печати и атаках воспроизведения характеризуются наличием только планарной глубины.

Явный способ построения карт глубины основан на применении специальных дополнительных устройств, таких, как RGB-D датчики, стереокамеры, ToF-камеры (Time of Flight) и т.д. Однако более привлекательным является отсутствие дополнительных устройств при наличии соответствующих алгоритмов, усиливающих тонкую разницу между подлинными и поддельными изображениями.

Рассмотрим задачу построения карт глубины изображений лиц без предварительного этапа выравнивания таких изображений, например, по биометрическим точкам. Этап выравнивания необходим для изображений, полученных от систем городского видеонаблюдения. В большинстве наборов данных для обучения глубоких сетей изображения выравнены.

При построении карты глубины за основу взята глубокая сеть из работы [14], которая состоит из блоков свертки центральной разности и многомасштабного модуля внимания. Сеть упрощена за счет удаления многомасштабного модуля внимания. На вход сети подается изображение лица размерностью 256×256×3, а на выходе создается прогнозируемая карта глубины в градациях серого разрешением 32×32 пикселов. При этом среднеквадратичная ошибка потерь (mean square error, MSE) вычисляется по формуле:

$$L_{MSE} = \|D_P - D_G\|_2^2, (5)$$

где  $D_P$  – прогнозируемая карта глубины,  $D_G$  – истинная карта глубины.

В качестве классификатора использованы два полносвязных слоя, которые классифицируют построенную карту глубины с помощью логистической функции на два класса. В

качестве функции потерь используется функция энтропии. Отличие предлагаемого подхода состоит в том, что на вход сети подаются не RGB-изображения, а изображения, преобразованные в другие цветовые пространства (в данном случае HSV). Архитектура базовой сети представлена на рисунке 1.

RGB- и HSV-изображения

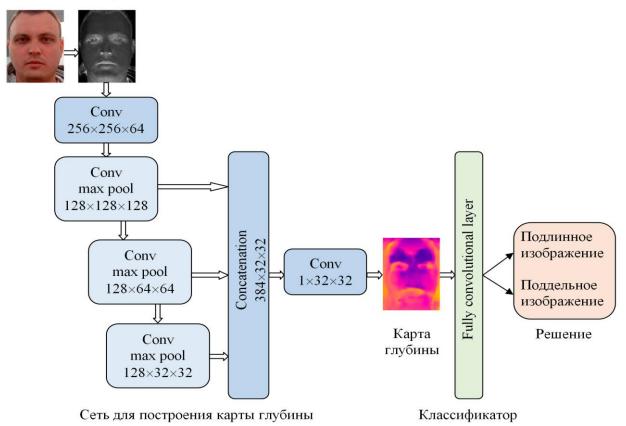


Рис. 1. Архитектура глубокой нейронной сети

- **4.** Экспериментальные исследования. Для генерации карт глубины предложенная модель СНС обучалась на трех различных наборах данных:
  - собственный набор данных, включающий 3120 изображений лиц разрешением 256×256 пикселов для 26 различных персон. Примеры карт глубины представлены на рисунке 2a;
  - набор данных КІТТІ [15], включающий 42382 подготовленных стереоизображений разрешением 1242×375 пикселов. Примеры карт глубины приведены на рисунке 26;
  - набор данных Cityscapes [16], содержащий большое количество стерео видеопоследовательностей с аннотациями, записанных в 50 различных городах. Примеры карт глубины представлены на рисунке 2в.

При этом тестирование генерации карты глубины проводилось на наборе данных LCC FASD [17], включающем 1942 оригинальных изображений лиц и 16885 поддельных изображений лиц с применением 83 различных устройств, полученных из разных web-ресурсов.

На рисунке 3 приведены примеры карт глубины для подлинного и поддельных изображений, представленных на рисунке 2, но переведенных в цветовое пространство HSV.

Визуальная оценка свидетельствует, что в большинстве случаев (в зависимости от устройств захвата) карты глубины поддельных изображений, переведенных в цветовое пространство HSV, фиксируют более заметные отличия от карт глубины подлинных изображений, также переведенных в цветовое пространство HSV. При этом точность обнаружения поддельных изображений лиц возросла на 3-7% (таблица 1), что считается хорошим резуль-

татом, поскольку анализ карт глубины не является самостоятельным методом защиты систем биометрического распознавания.

а В

**Рис. 2.** Примеры карт глубины подлинного и поддельных RGB-изображений: (а) карты глубины изображений из собственного набора, (б) карты глубины изображений из набора KITTI, (в) карты глубины изображений из набора Cityscapes

Подлинное HSV изображение

## Поддельные HSV-изображения



**Рис. 3.** Примеры карт глубины подлинного и поддельных HSV-изображений: (а) карты глубины изображений из собственного набора, (б) карты глубины изображений из набора KITTI, (в) карты глубины изображений из набора Cityscapes

**Таблица 1.** Точность обнаружения поддельных изображений при использовании карт глубины для различных наборов данных

Набор данных	Оригинальные изображения, %	В пространстве HSV, %
Собственный набор	84,4	87,4
KITTI	85,3	92,2
Cityscapes	86,3	89,6

Заключение. Проведенное исследование показывает целесообразность применения карт глубины с целью обнаружения презентационных атак в системах распознавания лиц. Карты глубины, построенные с помощью несложной глубокой нейронной сети, повышают точность обнаружения поддельных изображений лиц на 3-7% в зависимости от устройств захвата, условий освещения и настроек самого алгоритма.

### Список источников

- 1. Määttä J., Hadid A., Pietikäinen M. Face spoofing detection from single images using micro-texture analysis // 2011 International Joint Conference on Biometrics (IJCB), IEEE, Washington, DC, USA, 2011, pp. 1-7.
- 2. De Freitas Pereira T., Anjos A., De Martino J.M., Marcel S. LBP-TOP based countermeasure against face spoofing attacks. Computer Vision ACCV 2012 Workshops. ACCV 2012. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, vol. 7728, pp. 121-132.
- 3. De Freitas Pereira T., Anjos A., De Martino J.M., Marcel S. Can face anti-spoofing countermeasures work in a real world scenario? International Conference on Biometrics (ICB), IEEE, Madrid, Spain, 2013, pp. 1-8.
- 4. Komulainen J., Hadid A., Pietikäinen M. Context based face anti-spoofing. Sixth International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS), IEEE, Arlington, VA, USA, 2013, pp. 1-8.
- 5. Yang J., Lei Z., Liao S., Li S.Z. Face liveness detection with component dependent descriptor // International Conference on Biometrics (ICB), IEEE, Madrid, Spain, 2013, pp. 1-6.
- 6. Boulkenafet Z., Komulainen J., Hadid A. Face antispoofing using speeded-up robust features and Fisher vector encoding. Signal Processing Letters, 2016, vol. 24, no. 2, pp. 141-145.
- 7. Atoum Y., Liu Y., Jourabloo A., Liu X. Face anti-spoofing using patch and depth-based CNNs. International Joint Conference on Biometrics (IJCB), IEEE, Denver, CO, USA, 2017, pp. 319-328.
- 8. Liu Y., Jourabloo A., Liu X. Learning deep models for face anti-spoofing: binary or auxiliary supervision. In: 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, Salt Lake City, UT, USA, 2018, pp. 389-398.
- 9. Wang Z., Yu Z., Zhao C., Zhu X., Qin Y., Zhou Q., Zhou F., Lei Z. Deep spatial gradient and temporal depth learning for face anti-spoofing // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, Seattle, WA, USA, 2020, pp. 5042-5051.
- Liu S., Yuen P.C., Zhang S., Zhao G. 3D mask face anti-spoofing with remote photoplethysmography // Leibe B., Matas J., Sebe N., Welling M. (eds.) Computer Vision – ECCV, Springer, Cham, LNCS, 2016, vol. 9911, pp. 85-100.
- 11. Silberman, N., Hoiem, D., Kohli, P., Fergus, R. Indoor segmentation and support inference from RGBD images. In: Fitzgibbon, A., Lazebnik, S., Perona, P., Sato, Y., Schmid, C. (eds) Computer Vision ECCV, Springer, Berlin, LNCS, 2012, vol. 7576, pp. 746-760.
- 12. Liu Y., Jourabloo A., Ren W., Liu X. Dense face alignment // International Conference on Computer Vision (ICCV), IEEE, Venice, Italy, 2017, pp. 1619-1628.
- 13. Jourabloo A., Liu Y., Liu X. Face de-spoofing: Anti-spoofing via noise modeling. In: Ferrari, V., Hebert, M., Sminchisescu, C., Weiss, Y. (eds) Computer Vision ECCV, Springer, Cham, LNCS, 2018, vol. 11217, pp. 297-315.
- 14. Yu Z., Zhao C., Wang Z., Qin Y., Su Z., Li X., Zhou F., Zhao G. Searching central difference convolutional networks for face anti-spoofing. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020, pp. 5295-5305.
- 15. The KITTI Vision Benchmark Suite. Available at: http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/ (accessed:05.05.2022).
- 16. The Cityscapes Dataset . Available at: http://www.cityscapes-dataset.com. (accessed:05.05.2022).
- Timoshenko, D., Simonchik, K., Shutov, V., Zhelezneva, P., Grishkin, V. Large crowdcollected facial antispoofing dataset. Computer Science and Information Technologies (CSIT), Yerevan, Armenia, 2019, pp. 208-211.

Фаворская Маргарита Николаевна. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики и вычислительной техники Сибирского государственного университета науки и технологий имени

М.Ф. Решетнева. Область научных интересов: компьютерное зрение, обработка изображений и видеопоследовательностей, глубокое обучение, распознавание образов. AuthorID: 500950, SPIN-код: 7598-8467, ORCID: 0000-0002-2181-0454, favorskaya@sibsau.ru, Россия, г. Красноярск, пр. им. газ. Красноярский рабочий, 31.

Пахирка Андрей Иванович. Кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и вычислительной техники Сибирского государственного университета науки и технологий имени М.Ф. Решетнева. Область научных интересов: компьютерное зрение, обработка изображений и видеопоследовательностей, глубокое обучение, распознавание образов. AuthorID: 561608, SPIN-код: 1739-9950, pahirka@sibsau.ru, Россия, г. Красноярск, пр. им. газ. Красноярский рабочий, 31.

UDC 004.93

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.005

## Building depth maps for detection of presentation attacks in face recognition systems

## Margarita N. Favorskaya, Andrey I. Pakhirka

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Russia, Krasnoyarsk, favorskaya@sibsau.ru

Annotation. Currently, face recognition systems are a widespread way of biometric identification in practice. However, such systems require protection against unauthorized actions in the form of so-called presentation attacks, when an attacker replaces genuine images with fake images or short video sequences. The article proposes a method for detecting presentation attacks using the depth of the scene without the use of special sensors. The challenge is to enhance the subtle difference between genuine and fake images. For this, a deep network was trained and tested, consisting of central difference convolution blocks and a multi-scale attention module. Experiments have shown that pre-processing input face images to the HSV color space has an advantage in the accuracy of detecting fake images. Thus, the detection accuracy on our own dataset, KITTI and Cityscapes datasets increased by 3-7% depending on the capture devices, lighting conditions, and settings of the algorithm.

Keywords: presentation attacks, face recognition, depth maps, deep learning

#### References

- 1. Määttä J., Hadid A., Pietikäinen M. Face spoofing detection from single images using micro-texture analysis // 2011 International Joint Conference on Biometrics (IJCB), IEEE, Washington, DC, USA, 2011. C. 1-7.
- De Freitas Pereira T., Anjos A., De Martino J.M., Marcel S. LBP-TOP based countermeasure against face spoofing attacks. Computer Vision ACCV 2012 Workshops. ACCV 2012. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, vol. 7728, pp. 121-132.
- 3. De Freitas Pereira T., Anjos A., De Martino J.M., Marcel S. Can face anti-spoofing countermeasures work in a real world scenario? International Conference on Biometrics (ICB), IEEE, Madrid, Spain, 2013, pp. 1-8.
- 4. Komulainen J., Hadid A., Pietikäinen M. Context based face anti-spoofing. Sixth International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems (BTAS), IEEE, Arlington, VA, USA, 2013, pp. 1-8.
- 5. Yang J., Lei Z., Liao S., Li S.Z. Face liveness detection with component dependent descriptor // International Conference on Biometrics (ICB), IEEE, Madrid, Spain, 2013, pp. 1-6.
- 6. Boulkenafet Z., Komulainen J., Hadid A. Face antispoofing using speeded-up robust features and Fisher vector encoding. Signal Processing Letters, 2016, vol. 24, no. 2, pp. 141-145.
- 7. Atoum Y., Liu Y., Jourabloo A., Liu X. Face anti-spoofing using patch and depth-based CNNs. International Joint Conference on Biometrics (IJCB), IEEE, Denver, CO, USA, 2017, pp. 319-328.
- 8. Liu Y., Jourabloo A., Liu X. Learning deep models for face anti-spoofing: binary or auxiliary supervision. In: 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE, Salt Lake City, UT, USA, 2018, pp. 389-398.
- 9. Wang Z., Yu Z., Zhao C., Zhu X., Qin Y., Zhou Q., Zhou F., Lei Z. Deep spatial gradient and temporal depth learning for face anti-spoofing // Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE, Seattle, WA, USA, 2020, pp. 5042-5051.
- 10. Liu S., Yuen P.C., Zhang S., Zhao G. 3D mask face anti-spoofing with remote photoplethysmography // Leibe B., Matas J., Sebe N., Welling M. (eds.) Computer Vision ECCV, Springer, Cham, LNCS, 2016, vol. 9911, pp. 85-100.

- 11. Silberman, N., Hoiem, D., Kohli, P., Fergus, R. Indoor segmentation and support inference from RGBD images. In: Fitzgibbon, A., Lazebnik, S., Perona, P., Sato, Y., Schmid, C. (eds) Computer Vision ECCV, Springer, Berlin, LNCS, 2012, vol. 7576, pp. 746-760.
- 12. Liu Y., Jourabloo A., Ren W., Liu X. Dense face alignment // International Conference on Computer Vision (ICCV), IEEE, Venice, Italy, 2017, pp. 1619-1628.
- 13. Jourabloo A., Liu Y., Liu X. Face de-spoofing: Anti-spoofing via noise modeling. In: Ferrari, V., Hebert, M., Sminchisescu, C., Weiss, Y. (eds) Computer Vision ECCV, Springer, Cham, LNCS, 2018, vol. 11217, pp. 297-315.
- 14. Yu Z., Zhao C., Wang Z., Qin Y., Su Z., Li X., Zhou F., Zhao G. Searching central difference convolutional networks for face anti-spoofing. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020, pp. 5295-5305.
- 15. The KITTI Vision Benchmark Suite. Available at: http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/ (accessed:05.05.2022).
- 16. The Cityscapes Dataset. Available at: http://www.cityscapes-dataset.com. (accessed: 05.05.2022).
- Timoshenko, D., Simonchik, K., Shutov, V., Zhelezneva, P., Grishkin, V. Large crowdcollected facial antispoofing dataset. Computer Science and Information Technologies (CSIT), Yerevan, Armenia, 2019, pp. 208-211.

Favorskaya Margarita Nikolaevna. Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Informatics and Computer Techniques at Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. Research interests: computer vision, image and video sequence processing, deep learning, pattern recognition. AuthorID: 500950, SPIN: 7598-8467, ORCID: 0000-0002-2181-0454, favorskaya@sibsau.ru, Russian, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky Rabochy ave, 31.

Pakhirka Andrey Ivanovich. PhD, Associate Professor of the Department of Informatics and Computer Techniques at Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. Research interests: computer vision, image and video sequence processing, deep learning, pattern recognition. AuthorID: 561608, SPIN: 1739-9950, pahirka@sibsau.ru, Russian, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky Rabochy ave 31.

Статья поступила в редакцию 05.08.2022; одобрена после рецензирования 06.09.2022; принята к публикации 16.09.2022.

The article was submitted 08/05/2022; approved after reviewing 09/06/2022; accepted for publication 09/16/2022.

## Математические и информационные технологии в энергетике

УДК 620.92

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.006

# Атомная энергетика как одно из направлений устойчивого энергетического развития республики Беларусь

## Зорина Татьяна Геннадьевна

Институт энергетики НАН Беларуси, Республика Беларусь, Минск, tanyazorina@tut.by

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы развития атомной энергетики в Республике Беларусь в контексте устойчивого энергетического развития. На основе авторской методики проведен анализ динамики устойчивого энергетического развития Республики Беларусь в 1995-2020 гг. Определены направления устойчивого энергетического развития Республики Беларусь до 2030 г. Построена формализованная модель энергетической системы Республики Беларусь, собрана база исходных данных для моделирования энергопроизводства электрической энергии на среднесрочный период в программе MESSAGE. Построены сценарии развития энергосистемы Республики Беларусь с учетом ввода в эксплуатацию Белорусской атомной станции, в зависимости от разных темпов роста спроса на электроэнергию. Выполнены прогнозы производства и стоимости электрической энергии в энергетической системе Республики Беларусь на период до 2050 г. согласно выбранным сценариям. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования по следующим критериям: структура энергопроизводства, объемы и структура вводимых мощностей, расход топлива на производство электроэнергии, стоимость электроэнергии.

**Ключевые слова:** устойчивое энергетическое развитие, индекс устойчивого энергетического развития, структура энергопроизводства, атомная энергетика, MESSAGE, сценарное моделирование, энергетическая система Республики Беларусь, производственная себестоимость электрической энергии

**Цитирование:** Зорина Т.Г. Атомная энергетика как одно из направлений устойчивого энергетического развития республики Беларусь / Т.Г. Зорина // Информационные и математические технологии в науке и управлении. -2022. -№ 3(27). - C. 49-67. - DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.006.

**Введение.** Энергетическая система Республики Беларусь — стабильно работающий технологический комплекс, который обеспечивает надежное и бесперебойное снабжение потребителей страны энергией.

В энергетической системе в настоящее время продолжается работа по обновлению и повышению эффективности работы производственных фондов, а также повышению надежности энергоснабжения потребителей. Наряду с модернизацией основных производственных фондов и внедрением новых высокоэффективных генерирующих мощностей проводится системная работа по снижению затрат на производство, передачу и распределение энергии. Наиболее важным проектом для энергетического комплекса Республики Беларусь остается эксплуатация Белорусской атомной электростанции (БелАЭС), что имеет существенное значение для развития не только энергетической сферы, но и всей экономики страны [1, 2].

Это соответствует стратегической цели развития топливно-энергетического комплекса, предусматривающей удовлетворение потребностей экономики и населения страны в энергоносителях на основе их максимального эффективного использования при снижении нагрузки на окружающую среду [3-9].

**Методология исследования.** Устойчивое энергетическое развитие – процесс развития способной к саморегулированию системы с целью достижения региональной энергетической безопасности при рациональном использовании энергоресурсов, обеспечении социального равенства в области доступа к энергоуслугам и сохранении окружающей среды в условиях неопределенности. Устойчивое энергетическое развитие характеризует не только функционирование энергетического сектора какой-либо территориальной единицы, а в

целом определяет направления развития экономики данной территории и её социальной сферы.

На базе данной методологии с учетом мировых тенденций развития энергетики была разработана система показателей, характеризующих отдельные факторы устойчивого энергетического развития (таблица 1), и на их основе интегральный показатель — индекс устойчивого энергетического развития (рис. 1). Предложенный индекс позволяет оценить текущий уровень устойчивого энергетического развития и проследить его динамику по годам, а также сравнить положение страны с другими странами. Интегральный индекс, характеризующий уровень устойчивого энергетического развития, включает не только традиционные для устойчивого развития экономическую, социальную и экологическую группы показателей, но и технологические, выделенные в отдельную группу. В индексе сбалансированы показатели по внешним и внутренним факторам. Оценивать устойчивое энергетическое развитие страны можно как в целом, так и по отдельным факторам и подсистемам показателей. Одним из этапов методики является нормирование показателей, которое позволяет привести их к единому диапазону. Применение интегрального индекса, характеризующего уровень устойчивого энергетического развития, является целесообразным при разработке стратегии устойчивого энергетического развития [10].

Таблица 1. Система показателей устойчивого энергетического развития

Факторы	Наличие ресурсов	Направление социально- экономического развития	Спрос на энергоресурсы	Энерго- безопасность
Экономический	Доступность кредитных ресурсов	Доля энергетики в ВВП	Уровень рентабельности энергетики	Доля недоминирующих энергоресурсов в общем объёме импорта энергоресурсов
Технологический	Доля собственных энергоресурсов в общем энерго-потреблении	Доля инвестиций в энергетику	Энергоемкость ВВП	Доля резервных мощностей в общих мощностях энергетики
Социальный	Уровень занятости	Уровень образования	Доступность топлива и энергии для населения	Уровень электрификации населения
Экологический	Уровень озеленения страны	Уровень здоровья	Коэффициент сокращения потребления энергоресурсов	Уровень выбросов CO <sub>2</sub> от потребления энергии на душу населения

Расчет интегрального индекса, характеризующего уровень устойчивого энергетического развития страны, осуществляется по следующей формуле:

$$I = \sum_{j=1}^{k} z_j \sum_{i=1}^{m_j} x_{ij} f_{ij}, \tag{1}$$

где I — интегральный индекс, характеризующий уровень устойчивого энергетического развития страны;

k – количество факторов;

 $z_i$  — вес *j*-ого фактора;

 $m_{i}$  – количество показателей i-го фактора;

 $x_{ii}$  — значение *i*-ого показателя для *j*-ого фактора;

 $f_{ii}$  — вес *i*-ого показателя для *j*-ого фактора.

**Анализ состояния устойчивого энергетического развития Республики Беларусь.** На рис. 1 представлен интегральный индекс, характеризующий уровень устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995-2020 гг.



**Рис. 1.** Интегральный индекс, характеризующий уровень устойчивого энергетического развития Республики Беларусь [11]

Интерпретация интегральной оценки:

от 0,8 до 1,0 – сбалансированное устойчивое развитие;

от 0,6 до 0,8 – высокий уровень устойчивого развития;

от 0,4 до 0,6 – средний уровень устойчивого развития;

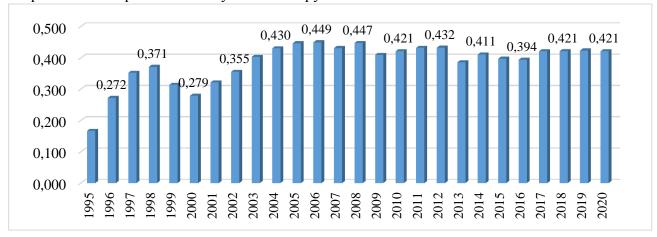
от 0,2 до 0,4 – низкий уровень устойчивого развития;

от 0,0 до 0,2 – неустойчивое развитие.

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

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

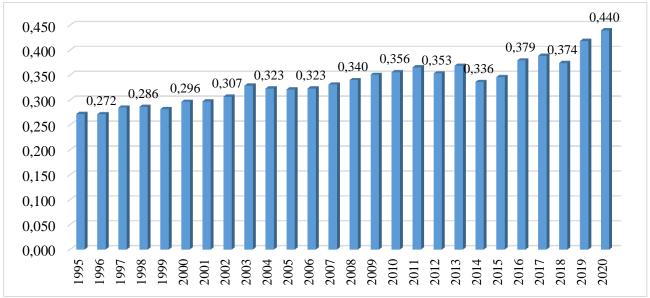
На рис. 2 представлен индекс, характеризующий экономические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995-2020 гг.



**Рис. 2.** Индекс, характеризующий экономические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь

Как видно из рис. 2, индекс, характеризующий экономические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995-2020 гг., отличается значительной степенью неравномерности. Его наибольшее значение было достигнуто в 2006 г. (0,449), наименьшее наблюдалось в 1995 г. (0,167). В целом, в 2020 г. групповой показатель увеличился на 52,41 % по сравнению с 1995 г.

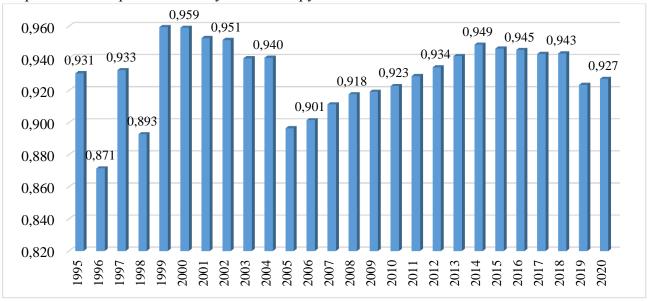
На рис. 3 представлен индекс, характеризующий технологические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995-2020 гг.



**Рис. 3.** Индекс, характеризующий технологические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь

Как видно из рис. 3, за исключением 2012, 2014, 2018 гг. для индекса, характеризующего технологические факторы, за исследуемый период был свойственен постоянный рост. В 2020 г. данный показатель увеличился по сравнению с 1995 г. в 1,62 раза. Наибольшее значение индекс достиг в 2020 г. (0,440), наименьшее – в 1995 г. (0,272).

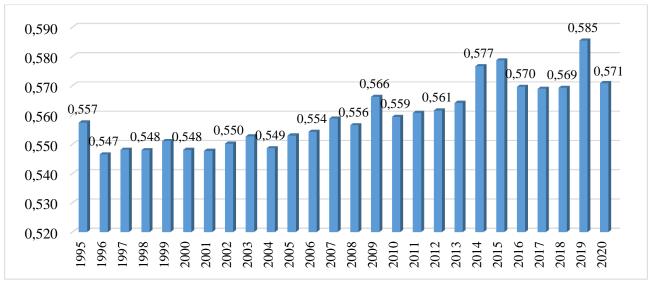
На рис. 4 представлен индекс, характеризующий социальные факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995-2020 гг.



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

Как следует из рис. 4, индекс, характеризующий социальные факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь в 1995-2020 гг. отличался неравномерностью. В 2020 г. он снизился по сравнению с 1995 г. на 1,38 %. Наиболее высокого значения данный показатель достиг в 1999 г. (0,959), наименьшее значение наблюдалось в 1996 г. (0,871).

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



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

Как следует из рис. 5, в 1995-2020 гг. групповому показателю, характеризующему экологические факторы устойчивого энергетического развития, была присуща положительная тенденция. В 2020 г. он увеличился по сравнению с 1995 г. на 2,4 %. Наиболее высокого значения данный показатель достиг в 2019 г. (0,585), наименьшее наблюдалось в 1996 г. (0,547).

Проведенное исследование показало, что в настоящее время Республика Беларусь характеризуется средним уровнем устойчивого энергетического развития (0,590 в 2020 г.), что свидетельствует об эффективности энергетического планирования и функционирования энергетического комплекса Республики Беларусь.

Основными направлениями устойчивого энергетического развития Республики Беларусь до 2030 г. являются:

- энергосбережение и внедрение энергоэффективных технологий;
- диверсификация энергоресурсов и энергоисточников за счет использования ВИЭ (возобновляемых источников энергии) и использования атомной энергетики;
- формирование оптового электроэнергетического рынка;
- снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Согласно Концепции развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года прогнозируется стабильный рост потребления электрической энергии в Республике Беларусь: с 39,7 млрд. кВт·ч в 2020 г. до 47,2 млрд. кВт·ч в 2030 г. (таблица 2). Вместе с тем следует отметить, что фактическая выработка электроэнергии на БелАЭС в 2020 г. составила 338 млн. кВт·ч, вместо запланированных 2623 кВт·ч, а в 2021 г. – 5780 млн. кВт·ч, вместо запланированных 8123 кВт·ч.

**Таблица 2.** Прогноз баланса производства-потребления электрической энергии в Республике Беларусь, млн. кВт-ч [12]

	Besitapyes, with. RB1 1[12]				
№	Показатель	Прогноз			
п/п		2020	2025	2030	
1.	Производство	39732	43734	47206	
1.1.	ГПО «Белэнерго», в т.ч.:	34529	38521	41305	
1.1.1.	КЭС	16454	4636	5784	
1.1.2.	ДЄТ	15074	14235	15871	
1.1.3.	ВИЭ	378	405	405	
1.1.4.	АЭС	2623	19245	19245	
1.2.	Блок-станции, в т.ч.:	5203	5213	5901	
1.2.1.	ископаемые виды	4397	4171	4206	
1.2.2.	ВИЭ	806	1070	1695	
2.	Импорт	0	0	0	
3.	Экспорт	0	0	0	
4.	Потребление, в т.ч.:	39732	43734	47206	
4.1.	полезный отпуск потребителям, в т.ч.:	29615	31512	34752	
4.1.1	реальному сектору экономики	22875	24515	27079	
4.1.2.	Населению	6740	6997	7673	
4.2.	потребление в Белорусской энергосистеме	6115	8553	8785	
4.3.	собственные нужды организаций-владельцев блокстанций	4002	3669	3669	

Несмотря на существующее в настоящее время отставание в темпах развития атомной энергетики в Республики Беларусь, она остается одним из важнейших векторов в энергетической политике республики.

**Создание базы данных для моделирования.** Для моделирования сценариев энергопроизводства Республики Беларусь в период с 2022 по 2050 гг. использовалась программа MESSAGE. Критерием, определяющим процесс расчета, в программе MESSAGE является функция оптимизации эксплуатационных затрат.

Для моделирования сценариев функционирования рынка была собрана база данных, включающая:

- установленную мощность всех энергогенерирующих источников в Республике Беларусь;
- инвестиционные затраты, переменные и постоянные издержки основных производителей электроэнергии в Республике Беларусь (табл. 3, по данным Министерства энергетики Республики Беларусь);
- цены на основные энергоресурсы в Республике Беларусь (табл. 4, по данным Министерства энергетики Республики Беларусь);
- прогнозируемый объем потребления электроэнергии на период до 2030 года (рис. 1, по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь) [13].

**Таблица 3.** Инвестиционные затраты, постоянные и переменные издержки основных производителей электроэнергии в Республике Беларусь

	<u> </u>	1 1	
Энергоисточник	Инвестиционные затраты, долл. США/кВт	Постоянные издержки, долл. США/кВт/год	Переменные издержки, долл. США/ГВт·час
Лукомльская ГРЭС	700	10,34	2,39
Березовская ГРЭС	700	15,42	6,89

Минская ТЭЦ-5	1000	27,74	5,62
БелАЭС	5000	52	3
КЭС ПГУ большой мощности	750	14	28,4
Блок-станции	1400	24	10,5
Новые блок-станции	2289	73	44
ТЭЦ на МВТ	1200	24	10,5
ВЭУ	1740	57	0
СЭС	2366	15	0
Биогазовые блок-станции	3700	167	35
Минская ТЭЦ-4	800	32,83	15,66
Гомельская ТЭЦ	700	19,76	14,12
Бобруйская ТЭЦ-2	700	46,17	31,04
Гродненская ТЭЦ-2	700	61,01	38,89
Минская ТЭЦ-3	700	38,62	25,53
Могилевская ТЭЦ-2	800	27,61	27,16
Новополоцкая ТЭЦ	800	18,06	30,71
Мозырьская ТЭЦ	700	33,91	40,1
Светлогорская ТЭЦ	700	31,36	32,38
Витебская ТЭЦ	700	45,92	39,28
Жодинская ТЭЦ	800	35,27	49,76
Оршанская ТЭЦ	800	48,89	34,31
Малые ТЭЦ	700	63,27	92,35
ГЭС	1508	30	3,5
ПГУ Минской ТЭЦ-3	900	12	24,5
Лидская ТЭЦ	750	18	42
Жлобинская ТЭЦ	1200	22	9,1
Блоки в ремонтном резерве	750	14,5	55,2

Таблица 4. Стоимость топлива в период 2020-2050 гг. в Республике Беларусь

	,	,					1.
Вид топлива	Газ природный, долл. США /тыс. м³	Газ сжиженный, долл. США /тыс. м³	Мазут топочный, долл. США /т	Мазут топочный (для населения), долл. США /т	Ядерное топливо, долл. США /кг	Древесина, долл. США /плотный м³	Торф, долл. США /т
2020	127,45	188,74	190,84	203,70	57,49	23,95	30,61
2021	128,53	195,19	192,13	202,34	47,59	24,54	31,36
2022	212,52	201,86	193,40	201,00	49,67	24,54	31,36
2023	221,98	208,76	194,46	199,90	49,67	24,54	31,36
2024	228,80	215,90	195,76	198,58	49,67	24,54	31,36
2025	234,47	223,28	197,04	197,29	49,67	24,54	31,36
2026	239,02	215,98	195,75	198,58	49,67	24,54	31,36
2027	243,18	218,38	196,18	198,15	49,67	24,54	31,36
2028	245,45	219,21	196,32	198,01	49,67	24,54	31,36
2029	246,26	217,86	196,08	198,25	49,67	24,54	31,36
2030	247,00	218,49	196,20	198,13	49,67	24,54	31,36
2031	247,74	219,15	196,77	198,13	49,67	24,54	31,36

2032	248,49	219,81	196,89	198,13	49,67	24,54	31,36
2033	249,23	220,47	197,01	198,13	49,67	24,54	31,36
2034	249,98	221,13	197,13	198,13	49,67	24,54	31,36
2035	250,73	221,79	197,25	198,13	49,67	24,54	31,36
2036	251,49	222,46	197,37	198,13	49,67	24,54	31,36
2037	252,24	223,13	197,49	198,13	49,67	24,54	31,36
2038	253,00	223,80	197,61	198,13	49,67	24,54	31,36
2039	253,76	224,47	197,73	198,13	49,67	24,54	31,36
2040	254,52	225,15	197,85	198,13	49,67	24,54	31,36
2041	255,29	225,82	197,97	198,13	49,67	24,54	31,36
2042	256,06	226,50	198,10	198,13	49,67	24,54	31,36
2043	256,82	227,18	198,22	198,13	49,67	24,54	31,36
2044	257,60	227,86	198,34	198,13	49,67	24,54	31,36
2045	258,37	228,55	198,46	198,13	49,67	24,54	31,36
2046	259,15	229,23	198,58	198,13	49,67	24,54	31,36
2047	259,93	229,92	198,70	198,13	49,67	24,54	31,36
2048	260,71	230,61	198,82	198,13	49,67	24,54	31,36
2049	261,49	231,31	198,95	198,13	49,67	24,54	31,36
2050	262,28	232,00	199,07	198,13	49,67	24,54	31,36

Для прогнозирования структуры энергопроизводства была построена формализованная модель энергетической системы Республики Беларусь, которая схематично представлена на рис. 6.

### Построение сценариев.

Цель моделирования энергосистемы – спрогнозировать нагрузку каждого типа энергогенерирующих мощностей таким образом, чтобы минимизировать совокупные эксплуатационные затраты.

Введем следующие переменные:

 $Z_{nmlt}$  - количество сырья m, потребленного станцией n для производства энергии вида l в период t;

 $U_{\mathit{nmlt}}$  - производство энергии вида l станцией n на сырье вида m в период t;

 $R_{\it mt}$  - добыча ресурса вида  $\it m$  в период  $\it t$ ;

 $I_{\it mt}$  - импорт ресурса вида  $\it m$  в период  $\it t$ ;

 $I_{et}$  - импорт энергии в период t;

 $vom_{nm}$  - переменные затраты станции п при работе на ресурсе m;

 $\mathcal{C}_{lt}$  - стоимость ресурса l в период t;

 $\mathcal{C}\emph{\emph{i}}_{lt}$  - стоимость импортируемого ресурса l в период t;

 $k_{\it nmlt}$  - КИУМ n —станции, работающей на m —виде ресурсов, производящей l вид энергии в период t;

 $pov_{nt}$ - мощность n- ой станции в период t;

 $\boldsymbol{U}_{lt}$  - величина спроса на энергию l в период t;

 $\overline{R}_{lt}$  - ограничения по добыче ресурса l в период t.

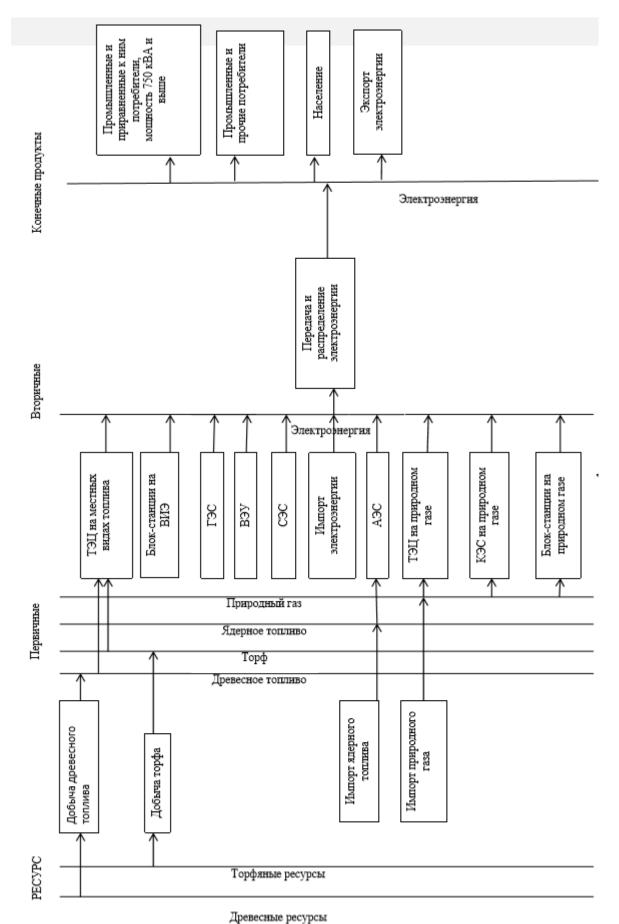


Рис. 6. Формализованная модель энергетической системы Республики Беларусь

Критерием оптимальности модели являются суммарные эксплуатационные затраты. Они включают в себя: капитальные, постоянные и переменные затраты. Итак, целевая функция включает переменные затраты, затраты на ресурсы и затраты на импорт электроэнергии. Первое слагаемое целевой функции описывает затраты на закупку ресурсов, второе — переменные затраты на обслуживание станций, третье — затраты на импорт электроэнергии. Суммирование по *t* задает динамику по годам:

$$f = \sum_{l} \sum_{t} \left( R_{mt} c_{mt} + I_{mt} c i_{mt} \right) + \sum_{n} \left( \sum_{m} \sum_{t} \left( \sum_{l} U_{nmlt} \right) vom_{mt} \right) + \sum_{t} \sum_{l} I_{el} c i_{et} \rightarrow \min$$
 (2)

Ограничения можно разделить на несколько групп:

1. Балансовые соотношения по распределению ресурсов показывают объемы потребленного ресурса с учетом ограничений по их добыче. Такие соотношения в модели описывают балансы по мазуту, торфу, дровам, ядерному топливу. По условию, ограничений на закупку газа не установлено. Кроме того, учитывается, что каждый ресурс поступает из одного источника – либо собственная добыча, либо импорт.

$$\sum_{n,l} z_{nmlt} \le R_{mt} + I_{mt} \tag{3}$$

2. Ограничения по мощности станций. Это ограничение показывает максимальные объемы производимой энергии каждой из станций.

$$\sum_{m,l} U_{nmlt} \le pov_{nt} \tag{4}$$

Здесь необходимо учесть взаимосвязь между параметрами:

$$U_{nmlt} = k_{nmlt} z_{nmlt} \tag{5}$$

Это уравнение показывает взаимосвязь между потребленным количеством ресурса и произведенной энергией.

3. Ограничения по потреблению сырья.

$$R_{mt} \le \overline{R}_{mt} \tag{6}$$

4. Ограничение по спросу на энергию.

$$\sum_{n} \sum_{m} U_{nmlt} E_{lt} + I_{lt} \ge U_{lt}$$
 (7)

Левая часть ограничения описывает количество произведенной и закупленной энергии, правая – прогнозируемый спрос на энергию (электрическую либо тепловую) [14].

Для прогнозирования структуры энергопроизводства в программе MESSAGE были выбраны три сценария развития энергосистемы на период 2022-2050 г.:

- 1) сценарий 1, основанный на темпах роста потреблении электрической энергии, заложенных в прогнозном балансе топливно-энергетических ресурсов до 2030 г. [15];
- 2) сценарий 2, предусматривающий стабильный спрос на электроэнергию, начиная с  $2030 \, \mathrm{r.}$ ;
- 3) сценарий 3, базирующийся на текущих тенденциях потребления электроэнергии [7].

Динамика фактической выработки электроэнергии (2014-2020 гг.) и ее прогноз (2022-2050 гг.) в Республике Беларусь для трех сценариев представлены на рис. 7.

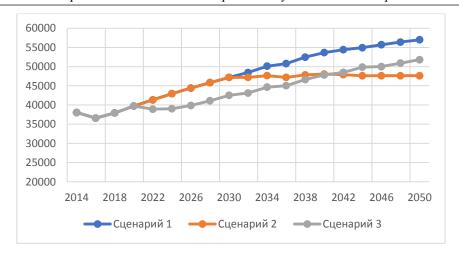


Рис. 7. Выработка электроэнергии, млн. кВт-ч

Как видно из рис. 7, к концу 2050 г. выработка электроэнергии вырастет при реализации любого сценария. Постепенное увеличение электропотребления соответствует как курсу страны на электрификацию транспорта и теплоснабжения, развитию энергоемких производств, так и принципам устойчивого развития, так как электроэнергия является чистым источником энергии.

**Результаты моделирования.** Первый сценарий развития энергосистемы основан на сохранении тенденции прироста потребления электроэнергии, положенного в основу Концепции развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года.

К концу 2050 г. выработка электроэнергии вырастет с прогнозируемых 41332 млн. кВт·ч в 2022 году до 56996 млн. кВт·ч (рис. 7). Для удовлетворения растущих потребностей в электрической энергии, с учетом необходимости вывода из эксплуатации выработавших свой ресурс мощностей, необходимо строительство новых, динамика ввода которых представлена на рис. 8.

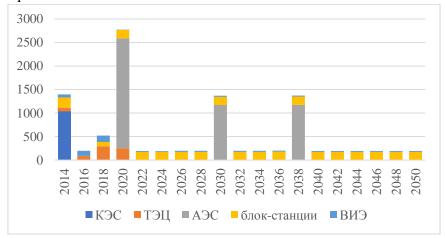


Рис. 8. Структура ввода новых мощностей, МВт, сценарий 1

Наиболее крупным новым объектом электрогенерации является БелАЭС мощностью 2340 МВт, ввод в эксплуацию двух блоков которой планируется закончить к началу 2022 года. Однако для покрытия роста спроса на электроэнергию в будущем потребуется ввод еще двух блоков по 1170 МВт на ядерном топливе: в 2030-2031 гг. и 2038-2039 гг. После ввода третьего и четвертого блоков БелАЭС доля БелАЭС в производстве электроэнергии увеличивается с 39,7% в 2022 году до 50,8% в 2030 и 61,1% в 2040. Снижение доли БелАЭС к 2050 году до 58,3% обусловлено ростом общей выработки электроэнергии в стране.

При рассмотрении структуры источников в выработке электроэнергии, представленной на рис. 9, заметно значительное снижение доли КЭС: с 48,3% в 2020 году до 20,5% в 2030 и только 11,3% в 2050 – обусловленное вводом БелАЭС.

Доля ТЭЦ в периоде до ввода третьего блока БелАЭС снижается в меньшей степени: с 32,1% в 2020 году до 26,7% в 2030. Этот факт обусловлен работой ТЭЦ по тепловому графику, где основная задача электростанции заключается в обеспечении потребителя тепловой, а не электрической энергией, последняя выступает как второстепенный продукт.

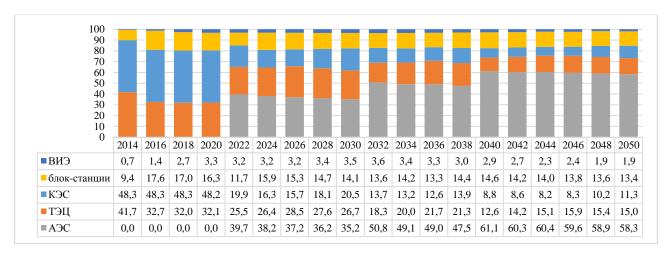


Рис. 9. Доля источников в выработке электроэнергии, в %, сценарий 1

Динамика структуры видов топлива в структуре производства электроэнергии является наиболее интересным показателем с точки зрения энергетической безопасности и представлена на рис. 10.



**Рис. 10.** Доля видов топлива в производстве электроэнергии и централизованном теплоснабжении, в %, сценарий 1

Доля доминирующего вида топлива в производстве электроэнергии – природного газа – уменьшается с 99,7% в 2020 году до 63,7% в 2022 году, что меньше 70% и соответственно уже не является критическим значением. Снижение доли природного газа происходит при вводе в эксплуатацию каждого блока БелАЭС: при вводе третьего – до 51,4%, а при вводе четвертого – до 42,5%, где природный газ уступает позицию доминирующего источника ядерному топливу с показателем 57,4%. К концу прогнозируемого периода значения показателей сближаются и составляют 45,6% и 54,3% для природного газа и ядерного топлива соответственно.

Доля древесного топлива в производстве электроэнергии постепенно падает с 0,3% в 2020 году до 0,1% в 2050. Небольшой объем новых вводимых мощностей в первую очередь

ограничивается запасами возобновляемой древесины и изменением распределения ее потоков между отраслями промышленности.

В основу второго сценария развития энергосистемы положен прогноз, представленный в Концепции развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года, после 2030 года потребление энергии принято неизменным.

К концу рассматриваемого периода выработка электроэнергии увеличится с 41332 млн. кВт·ч в 2022 году до 47626 млн. кВт·ч (рис. 7), что на 16 процентов меньше, чем конечное значение для предыдущего сценария. Следовательно, при таком варианте развития энергосистемы дефицит электроэнергии будет ощущаться в меньшей степени и потребуется ввод электрогенерирующих мощностей в меньшем объеме.

В то же время рост выработки электроэнергии невозможно обеспечить за счет уже существующих мощностей, особенно с учетом износа производственных фондов. Снабжение страны электрической энергией потребует строительства и ввода в эксплуатацию новых электрогенерирущих мощностей (рис. 11).



Рис. 11. Структура ввода новых мощностей, МВт, сценарий 2

В данном сценарии кроме наиболее крупного объекта электрогенерации – БелАЭС мощностью 2340 МВт, потребуется ввод еще только одного блока БелАЭС мощностью 1170 МВт, его пуск будет необходим к 2034 году, чтобы покрыть растущее потребление электроэнергии. Кроме этого, ожидается постепенный ввод блок-станций в среднем по 175 МВт ежегодно, а также небольшое количество источников возобновляемой энергетики.

После ввода третьего блока БелАЭС доля АЭС в производстве электроэнергии увеличивается с 39,7% в 2022 году до 52,1-52,3% в 2050. Структура всех источников в выработке электрической энергии представленна на рис. 12.

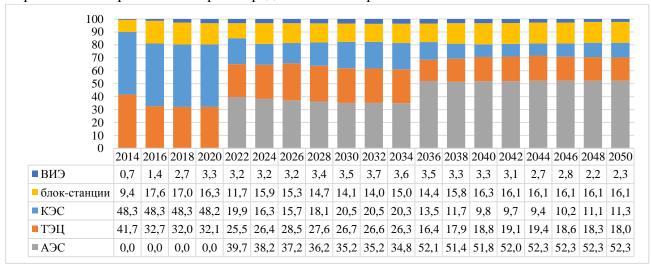


Рис. 12. Доля источников в выработке электроэнергии, в %, сценарий 2

Здесь, как и в первом сценарии, заметно значительное снижение доли КЭС: с 48,2% в 2020 году до 19,9% в 2022 и 13,5% к 2050 году.

Динамика изменения доли ТЭЦ более плавная, но также имеет тенденцию к с снижению и характеризуется следующимим значениями: 32,1% в 2020 году, 25,5% в 2022, 16,4% в 2036. Небольшой рост будет наблюдаться к концу рассматриваемого периода – до 18,0% к 2050 году. Большая доля, по сравнению с первым сценарием, имеет место по причине меньшего роста выработки электроэнергии и задачей ТЭЦ будет обеспечение страны не только электрической, но и тепловой энергией.

Динамика структуры видов топлива в структуре производства электроэнергии представлена на рис. 13.



**Рис. 13.** Доля видов топлива в производстве электроэнергии и централизованном теплоснабжении, в %, сценарий 2

Доля доминирующего вида топлива в производстве электроэнергии – природного газа – уменьшается до 63,7% в 2022 году при пуске в работу первых двух блоков атомной электростанции и до 50,0% в 2036 году после запуска третьего. Впоследствии доля газа постепенно увеличивается и достигает 68,2% в 2034 году и 52,0% в 2050. Соблюдение баланса между двумя доминирующими видами топлива положительно влияет на уровень энергетической безопасности страны и свидетельствует о гармоничном развитии отрасли.

Исходные даные для третьего сценария получены путем экстраполяции существующей тенденции производства электроэнергии в Республике Беларусь в последнее десятилетие на период до 2050 года.

В рассматриваемом сценарии рост выработки электроэнергии происходит не так стремительно: к 2022 году достигается значение только 38921 млн. кВт·ч, а значение показателя 2022 года предыдущих двух сценариев находится в промежутке между 2028 и 2030 годами. Однако к концу периода выработка энергии становится равной 51800 млн. кВт·ч, что превышает значение второго сценария на 8 процентов, но меньше показателя первого сценария на 9 процентов (рис. 7). В данном сценарии прирост установленных мощностей ожидается в более поздние сроки в связи с более плавным ростом производста электроэнергии.

Увеличение выработки электрической энергии потребует ввода новых энергогенерирующих мощностей, производящих только электрическую энергию, что обусловлено тенденцией к снижению выработки тепловой энергии. Динамика ввода новых мощностей по третьему сценарию развития энергосистемы представлена на рис. 14.

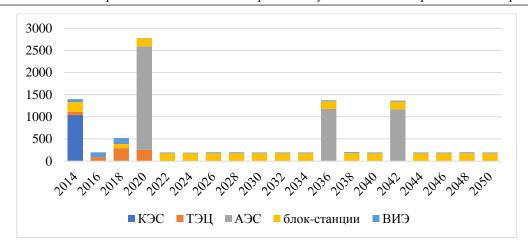
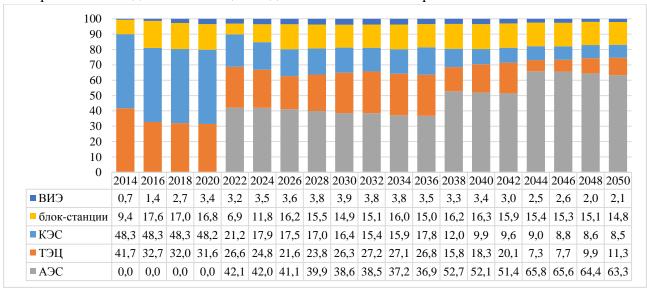


Рис. 14. Структура ввода новых мощностей, МВт, сценарий 3

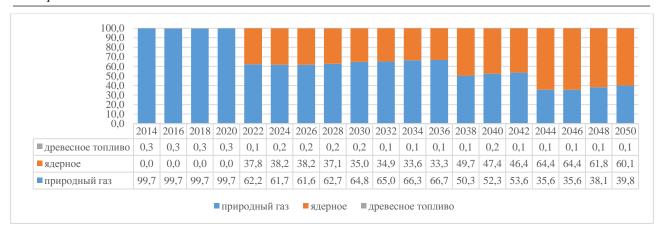
В третьем сценарии, как и в первом, ожидается, кроме ввода БелАЭС к 2022 году мощностью 2340 МВт, ввод еще двух блоков по 1170 МВт на ядерном топливе. Однако ввод их будет необходим в более позднем периоде: в 2036 и 2042 годах по сравнению с 2030 и 2038 годами в первом сценарии. Данный факт обусловлен более плавным темпом роста выработки электроэнергии в стране по третьему сценарию.

Структура источников в выработке электроэнергии представлена на рис. 15. Доля БелАЭС будет увеличиваться с 42,1% с 2022 году до 52,7% в 2038 после запуска третьего блока и до 65,8% в 2044 году после запуска четвертого.

Доля КЭС и ТЭЦ значительно снизится и составит 21,2% и 26,6% соответственно в 2022 году, 12,0% и 15,8% в 2038 году и только 9,0% и 7,3% в 2044. К 2050 году их доля несколько увеличится — до 8,5% и 11,3%. Низкая доля ТЭЦ в покрытии нагрузки по электрической энергии может вызвать необходимость активного строительства электрокотельных для компенсации недостатка тепловой энергии.



**Рис. 15.** Доля источников в выработке электроэнергии, в %, сценарий 3 Изменение структуры видов топлива в структуре производства электроэнергии представлено на рис. 16.



**Рис. 16.** Доля видов топлива в производстве электроэнергии и централизованном теплоснабжении, в %, сценарий 3

Доля природного газа в данном сценарии уменьшается до 62,2% в 2022 году при пуске в работу первых двух блоков атомной электростанции и до 50,3% в 2038 году после запуска третьего блока и до 35,6% в 2044 при запуске четвертого. Впоследствии доля газа несколько увеличивается до момента ввода нового блока БелАЭС, как и в ранее рассмотренных сценариях, что объясняется компенсацией роста спроса на электроэнергию при полной загрузке БелАЭС.

Стоимость производства электрической энергии в периоде 2014-2050 гг. для трех сценариев представлена на рис. 17.

Как видно из рис.17, пики роста стоимости производства электроэнергии во всех сценариях совпадают с вводом в эксплуатацию крупных электрогенерирующих мощностей (блоков БелАЭС) и обусловлены капитальными вложениями, амортизационными отчислениями и обновлением основных производственных фондов энергетической отрасли.

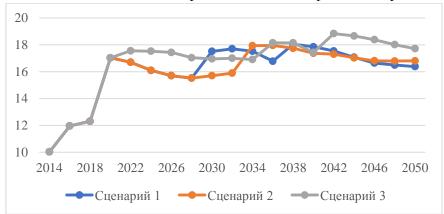


Рис. 17. Стоимость производства электроэнергии, центы, долл. США

Тенденция к постепенному снижению стоимости наблюдаются в трех сценариях: к 2050 году стоимость электроэнергии по сценарию 1 развития энергосистемы составит 16,38 центов, по сценарию 2 - 16,79 центов, что не превышает стоимости ее производства в 2020 году, равной 17,03. Более высокая стоимость 17,71 центов по сценарию 3 объясняется небольшим промежутком между вводом третьего и четвертого блоков, что не позволит цене производства нормализироваться и снизиться до значений предыдущих периодов.

Заключение. Результаты моделирования показали, что реализация того или иного сценария зависит от тенденций прироста потребления электрической энергии, на который, в свою очередь, значительное влияние оказывает темп экономического роста Республики Беларусь. Независимо от реализуемого сценария развитие атомной энергетики в Республике Беларусь позволяет диверсифицировать структуру топливно-энергетического баланса и

заместить часть природного газа, и, как следствие, снизить удельный вес газа при производстве энергии; уменьшить выбросы парниковых газов в атмосферу; придать качественно новый интеллектуальный и технологический импульс развитию страны и обеспечить дополнительные гарантии укрепления государственной независимости и экономической безопасности Республики Беларусь.

Основными направлениями устойчивого энергетического развития Республики Беларусь в условиях интеграции в энергетическую систему АЭС на период до 2030 г. являются:

- Дальнейшее развитие электротранспорта.
- Использование электроэнергии в жилищном строительстве для отопления и горячего водоснабжения.
- Повышение доли использования электрической энергии в железнодорожном транспорте.
- Создание и развитие электроёмких производств (водородная энергетика, цементная промышленность, цветная металлургия, химическая промышленность и др.).

#### Список источников

- 1. Михалевич А.А. Атомная энергетика: перспективы для Беларуси. /А.А. Михалевич —Минск: Беларус. Навука, 2011.—262 с.
- 2. Михалевич А.А Атомная энергетика. Перспективы для Беларуси. / А.А. Михалевич Litres, 2022.
- 3. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 23 декабря 2015 г. —№ 1084.
- 4. Абайдулин А.А. Атомная энергетика как гарант международной безопасности / А.А. Абайдулин, Е.Г. Костылева //Актуальные вопросы экономики и управления в нефтегазовом бизнесе, 2019. С. 3-5.
- 5. Грачёв В.А. Экология, цифровизация и атомная энергетика / В.А. Грачёв //Энергия: экономика, техника, экология, 2020. T. 6. C. 35-43.
- 6. Великороссов В.В. и др. Тенденции развития атомной энергетики в экономике разумного потребления / В.В. Великороссов и др //ББК 65.5 Гло 547 Серия «Библиотека Национального исследовательского института мировой экономики и международных отношений имени ЕМ Примакова» Рецензенты, 2019. С. 153.
- 7. Разикова Н.И., Кочегарова К.А., Патраков Э.В. Атомная энергетика и качество жизни населения / Н.И. Разикова, К.А. Кочегарова, Э.В. Патраков //ХХІ век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс, 2018. Т. 7. № 4. С. 297-302.
- 8. Нигматулин Б.И. Атомная энергетика в мире. Состояние и прогноз до 2050 года / Б.И. Нигматулин //Материаловедение. Энергетика, 2019. Т. 25. №. 4. С. 6-22.
- 9. Семикашев В. В. Атомная энергетика: пик пройден или есть возможности роста? / В. В. Семикашев //Энергетическая политика, 2020. №. 11 (153). С. 12-21.
- 10. Зорина Т.Г. Формирование стратегии устойчивого энергетического развития. /Т.Г. Зорина. Минск: Мисанта, 2016. 332 с.
- 11. Зорина Т.Г. Устойчивое энергетическое развитие Республики Беларусь: анализ динамики развития в 1995–2018 гг. //Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь: состояние и перспективы: сборник докладов Международной научной конференции (Минск, 1-4 октября 2020). /Т.Г. Зорина. Минск.: Беларус. Навука, 2020. С. 18–33.
- 12. Концепция развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года. //Приложение к постановлению Министерства энергетики Республики Беларусь 25 февраля 2020. № 7. URL: https://minenergo.gov.by/zakonodatelstvo/ koncepcii\_i\_proframmi (дата доступа 09.06.2022).
- 13. Зорина Т. Г. Интеграция возобновляемых источников энергии в структуру энергопроизводства Республики Беларусь: сценарное моделирование / Т.Г. Зорина. //Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. №. 1. С. 66-79.
- 14. MESSAGE: Model for Energy Supply Strategy Alternatives and Their General Environmental Impacts / User Manual. Vienna, 2004, 244 p.

15. Зорина Т.Г. Развитие атомной энергетики в Республике Беларусь: сценарное моделирование /Т.Г. Зорина // Вестник Белорусского государственного экономического университета, 2021. — № 6(149). — С. 21-30.

**Зорина Татьяна Геннадьевна.** Доктор экономических наук, профессор, заведующая сектором «Экономика энергетики» Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, AuthorID: 84240, SPIN-код: 1455-9834, ORCID: 0000-0001-9665-2756, tanyazorina@tut.by, Беларусь, г. Минск.

UDC 620.92

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.006

## Nuclear energy as one of the directions of sustainable energy development of the republic of Belarus

## Tatsiana G. Zoryna

Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus, Minsk, *tanyazorina@tut.by* 

Annotation. The article deals with the development of nuclear energy in the Republic of Belarus in the context of sustainable energy development. Based on the author's methodology, an analysis was made of the dynamics of sustainable energy development of the Republic of Belarus in 1995-2020. The directions of sustainable energy development of the Republic of Belarus up to 2030 have been determined. A formalized model of the energy system of the Republic of Belarus has been built, an initial data base has been collected for modeling the energy production of electric energy for the medium term in the MESSAGE program. Scenarios for the development of the energy system of the Republic of Belarus are constructed, taking into account the commissioning of the Belarusian nuclear power plant, depending on different rates of growth in demand for electricity. The forecasts of production and cost of electric energy in the energy system of the Republic of Belarus for the period up to 2050 were made according to the selected scenarios. A comparative analysis of the simulation results was carried out according to the following criteria: the structure of energy production, the volume and structure of commissioned capacities, fuel consumption for electricity generation, and the cost of electricity.

**Keywords:** sustainable energy development, sustainable energy development index, structure of energy production, nuclear energy, MESSAGE, scenario modeling, energy system of the Republic of Belarus, production cost of electricity

### References

- 1. Mihalevich A.A. Atomnaya energetika: perspektivy dlya Belarusi [Nuclear energy: prospects for Belarus]. Minsk: Belarus. Navuka [Minsk: Belarusian science], 2011, 262p.
- 2. Mikhalevich A. Atomnaya energetika. Perspektivy dlya Belarusi [Nuclear energy. Prospects for Belarus]. Literes, 2022.
- 3. Koncepciya energeticheskoj bezopasnosti Respubliki Belarus'. Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 23 dekabrya 2015 [The concept of energy security of the Belarus Republic. Resolution of the Council of Ministers of the Belarus Republic dated December 23, 2015], no. 1084.
- 4. Abaidulin A. A., Kostyleva E. G. Atomnaya energetika kak garant mezhdunarodnoy bezopasnosti [Nuclear power as a guarantor of international security]. Aktual'nyye voprosy ekonomiki i upravleniya v neftegazovom biznese [Topical issues of economics and management in the oil and gas business], 2019, pp. 3-5
- 5. Grachev V. A. Ekologiya, tsifrovizatsiya i atomnaya energetika [Ecology, digitalization and nuclear energy]. Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya [Energy: economics, technology, ecology], 2020, vol. 6, pp. 35-43.
- 6. Velikorossov V.V. et al. Tendentsii razvitiya atomnoy energetiki v ekonomike razumnogo potrebleniya [Trends in the development of nuclear energy in the economy of reasonable consumption]. BBK 65.5 Glo 547 Seriya «Biblioteka Natsional'nogo issledovatel'skogo in-stituta mirovoy ekonomiki i mezhdunarodnykh otnosheniy imeni YEM Primakova» Retsenzenty [BBC 65.5 Glo 547 Series "Library of the National Research Institute of World Economy and International Relations named after EM Primakov" Reviewers], 2019, pp. 153.
- 7. Razikova N. I., Kochegarova K. A., Patrakov E. V. Atomnaya energetika i kachestvo zhizni naseleniya [Nuclear energy and quality of life of the population]. XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus [XXI century: results of the past and problems of the present plus], 2018, vol. 7, no. 4, pp. 297-302.

- 8. Nigmatulin B.I. Atomnaya energetika v mire. Sostoyaniye i prognoz do 2050 goda [Nuclear power in the world. Status and forecast until 2050]. Materialovedeniye. Energetika [Materialovedenie. Energy], 2019, vol. 25, no. 4, pp. 6-22.
- 9. Semikashev VV Atomnaya energetika: pik proyden ili yest' vozmozhnosti rosta? [Nuclear power: has the peak been passed or are there opportunities for growth?]. Energeticheskaya politika [Energy policy], 2020, no. 11 (153), pp. 12-21.
- 10. Zoryna T.G. Formirovanie strategii ustojchivogo energeticheskogo razvitiya . [Formation of a strategy for sustainable energy development]. Minsk: Misanta, 2016, 332 p. (in Russian)
- 11. Zoryna T.G. Ustojchivoe energeticheskoe razvitie Respubliki Belarus': analiz dinamiki razvitiya v 1995–2018 gg. [Sustainable energy development of the Republic of Belarus: analysis of the dynamics of development in 1995-2018.]. // Ustojchivoe razvitie energetiki Respubliki Belarus': sostoyanie i perspektivy: sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (Minsk, 1-4 oktyabrya 2020) = Sustainable Energy Development of the Republic of Belarus: Status and Prospects: Collection of Papers of the International Scientific Conference (Minsk, October 1-4, 2020). Minsk.: Belarus. navuka = Minsk: Belarusian science, 2020, pp. 18–33 (in Russian).
- 12. Koncepciya razvitiya elektrogeneriruyushchih moshchnostej i elektricheskih setej na period do 2030 goda [Concept for the development of power generating capacities and electrical networks for the period up to 2030]. Prilozhenie k postanovleniyu Ministerstva energetiki Respubliki Belarus' 25 fevralya 2020. № 7. [Appendix to the Decree of the Ministry of Energy of the Republic of Belarus on February 25, 2020. No. 7.] Availabel at: https://minenergo.gov.by/zakonodatelstvo/koncepcii\_i\_proframmi/ (accessed: 09.06.2022) (in Russian).
- 13. Zoryna T. G. Integratsiya vozobnovlyayemykh istochnikov energii v strukturu energoproizvodstva Respub-liki Belarus': stsenarnoye modelirovaniye [Integration of renewable energy sources into the energy production structure of the Republic of Belarus: scenario modeling]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhno-logii v nauke i upravlenii [Information and Mathematical Technologies in Science and Management], 2021, no. 1, pp. 66-79.
- 14. MESSAGE: Model for Energy Supply Strategy Alternatives and Their General Environmental Impacts / User Manual. Vienna, 2004, 244 p.
- 15. Zoryna T.G. Razvitie atomnoj energetiki v Respublike Belarus': scenarnoe modelirovanie [Nuclear power development in the Republic of Belarus: scenario modeling] // Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta =Bulletin of the Belarusian State Economic University, 2021, no. 6(149), pp. 21-30 (in Russian).

**Zorina Tatiana Gennadievna.** Doctor of Economics, Professor, Head of the Energy Economics Sector of the Energy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, AuthorID: 84240, SPIN: 1455-9834, ORCID: 0000-0001-9665-2756, tanyazorina@tut.by, Republic of Belarus, Minsk.

Статья поступила в редакцию 24.06.2022; одобрена после рецензирования 11.07.2022; принята к публикации 29.08.2022.

The article was submitted 06/24/2022; approved after reviewing 07/11/2022; accepted for publication 08/29/2022.

УДК 697.34:577.4

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.007

## Разработка методического подхода к оценке комплексного воздействия энерготехнологий на окружающую среду

Еделева Ольга Алексеевна, Стенников Валерий Алексеевич, Зароднюк Максим Сергеевич

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия, Иркутск, edel@isem.irk.ru

Аннотация. Цель исследования заключается в разработке и апробировании методического подхода к комплексному экологическому анализу энерготехнологий, поскольку любая реализованная энерготехнология сопровождается нарушением экологического равновесия в природе. Задача разработки нового методического подхода состоит в более полном представлении возможного влияния на это нарушение, чтобы определить наиболее экологически чистую альтернативу для дальнейшей ее реализации. В статье обобщается отечественный и зарубежный опыт по созданию аналогичных методических подходов и предлагается разработка нового метода комплексного сравнения энерготехнологий, включающего формирование и расчет экологических критериев, характеризующих воздействие энерготехнологий на окружающую среду. Разрабатываемый методический подход представляется в виде схемы и состоит из трех этапов: информационного обеспечения, критериальной оценки энерготехнологий и сравнительного их анализа и ранжирования с помощью методов многокритериального анализа. С этой целью выполняются структуризация задач, формирование энергоэкологических критериев и их функциональный анализ. Основной особенностью методического подхода является системное сопоставление энерготехнологий на всем жизненном цикле их существования. В статье рассматриваются две энерготехнологии: традиционная паротурбинная теплоэлектроцентраль на угле и ветроэлектрическая станция с электрокотлами на уровне производства, эксплуатации и утилизации их основного оборудования. Сравнение энерготехнологий выполнено с использованием метода линейной свертки, преимущество которого заключается в том, что он требует минимального количества входных данных от пользователя, а выходные данные легко интерпретируются в виде наглядных иллюстраций. Исследования носят укрупненный характер и выполнены с целью демонстрации работоспособности методики, вместе с тем развитие предлагаемого методического подхода предполагает усложнение расчетных примеров, более приближенным к характеристикам реальных объектов.

**Ключевые слова:** энерготехнология, окружающая среда, жизненный цикл оборудования, потребление энергоресурсов, многокритериальный анализ, метод свертки

**Цитирование:** Еделева О.А. Разработка методического подхода к оценке комплексного воздействия энерготехнологий на окружающую среду / О.А. Еделева, В.А. Стенников, М.С. Зароднюк // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 3(27). − С. 68-83. − DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.007.

Введение. Традиционное производство тепловой и электрической энергии неразрывно связано с негативным воздействием на окружающую среду, включая загрязнение водоемов, атмосферного воздуха и почвы, отчуждение земель, нарушение природных экосистем, отрицательное влияние на пути миграции и территории обитания животных и т.д. Мировое сообщество видит решение этой проблемы в интенсивном развитии возобновляемой энергетики, отмечая ее основное преимущество – минимальное воздействие на окружающую среду. Действительно, в данном случае производство тепловой и электрической энергии идёт без сжигания органического топлива и, как следствие, без выделения загрязнителей окружающей среды на стадии эксплуатации энергетического оборудования. Однако, все не так однозначно, если рассматривать весь жизненный цикл существования возобновляемых технологий, начиная от получения материала для изготовления оборудования до его утилизации по истечении срока службы.

Многими авторами [1-6] в настоящее время отмечается необходимость применения новых методических подходов для более полного оценивания энергетических технологий по степени их комплексного воздействия на окружающую среду. В качестве аргументов нередко приводятся такие факторы, как то, что развитие энергетики на возобновляемых источни-

ках энергии (ВИЭ) требует дополнительного использования невозобновляемых ресурсов, в частности, сырья для удобрений в случае с биоэнергетикой, металла для оборудования и строительных конструкций, нефти для изготовления лопастей ветроустановок и т.д. Соответственно, наращивание производства энергии за счёт ВИЭ будет требовать и роста потребления возобновляемых и невозобновляемых ресурсов. Кроме того, сам процесс производства оборудования для ВИЭ связан с химическими процессами по получению материалов для производства оборудования, что влечет за собой образование множества побочных продуктов химических реакций и негативно сказывается на окружающей среде, т.к. многие из этих продуктов не используются повторно. Отдельный вопрос возникает с утилизацией оборудования, вторичная переработка которого представляется сложной из-за многокомпонентных по своему составу композитных материалов, требует отдельного изучения и научных исследований, поскольку захоронение отходов не решает проблему загрязнения планеты.

Производство энергии неизбежно будет требовать извлечения ресурсов из наших недр и их переработки, что в конечном итоге всегда будет отрицательно воздействовать на окружающую среду. В связи с этим необходимы взвешенные комплексные решения, определяющие политику в энергетике. Они должны определять основополагающие принципы, обеспечивающие энергетическую безопасность, доступность энергии и защиту окружающей среды. С этой точки зрения интересным может быть подход [7], где авторы предлагают методику определения полной стоимости получения электроэнергии FCOE (the Full Cost Of Electricity), включающей расчет энергозатрат на производство оборудования, эксплуатацию, оплату выбросов, утилизацию и вторичное использование материалов. В своей работе авторы [7] исходят из того, что при расчете полной стоимости электроэнергии ветровая и солнечная энергия не дешевле, чем при использовании органического топлива.

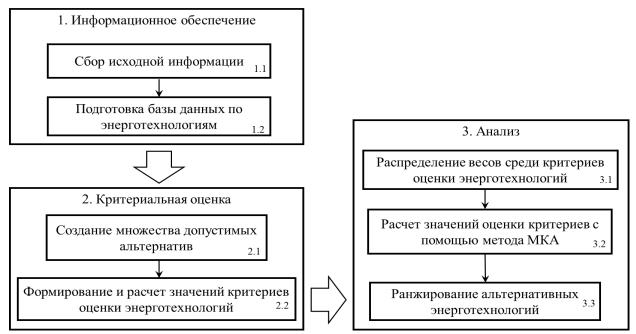
В данной статье обобщается отечественный и зарубежный опыт разработки и применения методических подходов комплексного экологического сравнения энерготехнологий с одновременным производством электроэнергии и тепла. Отмечается, что имеющиеся работы в основном направлены на сравнение жизненных циклов оборудования только по одному виду получаемой энергии. Оригинальность предлагаемого в настоящей статье подхода состоит в формировании и расчете критериев, характеризующих энерготехнологии с экологических позиций с учетом системных факторов.

Сложность формирования и расчета таких критериев заключается в том, что многие показатели, такие, например, как шумовое воздействие, или сокращение популяции птиц требуют специальных исследований, основанных на статистических данных природных наблюдений, полученных на базе опыта эксплуатации энергоустановок [8]. В настоящее время существуют методические подходы, позволяющие приближенно приводить оценку таких воздействий к эквиваленту, то есть оценивать наносимый ущерб в относительных единицах приведения к какому-либо показателю, например, приведение к выбросам  $CO_2$  [1-3], или затратам [9], согласно которым производится оценка в денежной форме возможных отрицательных последствий от выбросов загрязняющих веществ (в рассматриваемый период времени их удалось избежать в результате природоохранной деятельности). Другая трудность связана с тем, что следует сопоставлять эффективность энерготехнологий с позиции приведения к одному уровню энергозатрат на производство, эксплуатацию и утилизацию оборудования (собственные нужды) с получением полезного количества энергии в процессе эксплуатации. Кроме того, при сопоставлении энерготехнологий следует принимать во внимание оценку времени, как ресурса, определяющего степень цикличности воспроизводства оборудования самих энергетических установок.

Следующей проблемой является выбор методического инструментария для комплексной системной оценки технологий, который смог бы интегрировать в себе весь комплекс

неравнозначных и несопоставимых друг с другом критериев оценки негативного воздействия на окружающую среду и провести сопоставление этих технологий для выбора наиболее эффективной из них. Относительно предпочтительными здесь могут быть разнообразные методы многокритериального анализа (МКА) [10].

**1.** Методический подход к комплексному сопоставлению энерготехнологий. Общую схему методического подхода к комплексному сопоставлению энерготехнологий можно представить в виде трех этапов (рис.1).



**Рис. 1.** Концептуальная схема методического подхода к сопоставлению энерготехнологий с помощью методов МКА

Представленная на рис. 1 концептуальная схема комплексной оценки и анализа энерготехнологий отражает методический подход, имеющий более широкое использование, чем только экологическое их сопоставление. Она может найти применение и для технико-экономических, эколого-экономических и других исследований, что во многом будет определяться поставленными целями и задачами. Это обеспечивается возможностью формирования множества критериев сопоставления энерготехнологий, из которого в зависимости от целеполагания и направленности исследований выделяется необходимый их состав и определяется расчетная модель. На первом этапе формируется информационная база по энерготехнологиям (рис. 1, п. 1.1, 1.2), которая требуется для их системного сопоставления. На втором этапе осуществляется генерация альтернативных энерготехнологий (рис. 1, п. 2.1), их приведение к равному энергетическому эффекту, уточнение расчетных критериев и комплексная оценка альтернатив (рис. 1, п. 2.2).

На третьем этапе определяются весовые приоритеты критериев (рис. 1, п. 3.1), с помощью одного из методов МКА находится интегральная оценка критерия (рис. 1, п. 3.2), на основе которой выполняется ранжирование энерготехнологий по их максимальной эффективности (рис.1, п. 3.3).

**2.** Формирование и расчет экологических критериев оценки энерготехнологий. Полный цикл жизни энергоустановок схематично можно представить цепочкой (рис. 2). На каждом этапе, начиная от добычи сырья и заканчивая утилизацией оборудования происходит его взаимодействие с окружающей средой.

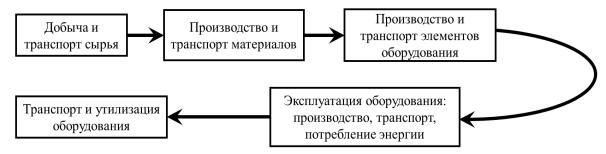


Рис. 2. Полный жизненный цикл энерготехнологий

Комплексная оценка воздействия объектов энергетики на окружающую среду, как отмечалось выше, осуществляется с помощью экологических критериев полного жизненного цикла, при этом численные значения не для всех из них могут быть определены расчетным путем. Это обусловливает необходимость деления их на критерии прямого действия (определяемые расчетным путем) и косвенного действия (оценка экспертов) (табл. 1).

Таблица 1. Разделение критериев экологической эффективности технологий

	Критерии косвенного действия			
Критерии прямого	Качественная характеристика негатив-	Критерии косвенного		
действия	ного воздействия на экосистему	действия		
Валовые выбросы вредных ве-	Изменение перемещения воздушных	Оценка нарушения состо-		
ществ в атмосферу	масс	яния атмосферы		
пцеств в атмосферу	Изменение температуры окружающего	инии атмосферы		
	воздуха			
	Шумовое воздействие			
	Изменение территории обитания жи-			
	вотных			
C5maarr = wrong a hanry		0		
Сбросы в гидросферу	Изменение перемещения водных масс	Оценка нарушения состо-		
	Изменение температуры воды	яния гидросферы		
	Изменение территории обитания жи-			
	ВОТНЫХ			
Отходы в литосферу	Величина отчуждения земель	Оценка нарушения состо-		
	Изменение территории обитания жи-	яния литосферы		
	вотных			
Потребление возобновляемых/	Шумовое воздействие	Оценка нарушения состо-		
невозобновляемых ресурсов	Изменение территории обитания жи-	яния атмосферы		
	вотных			
	Величина отчуждения земель	Оценка нарушения состо-		
	Изменение территории обитания жи-	яния литосферы		
	вотных			
Энергозатраты жизненного цикла	_	_		
Переработка использованных				
материалов, отходов производ-	_	_		
ства				

## 2.1. Расчет критериев прямого действия.

1. Критерий оценки выброса (сброса, отходов) j вредного вещества ( $k_j$ ):

$$k_j = M_j \cdot t \cdot \frac{1}{D_j^n} \,, \tag{1}$$

где  $M_j$  – количество вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу, сбрасываемого в гидросферу, литосферу в год [11-16], тыс. т/год; t – временной период, г.;  $D_j^n$  – нормализо-

ванная величина опасности j вредного вещества, которая рассчитывается согласно принятым нормам максимально-разовых предельно-допустимых концентраций (ПДК) [17] как:

$$D_j^n = \frac{S_j}{S_{et}},\tag{2}$$

где  $S_j - \Pi \not \Pi K j$  вредного вещества, мг/м³ (мг/л, мг/кг);  $S_{et} - \Pi \not \Pi K$  эталонного вредного вещества, мг/м³ (мг/л, мг/кг).

2. Критерий оценки выброса парниковых газов (  $k_{{\it CO}_2}$  ):

$$k_{CO_2} = M_{CO_2} \cdot t \,, \tag{3}$$

где  $M_{CO_2}$  – количество парниковых газов, выбрасываемых в атмосферу [18], т/год.

- 3. Критерий оценки энергозатрат.
- Критерий потребления электроэнергии ( $k_W$ ):

$$k_{w} = W \cdot t \,, \tag{4}$$

где W — годовой объем потребляемой электроэнергии,  $MBт \cdot u$ .

– Критерий потребления тепловой энергии ( $k_o$ ):

$$k_{o} = Q \cdot t \,, \tag{5}$$

где Q – годовой объем потребляемой тепловой энергии, Гкал.

4. Критерий расхода возобновляемых/невозобновляемых ресурсов ( $k_r$ ):

$$k_r = R \cdot t \,, \tag{6}$$

где R — годовой расход возобновляемого/невозобновляемого ресурса, т.

5. Критерий оценки степени переработки использованного материала/отходов производства ( $k_{_{\it p}}$ ):

$$k_{rc} = c \cdot P \cdot t \,, \tag{7}$$

где c — степень переработки использованного материала/отходов производства, %; P — годовой объем использованного материала/отходов производства, т [19].

2.2. Расчет критериев косвенного действия.

1. Критерий оценки нарушения состояния атмосферы ( $k_{air}$ ):

$$k_{air} = a_{tr} \cdot a_{tem} \cdot a_{no} \cdot a_{ha} \cdot t , \qquad (8)$$

где  $a_{tr}$  — относительное изменение перемещения воздушных масс, %;  $a_{tem}$  — относительное изменение температуры окружающего воздуха, %;  $a_{no}$  — относительная величина шумового воздействия [20], %;  $a_{ha}$  — относительное изменение территории обитания животных, %.

2. Критерий оценки нарушения состояния гидросферы ( $k_{wat}$ ):

$$k_{wat} = W_{tr} \cdot W_{tem} \cdot W_{ha} \cdot t \,, \tag{9}$$

где  $w_{tr}$  — относительное изменение перемещения водных масс, %;  $w_{tem}$  — относительное изменение температуры воды [16], %;  $w_{ha}$  — относительное изменение территории обитания животных, %.

3. Критерий оценки нарушения состояния литосферы ( $k_{eq}$ ):

$$k_{ea} = e_{al} \cdot e_{ha} \cdot t \,, \tag{10}$$

где  $e_{al}$  — относительная величина отчуждения земель [19], %;  $e_{ha}$  — относительное изменение территории обитания животных, %.

Для определения показателей, характеризующих степень изменения перемещения водных и воздушных масс, а также ареала обитания животных предполагается использование экспертных оценок.

**3. Практическое применение методического подхода.** Основные положения предлагаемого методического подхода рассматриваются применительно к системному сопоставлению двух энерготехнологий, традиционной паротурбинной теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) на угле и ветроэлектрической станции с электрокотлами (ВЭС+ЭК). Сравнение производится только по основному оборудованию (табл. 2). Расходные материалы на вспомогательное оборудование, автоматику, диспетчерское управление на данном этапе исследований не учитываются.

Таблица 2. Технические показатели и характеристика основного оборудования

Наименование показателей	ДЕТ	ВЭС+ЭК	
Удельный расход тепла на одного жителя			
для отопления, вентиляции и ГВС,	21,2		
Гкал/год·чел.			
КПД тепловых сетей, доли		0,9	
Число часов использования максимума		6781	
тепловой нагрузки, ч		0/81	
Количество жителей, чел.	5	32565	
Установленная тепловая мощность,	1850	1858 (2160 МВт)	
Гкал/ч	1650	1838 (2100 MB1)	
Установленная электрическая мощность,	708	1551 МВт	
МВт	700	1331 WIB1	
	Котлы:	ВЭУ:	
	4хБКЗ-420-140-6	977xV-126-3,8MW–H87	
	3хБК3-500-140-1С	(VESTAS ) (в составе ВЭУ	
	1хБКЗ-820-140-1С	2931 лопасть, по 977 гондол,	
Состав основного оборудования	Турбины:	главных рам, башен)	
	2хПТ-60-130/13 (ЛМЗ)	Электрокотлы:	
	2xT-175/210-130 (TM3)	108хКЭВ 20000/10	
	1xT-185/220-130 (TM3)		
	1xP-50-130/13 (ЛМ3)		

Предполагается, что на ВЭС не устанавливают аккумуляторные батареи из-за высокой стоимости, так как ВЭС такой большой мощности, работают совместно с традиционными источниками на ископаемом топливе, либо по связи с внешней энергосистемой для сглаживания неравномерности выработки электрической энергии. Для уравнивания энергетического эффекта рассматриваемых энерготехнологий с учетом стохастического характера работы ВЭС был использован коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), который для ВЭС на территории РФ в среднем за 2021 г. составляет 28,8% [21], исходя из этого значения установленная мощность ВЭС должна составлять 3711 МВт (см. табл. 2).

Рассмотрим более подробно влияние энерготехнологий на окружающую среду последовательно по всем стадиям жизненного цикла (рис. 2).

**3.1.** Добыча сырья, производство материалов и оборудования. Основное оборудование ветроустановки (ВЭУ) имеет в своем составе лопасти ветроколеса, гондолу, башню и главную раму. Гондола, башня и главная рама изготавливаются из конструкционной низколегированной стали, на 977 ВЭУ мощностью по 3,8 МВт требуется порядка 623326 т, на

производство 108 электрокотлов мощностью по 20 МВт требуется 1648 т легированной стали. Полный цикл производства лопастей ветроустановок можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 3 [22-27]. На схеме слева направо показаны процессы добычи исходного природного сырья и производства необходимых материалов для изготовления лопастей, образования побочных продуктов химических реакций (голубым цветом), некоторые из которых представляют производство полезных продуктов для дальнейшего использования в различных отраслях промышленности (при расчете экологических критериев авторами они не учитываются), другие подлежат утилизации и могут представлять опасность для окружающей среды.

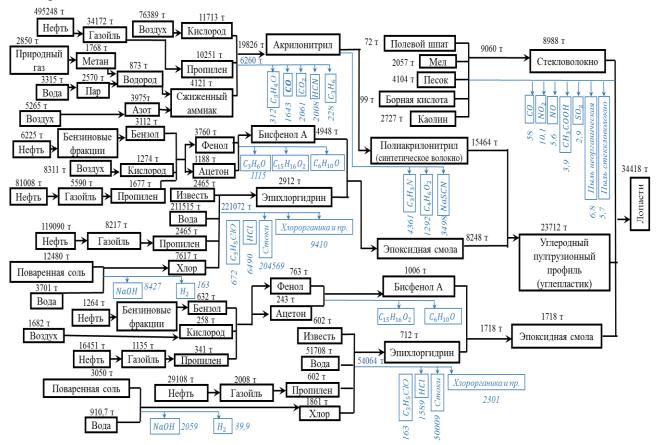


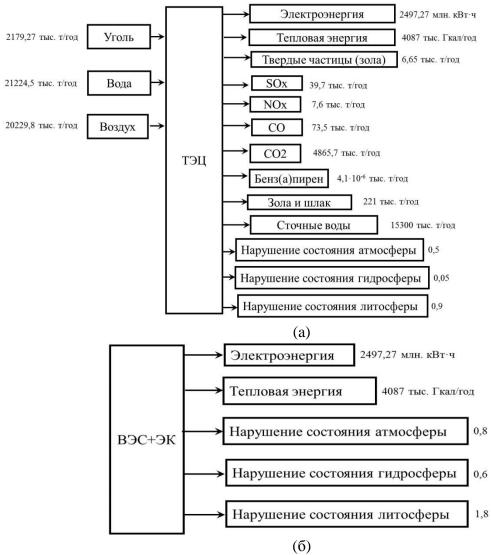
Рис. 3. Полный цикл производства лопастей ветроустановок

Основной технологией, используемой при производстве лопастей, является технология вакуумной инфузии. Вакуумная инфузия представляет собой процесс изготовления композитного материала, при котором пропитка выложенной заготовки смолой происходит за счет вакуума, создаваемого в герметичной рабочей полости. Основными материалами, применяемыми при производстве лопастей, являются ткани из стекловолокна, углеродные пултрузионные профили и полимерное связующее (эпоксидная смола). Основные технологии производства материалов промежуточных стадий включают: производство эпоксидной смолы из эпихлоргидрина и бисфенола в процессе конденсации в щелочной среде, производство эпихлоргидрина на основе хлоргидринных технологий, производство пропилена из нефти методом каталитического крекинга, производство хлора методом электролиза поваренной соли по мембранной технологии, производство бисфенола реакцией конденсации фенола и ацетона, производство фенола и ацетона кумольным способом из бензола с пропеном (пропиленом), производство бензола из бензиновых фракций нефти в процессе каталитического рифоминга, производство кислорода и азота из воздуха криогенным методом ректификации, производство акрилонитрила окислительным аммонолизом пропилена и пр.

Возможны другие технологии производства материалов промежуточных стадий, кроме указанных на схеме (рис. 3), поэтому полный цикл производства лопастей может быть различным, здесь авторами разработан лишь один из вариантов.

Основное оборудование ТЭЦ, котлы и турбины изготавливаются из легированной и аустенитной стали, а также титановых сплавов и чугуна. Общий объем расхода материалов на эти цели составляет 24398 т.

**3.2.** Эксплуатация основного оборудования. Предполагается, что ТЭЦ и ВЭС+ЭК работают в электроэнергетической системе. На стадии эксплуатации оборудования ТЭЦ и ВЭС+ЭК принимаем временной период равным 25 лет по среднему сроку эксплуатации лопастей ВЭУ. Срок службы конструкционных элементов ВЭУ: гондолы, башни и главной рамы составляет 25 лет, срок службы электрокотлов 30 лет. Парковый ресурс оборудования котлов и турбин ТЭЦ составляет от 17 до 30 лет. Эти данные необходимы для расчета циклов эксплуатации основного оборудования в формулах критериев оценки (1)-(10). На рис. 4 приведены годовые объемы выбросов вредных веществ, золы и шлака, производства электроэнергии и тепла, а также рассчитанные годовые значения косвенных критериев действия энергоустановок на окружающую среду при их эксплуатации.



**Рис. 4.** Годовое производство электро-, теплоэнергии и поступление загрязняющих веществ в экосистему от (а) ТЭЦ, (б) ВЭС+ЭК

**3.3. Утилизация основного оборудования, вторичная переработка отходов.** Замена основного оборудования по истечении срока эксплуатации на ВЭС+ЭК (лопасти ветроколе-

са), производится после 25 лет эксплуатации. На ТЭЦ это соответствует, как правило, парковому ресурсу крупных энергоблоков, трубопроводов высокого давления и др. Этот период и принят за основу в дальнейших расчетах, хотя он может различаться для разного типа оборудования и при необходимости может конкретизироваться. Элементы оборудования из стали отправляются на вторичную переработку (переплав). Наиболее сложными для утилизации являются лопасти ветроколеса, которые изготавливаются из композитных материалов. Массовыми отходами ТЭЦ являются зола и шлак, которые в стране ежегодно в больших масштабах захораниваются на золошлакоотвалах.

В настоящее время разработаны или находятся в стадии освоения технологии утилизации, для отходов как ВЭС, так и ТЭЦ. В табл. 3 перечисляются возможные способы их утилизации.

Таблица 3. Технологии вторичной переработки отходов [28, 29]

Направления использования отходов энергоисточников					
ТЭЦ (зола и шлак)	ВЭС (композитные материалы)				
• Дорожное строительство (гранулированные	• Шумоподавляющие барьеры на автомагистра-				
шлаки)	лях				
• Строительные материалы (кирпич, цемент)	• Строительные материалы (производство бето-				
• Инертные заполнители (аглопорит)	на, досок, плит из композита)				
• Извлечение полезных металлов	• Безотходные ВЭС (создание из измельченного				
• Извлечение урана	композита новых лопастей)				

Причем, можно смело говорить о практически 85-90% переработке этих отходов для обеих энерготехнологий. Проблема заключается не в технологиях переработки, а в отсутствии необходимых экономических условий для их использования в нашей стране [28-31].

В рассматриваемом примере за 25 лет эксплуатации на ТЭЦ образуется 5525 тыс. т. золы и шлака, на ВЭС 53,3 тыс. т отработанных композитных материалов.

3.4. Проведение многокритериального анализа. В настоящее время существует большое количество методов МКА, каждый из которых обладает определенным набором свойств и особенностей их применения. Метод линейной свертки входит в группу методов МКА, он широко используется в виду его простоты и достаточной наглядности получаемых результатов [10]. Метод свертки базируется на вычислении результирующего критерия, который представляет собой линейную комбинацию единичных показателей в виде суммы критериев, умноженных на числовые коэффициенты. Числовые коэффициенты отражают вес (значимость) каждого критерия и называются весовыми коэффициентами. Результирующие критерии сравниваются между собой и по наименьшему значению выбирается предпочтительный из альтернативных вариантов.

Для сравниваемых энерготехнологий по формулам (1)-(2), (4)-(10) был сформирован список критериев оценки и проведен их расчет (табл. 4) (расчет критерия оценки энергозатрат (4) не включен в пример, так как его описание и расчет достаточно трудоемки и являются предметом отдельного научного исследования).

Таблица 4. Формирование критериев оценки энерготехнологий

	Наименование критерия/ Временной период/	25 лет		
№	Наименование критерия/ Бременной период/ Наименование технологии	1 (BЭC+ЭK)	2 (ТЭЦ)	
1	Выбросы вредных веществ	8226	31601	
2	Стоки	509156	19125	
3	Потребление невозобновляемых ресурсов. Полевой шпат	144	0	
4	Потребление невозобновляемых ресурсов. Мел	4114	0	

5	Потребление невозобновляемых ресурсов. Песок	8208	0
6	Потребление невозобновляемых ресурсов. Каолин	5454	0
7	Потребление невозобновляемых ресурсов. Нефть	1496788	0
8	Потребление невозобновляемых ресурсов. Известь	6134	0
9	Потребление невозобновляемых ресурсов. Природный газ	5700	0
10	Потребление невозобновляемых ресурсов. Поваренная соль	31060	0
11	Потребление невозобновляемых ресурсов. Уголь	0	54481650
12	Потребление невозобновляемых ресурсов. Железная руда	624974	24398
12	(Сталь)	024774	2+370
13	Потребление возобновляемых ресурсов. Воздух	183294	505745950,1
14	Потребление возобновляемых ресурсов. Вода	542299	530612500
15	Выбросы парниковых газов (СО2)	4122	121642600
16	Литосфера. Композит	68836	0
17	Литосфера. Зола и шлак	0	5525000
18	Нарушение состояния атмосферы	12,6	12,5
19	Нарушение состояния гидросферы	0,15	1,25
20	Нарушение состояния литосферы	27,7	22,5

Метод линейной свертки в проводимых исследованиях применялся для определения степени влияния на загрязнение окружающей среды сравниваемых энерготехнологий по интегральному критерию и раздельным оценкам по критериальным группам (табл. 5) при сроке их эксплуатации 25 лет. Весовые коэффициенты внутри каждой группы критериев принимались одинаковыми, составляющими в сумме 1.

Результаты комплексного сопоставления энерготехнологий приведены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты расчетов с помощью метода линейной свертки

			Значение
Номер и наименование группы рас-	Ранг	Название	результирующего
чета		энерготехнологии	критерия
			25 лет
<ol> <li>Полный набор критериев</li> </ol>	1	ВЭС+ЭК	174927
1. Полный наоор критериев	2	ДЕТ	60904143
II Dijanga i projeti iy poutogan	1	ВЭС+ЭК	8226
II. Выбросы вредных веществ	2	ДЄТ	31601
III. Стоки	2	ВЭС+ЭК	25457
пп. Стоки	1	ДЄТ	956
IV. Потробномие ресурсор	1	ВЭС+ЭК	242345
IV. Потребление ресурсов	2	ДЄТ	90907341
V. Поручуварую разуч (СО.)	1	ВЭС+ЭК	4122
V. Парниковые газы (CO <sub>2</sub> )	2	ДЄТ	121642600
VI Transition armount	1	ВЭС+ЭК	34418
VI Твердые отходы	2	ТЭЦ	2762500
VII. Нарушение состояния окружаю-	2	ВЭС+ЭК	13
щей среды	1	ТЭЦ	12

В рамках I группы расчетов (табл. 5) рассматривался интегральный экологический критерий, здесь лучшей оказалась технология ВЭС+ЭК. Это хорошо подтверждается дальнейшими расчетами по критериальным группам, представленными ниже.

П группа расчетов, выполненных по критерию вредных выбросов, также ставит в число приоритетных технологию ВЭС+ЭК. Это в целом совпадает с оценками мирового сообщества, согласно которому выбросы вредных веществ действительно меньше в случае использования ветровой энергетики, причем не только на стадии эксплуатации, но и на стадии производства материалов для изготовления оборудования для энергоисточников. Наиболее весомым по количеству загрязнителей является изготовление лопастей ВЭС, в тоже время объемы этих веществ не велики в сравнении с выбросами от сжигания угля на ТЭЦ.

В III группе расчетов по критерию объемов сточных вод более предпочтительной является ТЭЦ. При оборотном водоснабжении ежегодные стоки от ТЭЦ составляют небольшую величину и, в основном, они представлены концентрированными моющими растворами и отмывочными водами после химических промывок и консервации паровых котлов, шламовыми, замасленными и замазученными водами и т.д. В жизненном цикле ВЭС+ЭК сточные воды образуются в большом количестве из-за специфики химических процессов (например, при производстве эпихлогидрина).

По объемам потребления возобновляемых и невозобновляемых ресурсов (IV группа расчетов) лучшие показатели имеет электростанция ВЭС+ЭК. Ее потребление ресурсов связано только с материалами на ее изготовление, а на ТЭЦ воздух, вода и уголь используются в течение всего периода ее эксплуатации.

Выбросы парниковых газов (V группа расчетов) и твердых отходов (VI группа расчетов) в меньшем количестве образуются на ВЭС+ЭК, при этом первые возникают на стадии производства оборудования ВЭС+ЭК, а вторые по истечении срока эксплуатации ветроустановок в виде отработанных композитных материалов лопастей. На ТЭЦ ежегодно выбрасывается в атмосферу на несколько порядков больше CO<sub>2</sub> и вывозится в отвалы золошлаковых отходов.

Технология ТЭЦ (VII группа расчетов) представляется лучшей с небольшим разрывом результирующего критерия. Это объясняется тем, что ветрогенерация имеет значительное косвенное воздействие на атмосферу, гидросферу и литосферу (перемещение воздушных масс, шумовое, вибрационное воздействие, отчуждение большой территории и др.), а для ТЭЦ отягощающими факторами воздействия на экосистему являются загрязнения (дымовые газы, зола, шлак), связанные с длительным периодом ее эксплуатации.

Проведенные расчеты показывают, что многокритериальный анализ позволяет осуществить более полное сопоставление энерготехнологий и определить наиболее предпочтительную из них для реализации. Результат сравнения альтернатив во многом зависит от выбора критериальных групп, которые, в свою очередь, назначаются в зависимости от особенностей рассматриваемой территории и специфики поставленных исследователем целей. Очень чувствительным аспектом в сопоставительном анализе является назначение весовых коэффициентов в критериальной оценке. В наибольшей мере это относится к расчету критериев косвенного воздействия на экосистему. Здесь определяющим может быть эмпирический опыт экспертов.

Анализ результатов расчетов экологического сопоставления технологий ВЭУ+ЭК и ТЭЦ позволяет сделать следующие выводы:

- 1. По прямому минимальному воздействию на окружающую среду предпочтительной является электростанция на базе ВЭУ+ЭК. Это подтверждается большинством критериев при принятых исходных условиях.
- 2. Минимальную разницу в оценке энерготехнологий имеет комплексный критерий нарушения состояния окружающей среды. Он интегрально включает и прямое, и косвенное их воздействие на окружающую среду. Это приводит к тому, что косвенное влияние на эко-

систему ВЭУ+ЭК представляется достаточно значимым и в отдельных случаях может оказать решающее значение.

Заключение. Вопрос об экологически чистом энергоснабжении с традиционными и возобновляемыми источниками энергии в настоящее время носит дискуссионный характер. При этом высказываются различные точки зрения как по отношению к традиционным энергоисточникам (прежде всего на угле), так и к ВИЭ. Это объясняется, как правило, условиями сопоставления технологий. Объективная оценка может быть получена, только когда рассматривается весь жизненный цикл технологий от производства оборудования до его утилизации. Это представляется сложной задачей, которая до настоящего времени в полном объеме не решена.

В настоящем исследовании предлагается один из возможных подходов к анализу экологического воздействия энерготехнологий на экосистему на протяжении всего их жизненного цикла. Он позволит наиболее полно осуществить комплексную оценку негативного влияния энергетики на окружающую среду, выявить наиболее уязвимые места в технологиях, проработать возможные направления их устранения и в целом определить наиболее эффективные решения.

В рамках методического подхода предлагаются методы формирования и расчета критериев оценки, основанные на МКА, которые позволяют привести рассматриваемые технологии к сопоставимому виду и осуществить их системный анализ.

Апробация предложенного методического подхода проводится на примере сравнения ВЭС с электрокотлами и ТЭЦ на угле. Для этого используется метод линейной свертки, являющийся представителем МКА. Результаты сравнения показывают, что ВЭС с электрокотлами является более предпочтительной энерготехнологией при рассмотрении всего цикла жизни оборудования, так как потребляет меньше ресурсов и выбрасывает меньше загрязнителей в окружающую среду. Хотя, например, по стокам лучшей является ТЭЦ.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№FWEU-2021-0002) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. (проект №AAAA-A21-121012090012-1) с использованием ресурсов ЦКП "Высокотемпературный контур" (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

#### Список источников

- 1. Дегтярев К.С. ВИЭ и побочные экологические эффекты / К.С. Дегтярев // Сантехника. Отопление. Кондиционирование, 2015. –№5. С. 90–94.
- 2. Дегтярев К.С. Энергетика на возобновляемых источниках от энтузиазма к прагматизму / К.С. Дегтярев // Сантехника. Отопление. Кондиционирование, 2015. №4. С. 74–81.
- 3. Andersen O. Unintended Consequences of Renewable Energy Problems to be Solved. London: Springer-Verlag, 2013, 94 p.
- 4. Tsoutsos Th., Frantzeskaki N., Gekas V. Environmental impacts from the solar energy technologies. Energy Policy, 2005, no. 33, pp. 289–296.
- 5. Птускин А.С. Многокритериальная модель определения наилучшей доступной технологии при нечетких исходных данных / А.С. Птускин, Е. Левнер, Ю.М. Жукова // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2016. № 6. С. 105–127.
- 6. Панова С.А., Тишаева И.Р. Системная модель наилучшей доступной технологии / С.А. Панова, И.Р. Тишаева // Вестник МИТХТ, 2014. т. 9. № 5. С. 83-85.
- 7. Schernikau L., Smith W. H., Falcon R. Full cost of electricity 'FCOE' and energy returns 'eROI'. Journal of Sustainable Development, 2022, no. 5, 13 p.
- 8. Кудрявцева О.В. Методика и практика оценки воздействия на окружающую среду. Проектная документация. Учебное пособие / О.В. Кудрявцева, Т.Н. Ледащева, В.Е. Пинаев, 2016. М.: Экономический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова. 170 с.
- 9. Методика определения предотвращенного экологического ущерба. Утв. ГК РФ по охране окружающей среды 30 ноября 1999 г., 1999. М.: ГК РФ по охране окружающей среды. 72 с.

- 10. Теория принятия решений в 2 т. Т.2: учебник и практикум бакалавриата и магистратуры / под ред. В.Г. Халина, 2016. М.: Издательство Юрайт. 431 с.
- 11. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами, 1986. Л.: Гидрометеоиздат. 183 с.
- 12. Методика определения валовых выбросов вредных веществ в атмосферу от котлов тепловых электростанций, 1984. М.: СПО «Союзтехэнерго». 19 с.
- 13. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу с дымовыми газами отопительных и отопительно-производственных котельных МЖКХ РСФСР, 1991. М.: ОНТИ АКХ им. К.Д. Памфилова. 67 с.
- 14. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлах производительностью до 30 т/ч, 1985. М.: Гидрометеоиздат. 24 с.
- 15. Защита атмосферы от промышленных загрязнений. В 2 ч., 1988. М.: Металлургия. 1472 с.
- 16. Методика расчета предельно допустимых сбросов (ПДС) веществ в водные объекты со сточными водами. ВНИИ по охране вод бывший ГК СССР по охране природы, 1990. М.: Фирма Интеграл. 142 с.
- 17. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» Утв. от 28 января 2021 года №2, 2021.— М.: АО «Кодекс». 987 с.
- 18. Методические указания по расчету валового выброса двуокиси углерода в атмосферу из котлов тепловых электростанций и котельных. РД 153-34.0-02.318-2001, 2001.— М.: СПО ОРГРЭС. 6 с.
- 19. Рекомендации по проектированию золошлакоотвалов тепловых электрических станций. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1986. СПб: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 129 с.
- 20. Тепловые электрические станции. Экологическая безопасность. Акустическое воздействие (шум) нормы и требования. СТО 70238424.13.140.001-2008, Приказ НП «ИНВЭЛ» от 15.12.2008 г. № 42, 2008. М.: НП «ИНВЭЛ». 25 с.
- 21. Системный оператор единой энергетической системы. Информация о фактическом режиме работы объектов ДПМ ВИЭ на территории РФ за 2021 г. URL: https://www.so-ups.ru/functioning/markets/surveys/renewable/2021/ (дата обращения 05.07.2022).
- 22. Разработка и производство лопастей ветроагрегатов. ООО «Политермо». URL: http://www.politermo.ru/stati/Lopasti\_vetroagregat.pdf (дата обращения 05.07.2022).
- 23. Лавренов А.В. Технологии получения пропилена: сегодня и завтра / А.В. Лавренов, Л.Ф. Сайфулина, Е.А. Булучевский, Е.Н. Богданец // Катализ в химической и нефтехимической промышленности, 2015. т. 15. № 3. С. 6-19.
- 24. Гадецкий А.Ю. Эпихлоргидринные эпоксидные смолы URL: https://makston-engineering.ru/blog-zametki/post/epihlorgidrinnye-epoksidnye-smoly (дата обращения 05.07.2022).
- 25. Справочник нефтехимика. В 2 т. / Под ред. С.К. Огородникова, 1978. Л.: Химия. 592 с.
- 26. Технология пластических масс / Под ред. В.В. Коршака. Изд. 3-е, перераб. и доп., 1985. М.: Химия. 560 с.
- 27. Башкатов Т.В., Жигалин Я.Л. Технология синтетических каучуков: Учебник для техникумов / Т.В. Башкатов, Я.Л. Жигалин. 2-е изд, перераб., 1987. Л.: Химия. 360 с.
- 28. Золошлаковые отходы. Часть 2: Экономическая выгода переработки. Как заработать на золе? URL: https://ect-center.com/blog/zoloshlakovie-othody-2\_(дата обращения 12.07.2022).
- 29. Переработка лопастей ветрогенераторов: от цемента до новых лопастей. URL: https://rawi.ru/2021/08/pererabotka-lopastey-vetrogeneratorov-ot-cementa-do-novyih-lopastey/ (дата обращения 12.07.2022).
- 30. Vestas представил технологию полной переработки лопастей ветряных турбин. URL: https://renen.ru/vestas-predstavil-tehnologiyu-polnoj-pererabotki-lopastej-vetryanyh-turbin/ (дата обращения 12.07.2022).
- 31. Лопастей много, а места мало, или как утилизировать ветрогенераторы URL: https://www.elec.ru/articles/naverteli-na-milliony-evro-tonn/ (дата обращения 12.07.2022).

Еделева Ольга Алексеевна. К.т.н., старший научный сотрудник лаборатории систем теплоснабжения Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН). Основным направлением исследований является формирование методологических подходов, разработка моделей и методов комплексного анализа области развития теплоснабжающих систем с учетом технико-экономических и экологических факторов. AuthorID: 268868, SPIN-код: 4487-3032, ORCID: 0000-0002-0388-6164, edel@isem.irk.ru, 664033, Иркутск, Лермонтова, 130.

**Стенников Валерий Алексеевич.** Академик РАН, профессор, заслуженный деятель науки РФ, директор Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН). Научные интересы: систем-

ные исследования в энергетике, теория гидравлических цепей, математическое моделирование, методы оптимизации, системы теплоснабжения, системы централизованного теплоснабжения, когенерация, надежность, энергоэффективность, энергосбережение, методы и алгоритмы расчета тарифов на тепловую энергию; интеллектуальные интегрированные энергетические системы. AuthorID: 442880, SPIN-код: 7059-4182, ORCID: 0000-0001-6219-0354, sva@isem.irk.ru, 664033, Иркутск, Лермонтова, 130.

Зароднюк Максим Сергеевич. К.т.н., научный сотрудник лаборатории термодинамики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН). Основным направлением исследований является термодинамико-цепное моделирование энергетических систем и установок, инженерная экология, математическая физика, математическое моделирование. AuthorID: 112374, SPIN-код: 3176-8619, ORCID: 0000-0001-7920-5583, тах@isem.irk.ru, 664033, Иркутск, Лермонтова, 130.

UDC 697.34:577.4

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.007

### Development of a methodological approach to assessing the complex impact of energy technologies on the environment

#### Olga A. Edeleva, Valerij A. Stennikov, Maksim S. Zarodnjuk

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Russia, Irkutsk, edel@isem.irk.ru

**Abstract.** The purpose of this scientific research is to develop and test a methodological approach to a comprehensive environmental analysis of energy technologies, since any implemented energy technology is accompanied by a violation of the ecological balance in nature. The problem of developing a new methodological approach is to more fully represent the possible impact on this violation in order to determine the most environmentally friendly alternative for its further implementation. The article summarizes domestic and foreign experience in creating similar methodological approaches and proposes the development of a new method for a comprehensive comparison of energy technologies, including the formation and calculation of environmental criteria that characterize the impact of energy technologies on the environment. The developed methodological approach is presented in the form of a diagram and consists of three stages: information support, criteria-based assessment of energy technologies and their comparative analysis and ranking using multi-criteria analysis methods. For this purpose, tasks are structurized, energy-environmental criteria are formed and their functional analysis is carried out. The main feature of the methodological approach is a systematic comparison of energy technologies throughout the life cycle of their existence. The article discusses two energy technologies, a traditional CHP burning coal and a wind power plant with electric boilers at the level of production, operation and disposal of their main equipment. Energy technologies are compared using the linear convolution method, which has the advantage that it requires a minimum amount of input from the user, and the output is easily visualized. The studies are of an enlarged nature and were carried out in order to demonstrate the efficiency of the technique.

**Keywords:** Energy technology, environment, equipment life cycle, energy consumption, multicriteria analysis, linear convolution method

**Acknowledgements:** The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0002) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 (project no. AAAA-A21-121012090012-1) 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. Degtjarev K.S. VIJe i pobochnye jekologicheskie jeffekty [RES and environmental side effects]. Santekhnika. Otopleniye. Konditsionirovaniye [Plumbing, Heating and Air Conditioning], 2015, no. 5, pp. 90–94.
- 2. Degtjarev K.S. Jenergetika na vozobnovljaemyh istochnikah ot jentuziazma k pragmatizmu [Renewable energy from enthusiasm to pragmatism]. Santekhnika. Otopleniye. Konditsionirovaniye [Plumbing, Heating and Air Conditioning], 2015, no. 4, pp. 74–81.
- 3. Andersen O. Unintended Consequences of Renewable Energy Problems to be Solved. London, Springer-Verlag, 2013, 94 p.
- 4. Tsoutsos Th., Frantzeskaki N., Gekas V. Environmental impacts from the solar energy technologies. Energy Policy, 2005, no. 33, pp. 289–296.

- 5. Ptuskin A.S., Levner E., Zhukova Ju.M. Mnogokriterial'naja model' opredelenija nailuchshej dostupnoj tehnologii pri nechetkih ishodnyh dannyh [Multi-criteria model for determining the best available technology with fuzzy input data]. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroyeniye [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering], 2016, no. 6, pp. 105–127.
- 6. Panova S.A., Tishaeva I.R. Sistemnaja model' nailuchshej dostupnoj tehnologii [System model of the best available technology]. Vestnik MITHT [Vestnik MITHT], 2014, vol. 9, no. 5, pp. 83-85.
- 7. Schernikau L., Smith W. H., Falcon R. Full cost of electricity 'FCOE' and energy returns 'eROI'. Journal of Sustainable Developmen, 2022, no. 5, 13 p.
- 8. Kudrjavceva O.V., Ledashheva T.N., Pinaev V.E., Metodika i praktika ocenki vozdejstvija na okruzhajushhuju sredu. Proektnaja dokumentacija. Uchebnoe posobie [Methodology and practice of environmental impact assessment. Project documentation. Textbook]. Jekonomicheskij fakul'tet MGU imeni M. V. Lomonosova [Faculty of Economics at Lomonosov Moscow State University (MSU)], 2016, 170 p.
- 9. Metodika opredelenija predotvrashhennogo jekologicheskogo ushherba. Utv. GK RF po ohrane okruzhajushhej sredy 30 nojabrja 1999 g. [Methodology for determining the prevented environmental damage. Approved Civil Code of the Russian Federation for Environmental Protection November 30, 1999]. Moscow, GK RF po ohrane okruzhajushhej sredy, 1999, 72 p.
- 10. Teorija prinjatija reshenij vol. 2: uchebnik i praktikum bakalavriata i magistratury [Decision Theory vol. 2: textbook and workshop for undergraduate and graduate students]. Ed. Halin V.G. Moscow, Jurajt Publ., 2016, 431 p.
- 11. Sbornik metodik po raschetu vybrosov v atmosferu zagrjaznjajushhih veshhestv razlichnymi proizvodstvami [Collection of methods for calculating emissions of pollutants into the atmosphere by various industries]. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat, 1986, 183 p.
- 12. Metodika opredelenija valovyh vybrosov vrednyh veshhestv v atmosferu ot kotlov teplovyh jelektrostancij [Methodology for determining gross emissions of harmful substances into the atmosphere from CHP boilers]. Moscow, SPO «Sojuztehjenergo», 1984, 19 p.
- 13. Metodicheskie ukazanija po raschetu vybrosov zagrjaznjajushhih veshhestv v atmosferu s dymovymi gazami otopitel'nyh i otopitel'no-proizvodstvennyh kotel'nyh MZhKH RSFSR [Guidelines for the calculation of emissions of pollutants into the atmosphere with flue gases from heating and heating-industrial boiler houses]. Moscow, ONTI AKH im. K.D. Pamfilova, 1991, 67 p.
- 14. Metodicheskie ukazanija po raschetu vybrosov zagrjaznjajushhih veshhestv pri szhiganii topli-va v kotlah proizvoditel'nost'ju do 30 t/ch [Guidelines for the calculation of pollutant emissions from fuel combustion in boilers with a capacity of up to 30 t/h.]. Moscow, Gidrometeoizdat, 1985, 24 p.
- 15. Zashhita atmosfery ot promyshlennyh zagrjaznenij [Protection of the atmosphere from industrial pollution]. Moscow, Metallurgija [Metallurgiya], 1988, 1472 p.
- 16. Metodika rascheta predel'no dopustimyh sbrosov (PDS) veshhestv v vodnye ob'ekty so stochnymi vodami. VNII po ohrane vod byvshij GK SSSR po ohrane prirody [Methodology for calculating the maximum allowable discharges of substances into water bodies with wastewater. All-Russian Research Institute for Water Protection, former State Committee for Nature Protection of the USSR], Moscow, Integral firm [Integral company], 1990, 142 p.
- 17. SanPiN 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovanija k obespecheniju bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlja cheloveka faktorov sredy obitanija» Utv. ot 28 janvarja 2021 goda no. 2 [SanPiN 1.2.3685-21 «Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans» Approved. dated January 28, 2021 No. 2]. Moscow, AO «Kodeks», 2021, 987 p.
- 18. Metodicheskie ukazanija po raschetu valovogo vybrosa dvuokisi ugleroda v atmosferu iz kotlov teplovyh jelektrostancij i kotel'nyh. RD 153-34.0-02.318-2001 [Guidelines for calculating gross emissions of carbon dioxide into the atmosphere from boilers of CHP and boiler houses. RD 153-34.0-02.318-2001]. Moscow, SPO ORGR-JeS, 2001, 6 p.
- 19. Rekomendacii po proektirovaniju zoloshlakootvalov teplovyh jelektricheskih stancij. VNIIG im. B.E. Vedeneeva [Recommendations for the design of ash and slag dumps of CHP. VNIIG them. B.E. Vedeneeva.]. Saint Petersburg, VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 1986, 129 p.
- 20. Teplovye jelektricheskie stancii. Jekologicheskaja bezopasnost'. Akusticheskoe vozdejstvie (shum) normy i tre-bovanija. STO 70238424.13.140.001-2008, Prikaz NP «INVJeL» ot 15.12.2008 g. no. 42 [Thermal power stations. Environmental Safety. Acoustic impact (noise) norms and requirements. STO 70238424.13.140.001-2008, Order of NP "INVEL" dated December 15, 2008 no. 42]. Moscow, NP «INVJeL», 2008, 25 p.
- 21. Sistemnyj operator edinoj jenergeticheskoj sistemy. Informacija o fakticheskom rezhime raboty obektov DPM VIJe na territorii RF za 2021g. [System operator of the unified energy system. Information on the actual operating mode of CSA RES facilities in the Russian Federation for 2021], available at: URL: https://www.so-ups.ru/functioning/markets/surveys/renewable/2021/ (accessed 5 July 2022).

- 22. Razrabotka i proizvodstvo lopastej vetroagregatov. OOO «Politermo» [Development and production of wind turbine blades. LLC "Polytermo"], available at: (accessed 5 July 2022).
- 23. Lavrenov A.V., Sajfulina L.F., Buluchevskij E.A. et al. Tehnologii poluchenija propilena: segodnja i zavtra [Propylene production technologies: today and tomorrow]. Kataliz v himicheskoj i neftehimicheskoj promyshlenosti [Catalysis in the chemical and petrochemical industry], 2015, vol. 15, no. 3, pp. 6-19.
- 24. Gadeckij A.Ju. Jepihlorgidrinnye jepoksidnye smoly [Gadetsky A.Yu. Epichlorohydrin epoxy resins] [https://makston-engineering.ru/blog-zametki/post/epihlorgidrinnye-epoksidnye-smoly], available at: (accessed 5 July 2022).
- 25. Spravochnik neftehimika [Handbook of the petrochemist]. Ed. Ogorodnikov S.K. Leningrad, Himija, 1978, 592 p.
- 26. Tehnologija plasticheskih mass [Technology of plastics] Ed. Korshak V.V. 2<sup>nd</sup> ed., Moscow, Himija [Chemistry], 1985, 560 p.
- 27. Bashkatov T.V., Zhigalin Ja.L. Tehnologija sinteticheskih kauchukov: Uchebnik dlja tehni-kumov [Synthetic rubber technology: A textbook for technologists]. 2<sup>nd</sup> ed., Leningrad, Himija [Chemistry], 1987, 360 p.
- 28. Zoloshlakovye othody. Chast' 2: Jekonomicheskaja vygoda pererabotki. Kak zarabotat' na zole? [Ash and slag waste. Part 2: The economic benefits of recycling. How to make money on ashes?]. Available at: https://ectcenter.com/blog/zoloshlakovie-othody-2 (accessed 12 July 2022).
- 29. Pererabotka lopastej vetrogeneratorov: ot cementa do novyh lopastej [Recycling wind turbine blades: from cement to new blades]. Available at: https://rawi.ru/2021/08/pererabotka-lopastey-vetrogeneratorov-ot-cementa-do-novyih-lopastey/\_(accessed 12 July 2022).
- 30. Vestas predstavil tehnologiju polnoj pererabotki lopastej vetrjanyh turbin [Vestas introduces technology for complete recycling of wind turbine blades]. Available at: https://renen.ru/vestas-predstavil-tehnologiyu-polnoj-pererabotki-lopastej-vetryanyh-turbin/ (accessed 12 July 2022).
- 31. Lopastej mnogo, a mesta malo, ili kak utilizirovat' vetrogeneratory [There are a lot of blades, but there is little space, or how to dispose of wind turbines]. Available at: https://www.elec.ru/articles/naverteli-na-milliony-evrotonn/ (accessed 12 July 2022).

Edeleva Olga Alekseevna. PhD, Senior Researcher in the Laboratory of Heat Supply Systems of Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science (ESI SB RAS. The main research topics are formation of methodological approaches, models and methods of complex analysis and selection of areas for the development of heating systems, considering environmental and economic factors. AuthorID: 268868, SPIN: 4487-3032, ORCID: 0000-0002-0388-6164, edel@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, Lermonov st., 130.

Stennikov Valerij Aleksevich. Academician of RAS, Professor, honored Scientist of the Russian Federation, Director of Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science (ESI SB RAS. Valery Stennikov is author and co-author of more than 400 scientific publications. The main research topics are system research in the energy, theory of hydraulic circuits, mathematical modeling, optimization methods, heat supply systems, district heating systems, cogeneration, reliability, energy efficiency, energy saving, methods and algorithms for calculating heat tariffs; intelligent energy systems. AuthorID: 442880, SPIN: 7059-4182, ORCID: 0000-0001-6219-0354, sva@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, Lermonov st., 130.

Zarodnjuk Maksim Sergeevich. PhD, Researcher in the Laboratory of Thermodynamics of Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Science (ESI SB RAS). The main research topics are thermodynamic-circuit modeling of energy systems and plants, engineering ecology, mathematical physics, mathematical modeling. AuthorID: 112374, SPIN: 3176-8619, ORCID: 0000-0001-7920-5583 max@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, Lermonov st., 130.

Статья поступила в редакцию 26.08.2022; одобрена после рецензирования 23.09.2022; принята к публикации 23.09.2022.

The article was submitted 08/26/2022; approved after reviewing 09/23/2022; accepted for publication 09/23/2022.

УДК 621.317.791

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.008

# Цифровая система мониторинга уровня воды открытых водоемов Байкальской природной территории на основе технологии ИИС «КУМИР-РЕСУРС» для объектов энергетики

### Николаев Андрей Андреевич, Фискин Евгений Михайлович, Фискина Маргарита Михайловна

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, Иркутск, *Nikolaev-9494@mail.ru* 

**Аннотация.** В статье содержатся сведения о создании бюджетной цифровой системы мониторинга уровня воды открытых водоемов, которая включает измерительные датчики, устройства сбора и передачи данных на сервер для последующей обработки данных. Описаны новый способ и устройство для определения уровня жидкости в открытых водоемах. Предложено решение передачи данных мониторинга по технологии информационно-измерительных систем (ИИС) с использованием радиомодема.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, мониторинг уровня воды, радиомодем

**Цитирование:** Николаев А.А. Цифровая система мониторинга уровня воды открытых водоемов Байкальской природной территории на основе технологии ИИС «КУМИР-РЕСУРС» для объектов энергетики / А.А. Николаев, Е.М. Фискин, М.М. Фискина // Информационные и математические технологии в науке и управлении. -2022. -№ 3(27). -C. 84-94. -DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.008.

Введение. В соответствии с нормативно правовыми актами Российской Федерации в рамках организации государственного мониторинга окружающей среды ведутся работы по созданию единой государственной системы экологического мониторинга [1-4]. Параллельно созданием единой государственной экологического мониторинга, системы подразделениями ИНЦ СО РАН (в частности Лимнологическим институтом) осуществляется деятельность по мониторингу оз. Байкал и прилегающей территории, которая включает: методики формирования долгосрочных прогностических сценариев притока воды в озеро Байкал; методики цифрового мониторинга уровенного режима озера Байкал; другие соответствующие методики и модели [5]. К сожалению, на данный момент постоянный мониторинг наиболее уязвимой прибрежной зоны Байкала проводится на ограниченной территории, и в целом не отвечает современным требованиям, так как для него отсутствует комплексный подход к сбору и обработке информации. Для решения текущих задач необходима цифровая система мониторинга, отвечающая современным требованиям, а именно: снятие и передача данных в цифровом формате; синхронизация телеметрических данных с гидрологических постов; масштабируемость цифровой системы мониторинга. Данная работа посвящена созданию бюджетной цифровой системы мониторинга уровня воды открытых водоемов, которая включает измерительные датчики, устройства сбора и передачи данных, сервер обработки данных.

**1.** Использование информационно-измерительной системы для мониторинга состояния водных объектов энергетического комплекса региона. Для решения поставленных задач предлагаемая цифровая система мониторинга должна обеспечивать достоверными данными такие объекты энергетического комплекса региона, как Иркутская ГЭС, Братская ГЭС и Богучанская ГЭС.

В настоящее время на оз. Байкал действуют 18 гидрологических постов Иркутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС) и 2 поста Забайкальского УГМС, один из которых законсервирован. Наблюдения за уровнем воды проводятся на 17 объектах. Функционирующие гидрологические посты, по которым

рассчитывается средний уровень по всему оз. Байкал, достаточно равномерно расположены по периметру озера (рис. 1).

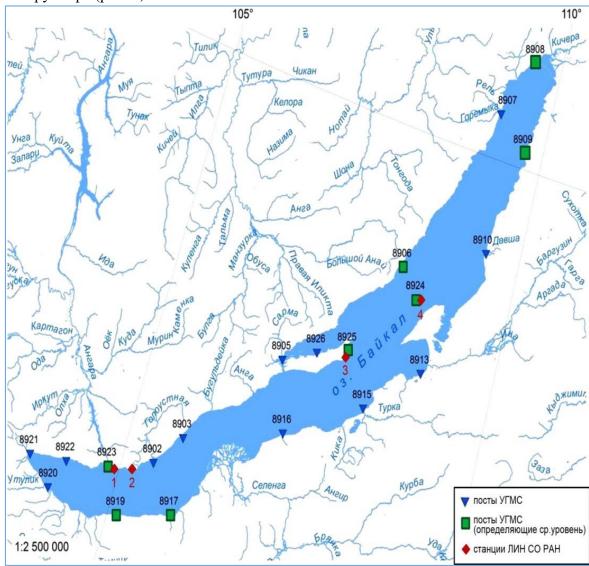


Рис. 1. Схема гидропостов наблюдений уровневого режима озера УГМС

Данные измерений автоматическими станциями накапливаются в памяти и передаются на сервер по каналам сотовой связи. Из-за экстремальных погодных условий в отдельные периоды возникают ошибки в передаче данных. Пример показан на рисунке 2. В этой связи требуется постоянная верификация и сортировка накопленных данных по времени, а также согласование с данными других станций.

Предлагаемая ИСЭМ СО РАН методика расчета среднего уровня оз. Байкал по оперативным данным четырех автоматических станций ЛИН СО РАН включает следующие процедуры:

- -контроль корректности накопленных данных по уровням для каждой станции за текущие сутки с корректировкой (или удалением) выбросов в данных с использованием оперативной визуализации в секундном разрешении;
- -расчет среднеминутных средних показателей для каждого часа суток с определением границ волнения для каждой станции;
- -расчет среднечасовых показателей уровня для каждой станции на основе обработки среднеминутных показателей;

- -расчет среднесуточных показателей на основе рассчитанных среднечасовых показателей;
- -расчет среднего уровня озера (по данным автоматических станций) на основе рассчитанных среднесуточных показателей для каждой станции;
- -расчет текущего среднего показателя уровня через выполнение процедуры экспоненциального сглаживания;
- -визуализацию динамики изменения среднего уровня с возможной его корректировкой в случае нарушения плавности кривой (отклонение более 1 см).

Все расчеты проводятся с точностью до 1 см, что позволяет формировать более плавную кривую динамики изменения уровня озера. Основным недостатком предлагаемой оценки среднесуточного уровня является малое количество автоматических станций, в настоящее время их всего 4.

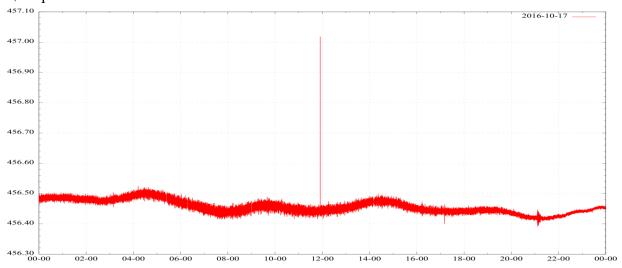


Рис. 2. Пример сбойного показателя: около 12:00 17.10.2016 г. по станции Листвянка

Для повышения надежности расчета показателей среднесуточного уровня озера желательно разместить дополнительные станции во всех пунктах расположения гидропостов УГМС. Это позволит определять не только среднесуточный уровень, но и его территориальное изменение с учетом волнения воды практически по всей прибрежной зоне озера. При введении в эксплуатацию достаточного количества автоматических станций можно будет повысить точность расчета среднесуточного уровня с определением новых весовых коэффициентов учета влияния каждой станции.

Как уже отмечалось ранее, на автоматических станциях данные измерений накапливаются в памяти устройства, а затем передаются на сервер по каналам сотовой связи. Основная проблема при установке таких автоматических станций мониторинга в северных районах озера Байкал заключается в том, что для чтения данных в реальном времени и передачи их на сервер необходима сеть GSM, которая в данных районах отсутствует. Таким образом, цифровая система мониторинга должна обеспечивать связь в подобных районах всей Байкальской природной территории не только по сети GSM, но и по радиоканалу.

На сегодняшний день множество компаний занимаются разработкой подобных систем. Предварительно нами был проведен обзор основных систем автоматизации, среди которых хотелось бы отметить МИЛУР, «Энергомера», SigFOX и ИИС «КУМИР-РЕСУРС». В результате обзора было выяснено, что каждый производитель ориентирован на проприетарное решение задач автоматизации и продвижение именно своих разработок и оборудования. Данное обстоятельство не позволяет создать бюджетную систему

мониторинга и создает дополнительные трудности при интеграции в систему мониторинга уже функционирующих гидрологических постов на озере Байкал.

Исключение составляет ИИС «КУМИР-РЕСУРС». Это мультиресурсная непроприетарная информационно-измерительная система компании ООО НТЦ Кумир с возможностью дистанционного сбора, обработки, хранения и анализа данных измерений с приборов учета электроэнергии, газа, тепла, горячей и холодной воды [6]. В основе ИИС «КУМИР-РЕСУРС» лежит запатентованный ООО НТЦ КУМИР инновационный способ передачи телеметрических данных по открытым сетям ІР, когда телеметрические устройства расположены в сегменте локальных частных адресов [7]. Его реализация в создании протокола Кумир-NET позволяет снизить транзакционные издержки при коммутации и передаче данных, в том числе и при использовании стандарта СПОДЭС (DLMS|COSEM) [8-10].

К преимуществам ИИС «КУМИР-Ресурс» так же можно отнести:

- стабильное программное обеспечение «КУМИР-net» на базе ОС Linux;
- масштабируемость;
- мультиресурсность;
- быстрое развертывание и автоматическую регистрацию приборов учета в сети;
- исчерпывающий набор аппаратуры собственного производства;
- открытую документацию на систему;
- возможность транспорта данных в различных физических средах (радиоканал 868 МГц, шина CAN, сети GSM(GPRS), Ethernet (пример на рисунке 3).

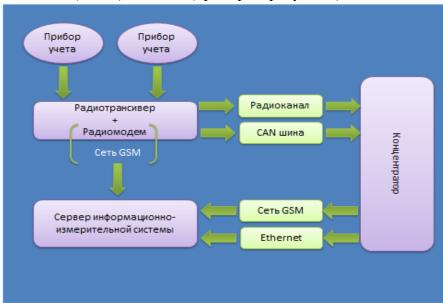


Рис. 3. Блок-схема передачи данных в 3-х средах

Такая гибридная реализация передачи данных с использованием радиоканала и CAN шины успешно работает в многоквартирных домах в сложных городских условиях, где инсталляции на основе чисто радиоканальных решений (LoRaWan, Sigox, Стриж/Вавиот) затратны и не дают гарантированный результат.

ИИС «Кумир-Ресурс» уже сейчас обеспечивает «полевой» уровень информационноизмерительной системы на аппаратном и на программном уровне [11, 12]. Последняя версия программного обеспечения сервера на стендовых испытаниях показывает скорости коммутации порядка 2 млн. транзакций в секунду при скоростях потока 2,4 Gbit/s. Этого должно хватить на обработку показаний с 50 млн. приборов учета с интервалом в 15 мин. Еще одним достоинством ИИС «Кумир-Ресурс» является недавно реализованная синхронизация времени на приборе учета (мониторинга) с сервером с точностью до 1 секунды. Это позволит синхронизировать телеметрические данные с приборов мониторинга всей системы на Байкальской природной территории по времени между собой и тем самым повысить достоверность показаний. При этом отпадает необходимость дополнительной установки системы GPS в точку мониторинга.

Таким образом, ИИС «Кумир-Ресурс» максимально подходит для решения поставленных задач и требует незначительных доработок для реализации на ее основе системы мониторинга Байкальской природной территории.

Следующим этапом разработки стало создание радиомодема для передачи телеметрических данных с измерительных станций.

**2. Радиомодем для системы мониторинга.** Для передачи данных из отдаленных районов озера Байкал было принято решение использовать радиомодем, адаптированный под задачи мониторинга.

Сначала был выполнен обзор уже существующих радиомодемов, в результате которого были рассмотрены радиомодемы систем МИЛУР, Энергомера, SigFOX и др. Радиомодемы данных производителей не имеют собственного элемента питания и не рассчитаны на полноценную работу в автономном режиме. Также у большинства радиомодемов отсутствует встроенная система передачи данных посредством радиоканала. Кроме того, хотелось бы отметить проблемы интеграции сторонних радиомодемов с ИИС «КУМИР-Ресурс».

Таким образом, было принято решение о разработке собственного радиомодема.

Основные технические требования, выдвигаемые к прототипу радиомодема:

- используемая рабочая частота 868МГц, т.к. не требует лицензии на использование;
- максимальная ЭИМ 100мВт [13];
- радиус уверенной связи концентратора с радиомодемами в диапазоне 25-100 км;
- максимальная скорость передачи данных не менее 9600 бит/с;
- опытный образец радиомодема не должен уступать по техническим характеристикам аналогам и стоить не более 10000 р.

За основу был принят радиомодем, разработанный в компании НТЦ Кумир и предназначенный для поквартирного учета данных РМ81. Дальность устойчивой передачи данных в результате полевых испытаний составила 6 км [14] Для использования данного радиомодема в системе мониторинга озера Байкал необходимо увеличить текущую дальность связи до 25-100 км.

Задача по увеличению дальности передачи данных была разбита на следующие этапы:

- увеличение мощности передатчика;
- использование термостабильных компонентов;
- увеличение чувствительности приемника;
- использование одноволновой (направленной) антенны.

Используя новый усилитель СС1190, можно повысить мощность передатчика, в результате чего ЭИМ увеличится в 4 раза, но на текущем этапе разработки было решено создавать опытный радиомодем без добавления усилителя СС1190, так как это не позволило бы оценить эффект увеличения дальности связи, используя другие методы, например, замену конденсаторов на термостабильные, использование направленных антенн, улучшение высокочастотного тракта, повышение чувствительности и других модернизаций, которые в комплексе могут дать хороший результат.

С целью установления максимальной дальности передачи данных радиомодемом в обновленной конфигурации были проведены полевые испытания. В качестве передатчика использовался модернизированный радиомодем PM81 совместно с секторальной антенной ПА868 с диаграммой направленности, представленной на рисунке 4.



Рис. 4. Диаграмма направленности антенны ПА868

На стороне приемника использовался модем M32 со штыревой антенной производства HTЦ КУМИР.

Место проведения испытаний показано на рисунке 5.



Рис. 5. Место проведения полевых испытаний

В результате максимальная дальность связи составила 23 км. При использовании более мощного усилителя СС1190 с максимальной ЭИМ 100мВт появится возможность увеличить дальность передачи данных до 100 км.

Таким образом, планируемая дальность передачи данных позволит разместить точки мониторинга в северной части Байкала, где наблюдаются трудности с мобильной связью и сетью интернет. Текущая и планируемая зона связи показаны на рисунке 6.

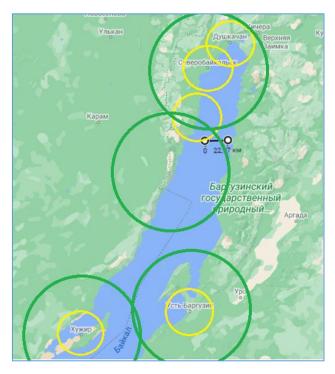


Рис. 6. Текущая (желтая) и планируемая (зеленая) зоны покрытия

Отличительной особенностью разрабатываемого радиомодема является возможность передавать данные других измерений, так как он имеет аналоговые и цифровые порты и может работать с аналоговыми и цифровыми датчиками, например, JFE AAQ-RINKO, который используется в настоящий момент на автоматических станциях мониторинга ЛИН СО РАН.

Следующий этап заключается в реализации свойства масштабируемости цифровой системы мониторинга, для чего требуется разработка относительно бюджетного способа измерения среднего уровня воды в открытой акватории.

**3.** Способ определения уровня воды. На данный момент открытие каждого дополнительного гидрологического поста обходится очень дорого ввиду использования зарубежных приборов и датчиков.

Например, гидрологический зонд MIDAS SVX2 производства Великобритании по состоянию на 2020 год стоил 767 401 руб., MIDAS CTD+ от 480 000 руб., американский зонд CTD SBE 49 FastCAT от 300 000 руб. Поэтому сложившаяся обстановка на рынке не позволяет создать бюджетную сеть мониторинга гидрологических параметров.

В рамках реализации свойства масштабируемости цифровой системы мониторинга был предложен новый более бюджетный способ определения среднего уровня воды открытых водоемов, на который в настоящий момент подана заявка на полезную модель в патентное бюро.

Основной задачей нового метода является определение среднего уровня воды природных водоемов в летний и зимний периоды. Метод позволит регистрировать поперечные волны и сейши в озере, отслеживать движение атмосферных фронтов, регистрировать влияние землетрясений и возможность их прогноза, регистрировать прочие природные явления на воде.

Принцип способа заключается в следующем. Вначале датчики калибруются на одной высоте для минимизации погрешности измерения. Затем на наземной станции устанавливается один из датчиков (опорный датчик) атмосферного давления, который в

расчетах принимается за ноль. В водоеме устанавливается измерительный буй со вторым регистрирующим датчиком, измеряющим текущее значение атмосферного давления на воде. При изменении уровня воды в водоеме регистрирующий датчик фиксирует изменение высоты посредством изменения атмосферного давления и передает данные на сервер.

Затем полученные данные используют для определения уровня жидкости в водоеме по определенным математическим зависимостям, описанным в изобретении. При определении уровня жидкости в водоеме компенсируется общее атмосферное давление, а в расчет принимается только разность между датчиками на суше и на воде по следующей формуле:

где  $P_H$  — значение атмосферного давления на берегу (г $\Pi$ а), а  $P_B$  — значение атмосферного давления с датчика в водоеме (г $\Pi$ а).

Полученное значение разности давления пересчитывается в уровень жидкости по соотношению:

$$0.002 \ \Gamma\Pi a = 0.0174 \ M (1.74 \ cM).$$

Схема инновационного способа измерения уровня воды представлена на рисунке 7.

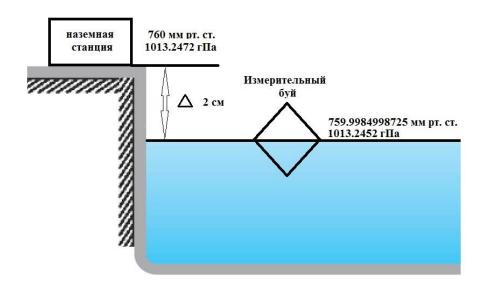


Рис. 7. Способ измерения уровня воды

Регистрирующее устройство состоит из чувствительного элемента, преобразователя интерфейса для работы с радиомодемом, радиомодема для передачи данных между устройствами, источников питания (аккумулятор, солнечные элементы), антенны и корпуса.

Простота внедрения регистрирующих датчиков позволяет расположить их на большой площади акватории, а радиоканальная передача данных дает возможность регистрировать данные в режиме онлайн. Это способствует созданию единой системы мониторинга гидрофизических параметров и уровня воды не только озера Байкал, но и таких объектов энергетики как Богучанская ГЭС, Братская ГЭС, Иркутская ГЭС.

При увеличении количества точек мониторинга кратно возрастает надежность расчетов и прогнозов по текущим методикам.

Заключение. Предлагаемая информационно-измерительная система является надежным и низкозатратным инструментом сбора, передачи и обработки информации в рамках создания единой государственной системы экологического мониторинга и локальной системы мониторинга прибрежной зоны озера Байкал и Прибайкальской территории.

Внедрение этой системы будет способствовать формированию общего массива данных для составления экологических карт, разработке геоинформационных систем, моделированию и прогнозу экологических ситуаций, использованию полученных данных в научных целях и в актуальных методиках расчета для объектов энергетики.

Синхронизация телеметрических данных позволит кратно повысить достоверность методик расчета, используемых в институтах для определения среднего уровня озера, в том числе его ежедневного значения для оперативного регулирования сбросами Иркутского гидроузла. Интеграция дополнительных станций по всей акватории прибайкальской территории позволит учитывать территориальное изменения уровня воды. При введении в эксплуатацию достаточного количества автоматических станций можно будет повысить точность расчета среднесуточного уровня с определением новых весовых коэффициентов учета влияния каждой станции.

Объединение усилий различных ведомств и научных организаций в рамках единой системы мониторинга окружающей среды позволит разработать комплексный подход к мониторингу окружающей среды и прибрежной зоны озера Байкал и Прибайкальской территории, использовать единую базу накопленных данных в интересах различных ведомств и научных организаций, существенно сократить общие затраты на проведение исследований.

#### Список источников

- 1. Указ «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». URL: http://kremlin.ru/events/president/news/57425. (дата обращения: 08.04.2022).
- 2. Федеральный закон от 01.05.1999 г. N 94-ФЗ " Об охране озера Байкал". URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/13787 (дата обращения: 15.04.2022).
- 3. Постановление Правительства РФ от 6 июня 2013 г. N 477 "Об осуществлении государственного мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды". URL: https://base.garant.ru/70393142/ (дата обращения: 14.04.2022).
- 4. Постановление Правительства РФ от 2 февраля 2015 г. N 85 "Об утверждении Положения о государственном экологическом мониторинге уникальной экологической системы озера Байкал". URL: https://base.garant.ru/70858440/ (дата обращения: 14.04.2022).
- 5. Никитин В.М. Концептуальные и методические основы мониторинга и прогнозирования уровенного режима озера Байкал / В.М. Никитин, Н.В. Абасов, Е.Н. Осипчук и др.// Отчет о научно-исследовательской работе по договору № 2.0110.20.10-нир от 12.10.2020 по крупному научному проекту фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки байкальской природной территории.
- 6. Комплекс учета и мониторинга ООО "НТЦ КУМИР". URL: http://ntckumir.ru (дата обращения: 09.04.2022).
- 7. Патент на изобретение N2382520 от 20.02.2010. Способ передачи данных телеметрии по открытым IP-сетям при нахождении устройств телеметрии в сегменте локальных частных адресов / Белоусов Р.А., Фискин Е.М., Фискина М.М.
- 8. Belousov R.A., Pinkin A.A., Fiskin E.M., Fiskina M.M. The possibilities of "Kumir-Resource" system for SMART GRID and apartment level energy accounting. EURO-ECO 2015. Das Internationale Symposium «Ökologische, Technologische und Rechtliche Aspekte der Lebensversorgung». Hannover, 2015, pp.15-16.
- 9. Belousov R.A., Pinkin A.A., Fiskin E.M., Fiskina M.M. Data collection system for SMART GRID. EURO-ECO 2014. Das Internationale Symposium «Ökologische, Technologische und Rechtliche Aspekte der Lebensversorgung». Hannover, 2014, pp.28-29.
- 10. Integrated Systems for Commercial and Technological Control of Energy Resources Consumption in Urban Areas and Businesses in. URL: https://www.scopus.com (дата обращения: 07.04.2022).
- 11. Федеральный закон от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ " Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации". URL: http://www.kremlin.ru/ acts/bank/30163 (дата обращения: 10.04.2022).
- 12. Федеральный закон от 27.12.2018 г. № 522-ФЗ " О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации". URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/43868 (дата обращения: 10.04.2022).

- 13. Решение Государственной комиссии по радиочастотам от 11 сентября 2018 г. N 18-46-03-1 "О выделении полос радиочастот, внесении изменений в решения ГКРЧ и продлении срока действия решений ГКРЧ". URL: https://base.garant.ru/72061772/ (дата обращения: 11.04.2022).
- 14. Николаев А.А. Радиомодем для поквартирного учета ресурсов/ А.А. Николаев, М.С. Сизых, А.А.Пинкин //Всероссийская научно-практическая конференция «Повышение эффективности производства и использования энергии в условия Сибири, 2016. –Том 2. С. 450-453.

**Николаев Андрей Андреевич,** аспирант кафедры РЭиТС, Иркутский национальный исследовательский технический университет, ORCID: 0000-0002-3171-8184, Nikolaev-9494@mail.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова д.83.

**Фискин Евгений Михайлович,** кандидат технических наук, доцент кафедры Радиоэлектроники и телекоммуникационных систем, Иркутский национальный исследовательский технический университет, ORCID: 0000-0002-3862-8675, fmm1@rambler.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова д.83.

**Фискина Маргарита Михайловна,** кандидат технических наук, доцент кафедры Радиоэлектроники и телекоммуникационных систем, Иркутский национальный исследовательский технический университет, ORCID: 0000-0001-6723-1047, fmm1@mail.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова д.83.

UDC 621.317.791

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.008

# Digital system for monitoring the water level of open reservoirs of the Baikal natural territory based on the technology of the IIS "KUMIR-RESOURCE" for energy facilities

#### Andrey A. Nikolaev, Evgeny M. Fiskin, Margarita M. Fiskina

National Research Irkutsk State Technical University, Russia, Irkutsk, Nikolaev-9494@mail.ru

**Abstract.** The material contains information about the creation of a budgetary digital system for monitoring the water level of open reservoirs, which includes measuring sensors, devices for collecting and transmitting data to a server for data processing. A method and device for determining the liquid level in open reservoirs is described. The decision to use data transmission technology as in information-measuring systems (IMS) is substantiated. A solution is proposed to create a radio modem for data transmission to the server.

Keywords: information-measuring system, water level monitoring, radio modem

#### References

- 1. Ukaz «O nacional'nyh celyah i strategicheskih zadachah razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2024 goda» [Decree "On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024], available at: http://kremlin.ru/events/president/news/57425. (accessed 08 April 2022). (In Russian)
- 2. Federal'nyj zakon ot 01.05.1999 g. N 94-FZ " Ob ohrane ozera Bajkal " [Federal Law No. 94-FZ of 01.05.1999 "On the Protection of Lake Baikal"]. Available at: http://www.kremlin.ru/acts/bank/13787. (accessed 15 April 2022). (In Russian)
- 3. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 6 iyunya 2013 g. N 477 "Ob osushchestvlenii gosudarstvennogo monitoringa sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchej sredy" [Decree of the Government of the Russian Federation No. 477 of June 6, 2013 "On the implementation of state monitoring of the state and pollution of the environment"]. Available at: https://base.garant.ru/70393142. (accessed 14 April 2022). (In Russian)
- 4. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 2 fevralya 2015 g. N 85 "Ob utverzhdenii Polozheniya o gosudarstvennom ekologicheskom monitoringe unikal'noj ekologicheskoj sistemy ozera Bajkal" [Decree of the Government of the Russian Federation No. 85 dated February 2, 2015 "On Approval of the Regulations on State Environmental Monitoring of the Unique Ecological System of Lake Baikal"]. Available at: https://base.garant.ru/70858440/. (accessed 14 April 2022). (In Russian)
- 5. Nikitin V.M., Abasov N.V., Osipchuk E.N., Berezhnykh T.V., Berdnikov V.M., Petrukhina V.A. Konceptual'nye i metodicheskie osnovy monitoringa i prognozirovaniya urovennogo rezhima ozera Bajkal. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote po dogovoru № 2.0110.20.10-nir ot 12.10.2020 po krupnomu nauchnomu proektu fundamental'nye osnovy, metody i tekhnologii cifrovogo monitoringa i prognozirovaniya ekologicheskoj obstanovki bajkal'skoj prirodnoj territorii. [Conceptual and methodological foundations for

- monitoring and forecasting the level regime of Lake Baikal. Report on research work under contract No. 2.0110.20.10-nir dated 10/12/2020 on a major scientific project fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the ecological situation in the Baikal natural territory.] (In Russian)
- 6. Kompleks ucheta i monitoringa OOO "NTC KUMIR" [Complex of accounting and monitoring LLC "NTC KUMIR"]. Available at: http://ntckumir.ru (accessed 09 April 2022). (In Russian)
- 7. Belousov R.A., Fiskin E.M., Fiskina M.M. Patent na izobretenie N2382520 ot 20.02.2010. Sposob peredachi dannyh telemetrii po otkrytym IP-setyam pri nahozhdenii ustrojstv telemetrii v segmente lokal'nyh chastnyh adresov [Patent for invention N2382520 dated February 20, 2010. Method for transmitting telemetry data over open IP networks when telemetry devices are located in the segment of local private addresses] (In Russian)
- 8. Belousov R.A., Pinkin A.A., Fiskin E.M., Fiskina M.M. The possibilities of "Kumir-Resource" system for SMART GRID and apartment level energy accounting. EURO-ECO 2015. Das Internationale Symposium «Ökologische, Technologische und Rechtliche Aspekte der Lebensversorgung». Hannover, 2015, pp.15-16.
- 9. Belousov R.A., Pinkin A.A., Fiskin E.M., Fiskina M.M. Data collection system for SMART GRID// EURO-ECO 2014. Das Internationale Symposium «Ökologische, Technologische und Rechtliche Aspekte der Lebensversorgung». Hannover, 2014, pp.28-29.
- 10. Integrated Systems for Commercial and Technological Control of Energy Resources Consumption in Urban Areas and Businesses in Russia. Available at: https://www.scopus.com (accessed 07 April 2022).
- 11. Federal'nyj zakon ot 23.11.2009 g. № 261-FZ " Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoj effektivnosti i o vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii" [Federal Law No. 261-FZ dated November 23, 2009 "On Energy Saving and Energy Efficiency Improvement and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation"]. Available at: http://www.kremlin.ru/acts/bank/30163 (accessed 10 April 2022). (In Russian)
- 12. Federal'nyj zakon ot 27.12.2018 g. № 522-FZ "O vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii v svyazi s razvitiem sistem ucheta elektricheskoj energii (moshchnosti) v Rossijskoj Federacii" [Federal Law No. 522-FZ of December 27, 2018 "On Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation in Connection with the Development of Electricity (Power) Metering Systems in the Russian Federation"]. Available at: http://www.kremlin.ru/acts/bank/43868 (accessed 10 April 2022). (In Russian)
- 13. Reshenie Gosudarstvennoj komissii po radiochastotam ot 11 sentyabrya 2018 g. N 18-46-03-1 "O vydelenii polos radiochastot, vnesenii izmenenij v resheniya GKRCH i prodlenii sroka dejstviya reshenij GKRCH" [The decision of the State Commission on Radio Frequencies of September 11, 2018 N 18-46-03-1 "On the allocation of radio frequency bands, amendments to the decisions of the SCR and the extension of the validity of the decisions of the SCR"]. Available at: https://base.garant.ru/72061772/ (accessed 11 April 2022). (In Russian)
- 14. Sizykh M.S., Nikolaev A.A., Pinkin A.A. Radiomodem dlya pokvartirnogo ucheta resursov: [Radio modem for apartment accounting of resources]. Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviya Sibiri» [Materials of the All-Russian scientific and practical conference "Improving the efficiency of production and use of energy in the conditions of Siberia"]. ISTU, 2016, vol. 2, pp. 450-453. (In Russian)
- Andrey A. Nikolaev, Postgraduate student of the Department of Radioelectronics and Telecommunication Systems, National Research Irkutsk State Technical University, ORCID: 0000-0002-3171-8184, Nikolaev-9494@mail.ru, Russia, Irkutsk, Lermontova d.83.
- **Evgeny M. Fiskin,** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radioelectronics and Telecommunication Systems, National Research Irkutsk State Technical University, ORCID: 0000-0002-3862-8675, fmm1@rambler.ru, Russia, Irkutsk, Lermontova d.83.
- Margarita M. Fiskina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radioelectronics and Telecommunication Systems, National Research Irkutsk State Technical University, ORCID: 0000-0001-6723-1047, fmm1@mail.ru, Russia, Irkutsk, Lermontova d.83.

Статья поступила в редакцию 01.07.2022; одобрена после рецензирования 06.09.2022; принята к публикации 07.09.2022.

The article was submitted 07/01/2022; approved after reviewing 09/06/2022; accepted for publication 09/07/2022.

УДК 536.24.083

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.009

# Применение компьютерных технологий на примере программного кода RELAP5 для расчетного воспроизведения экспериментов по изучению теплообмена в трубах с водой сверхкритического давления

#### Суджян Артавазд Манукович, Осипов Алексей Михайлович

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия, Москва, *artavazd1994@gmail.com* 

Аннотация. Расчетные исследования теплогидравлических процессов в активной зоне ядерных реакторов с легководным теплоносителем сверхкритического давления имеют высокую значимость. При этом сложность определения свойств воды в области сверхкритических параметров приводят к необходимости дальнейшего развития теплогидравлических моделей и инструментов прогнозирования, для чего приходится обращаться к современным компьютерным и информационным технологиям. Такие исследования необходимы при обосновании безопасности концепций ядерных реакторов со сверхкритическими параметрами теплоносителя. В рамках обоснования безопасности водо-водяных реакторов под давлением широкое распространение получил расчетный код RELAP5. При проведении расчетов крайне важны соотношения, используемые в программном коде для описания процесса теплообмена между стенкой и жидкостью. Для оценки корректности данных по теплообмену в трубах и пучках с водой сверхкритического давления, используемых в коде RELAP5, было выполнено воспроизведение эксперимента по изучению теплообмена в вертикальной трубке. Проведена серия расчетов температур стенки и теплоносителя при давлениях 23 и 25 МПа и различных тепловых потоках в диапазоне 600-1100 кВт/м2. Выполнено сравнение результатов эксперимента с результатами его расчетного воспроизведения. Результаты расчета и эксперимента сопоставлены с теоретическими представлениями о механизме теплоотдачи в воде сверхкритического давления.

**Ключевые слова:** ядерный реактор, компьютерные технологии, информационные технологии, легководный теплоноситель сверхкритического давления, теплообмен, RELAP5

**Цитирование:** Суджян А.М. Применение компьютерных технологий на примере программного кода RELAP5 для расчетного воспроизведения экспериментов по изучению теплообмена в трубах с водой сверхкритического давления / А.М. Суджян, А.М. Осипов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 3(27). − С. 95-103. − DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.009.

Введение. В современной ядерной энергетике предъявляются повышенные требования к безопасности и эффективности работы ядерных реакторов. На основании этого, в рамках международного форума Generation-IV [1] выбраны концепции ядерных реакторов, которые должны удовлетворять этим требованиям. Одной из шести таких концепций является реактор, охлаждаемый водой сверхкритического давления (СКД). Целью создания таких реакторов является повышенная эффективность (КПД примерно до 40 - 45%), снижение капитальных и эксплуатационных расходов, повышение эффективности использования топлива, повышение коэффициента теплоотдачи, возможность разработки быстрого реактора с водой сверхкритического давления с коэффициентом воспроизводства больше 1 [2]. При этом необходимо учитывать особенности свойств воды в окрестностях критической точки. Несмотря на то, что жидкости СКД рассматриваются как однофазные среды, в их свойствах выделяется так называемая «область псевдофазового перехода», по обе стороны от которой характер свойств существенно отличается [3]. Эта область отмечена на P-T диаграмме воды, показанной на рисунке 1 [4].

Ежегодно в рамках работ по проектированию реакторов СКД странами-участницами Generation-IV проводятся множество исследований. В силу особенностей работы в области сверхкритических давлений воды, возникают сложности с проведением экспериментальных работ, как технические, так и экономические. Исходя из этого, большинство исследований, посвященных данному типу реакторов носят именно расчетный характер. Чаще всего таким образом проводят три вида исследований: теплообмен в трубах и пучках, охлаждаемых

водой сверхкритического давления, авария с потерей легководного сверхкритического теплоносителя, а также неустойчивость расхода теплоносителя сверхкритических параметров в одиночном или параллельных обогреваемых каналах.

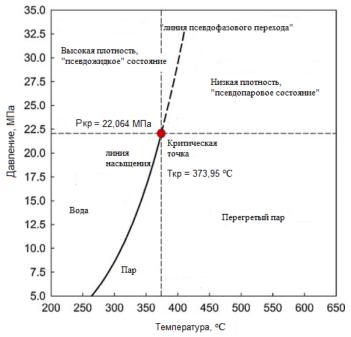


Рис. 1. Р-Т диаграмма воды

Изучение теплообмена в трубах и пучках с водой сверхкритического давления является одой из базовых научно-технических задач, решение которых необходимо при проектировании реакторов СКД [5]. В рассматриваемой области свойств легководного теплоносителя наблюдается весьма сложный характер различных режимов теплообмена. Во время первых исследований было обнаружено, что конвективный теплообмен может протекать как более интенсивно, так и менее интенсивно по сравнению с водой при докритических давлениях [6]. В результате этого был сделан вывод о том, что процессы, протекающие при сверхкритических параметрах, аналогичны кипению и кризису теплообмена в двухфазных потоках при докритическом давлении. Тогда был введен новый термин «псевдокипение». Принято выделять три режима теплоотдачи: нормальный, ухудшенный и улучшенный. Ухудшение теплоотдачи объясняется переходом от «псевдопузырькового» к «псевдопленочному» кипению [7].

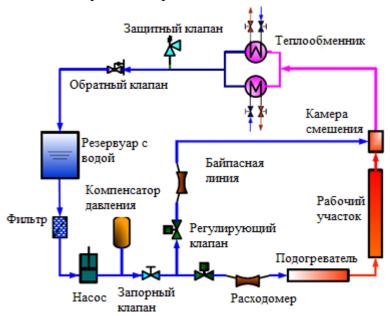
Целью данной работы являлось воспроизведение эксперимента по исследованию теплообмена восходящего потока сверхкритической воды в вертикальной трубке, выполненного на экспериментальной петле SCTM (Supercritical Water Thermalhydraulic Mechanism) в Институте Ядерной Энергии Китая (NPIC) [8].

Среди существующих расчетных кодов, одним из наиболее широко используемых для теплогидравлического анализа реакторов с легководным теплоносителем является RELAP5 [9]. Его активно используют в том числе для расчетов теплогидравлических процессов в системах, охлаждаемых водой сверхкритического давления. Поэтому RELAP5 использован в качестве инструмента для данного исследования.

**1.** Описание установки и эксперимента. Как уже было отмечено выше, для воспроизведения был выбран эксперимент по изучению теплообмена, выполненный на петле SCTM.

**Петля SCTM.** Петля SCTM представляет собой контур, сконструированный для исследования теплообмена в вертикальной трубке в условиях сверхкритических параметров водяного, принудительно циркулирующего теплоносителя [8]. Работа петли организована

следующим образом. Дистиллированная и деионизированная вода пропускалась через фильтр с помощью плунжерного насоса высокого давления. Насос позволял работать при давлении до 32 МПа и массовом расходе до 0,14 кг/с. Для регулирования давления В контуре использовался компенсационный резервуар. Регулирующие клапаны расходомеры, установленные контуре, позволяли контролировать массовый расход воды через рабочий участок. Перед входом в рабочий предварительно подогревали до требуемой температуры. осуществлялся непосредственно от источника переменного тока мощностью 240 кВт. Блок питания постоянного тока мощностью 600 кВт обеспечивал контроль теплового потока в рабочем участке. Вода из рабочего участка с температурой на выходе до 550 °C смешивалась с водой комнатной температуры из байпасной линии в камере смешения. Затем она протекала через два теплообменника. Теплообменники охлаждали воду из камеры смешения до комнатной температуры с помощью циркулирующей охлаждающей воды. После прохождения через обратный клапан давление воды снижалось до атмосферного, после чего она снова поступала в исходный резервуар. Контроль контура и измерения проводились с использованием системы контроля и сбора данных. Схема SCTM показана на рисунке 2.



**Рис. 2.** Схема петли SCTM

В качестве материала для испытательной секции SCTM был выбран сплав инконель-625. Внутренний диаметр трубки испытательного участка составляет 6 мм, толщина ее стенки — 2 мм, а длина активного нагрева — 300 см. Трубка нагревается с помощью трех медных проводов, подключенных от источника постоянного тока мощностью 600 кВт. Для измерения температуры теплоносителя на входе и выходе из рабочего участка использовались две термопары (типа N). Вдоль экспериментальной трубы были выделены 11 секций для измерения внешней температуры стенки, к каждой секции были прикреплены по 2 термопары (типа N). Также была выделена зона измерения перепада давления, в которой был расположен датчик для измерения полного перепада давления.

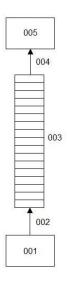
**Условия эксперимента.** Эксперименты проводились при различных значениях давлений и тепловых потоков в системе, а также при заданных значениях массового расхода. Выбранные значения давлений составили 23, 24 и 25 МПа, массовая скорость варьировалась в промежутке  $600 \text{ кг/м}^2\text{с}$  до  $1200 \text{ кг/м}^2\text{c}$ , тепловой поток — от  $600 \text{ кВт/м}^2$  до  $1100 \text{ кВт/м}^2$ , а температура теплоносителя от 300 °C до 500 °C. Параметры эксперимента вынесены в таблицу 1.

Таблица	1.	Параметры	эксперимента
т аулица	1.	Tiabametbbi	экспсыимспта

1	<u> </u>
Параметр	Значение
Давление (МПа)	23, 24, 25
Массовая скорость (кг/м <sup>2</sup> с)	600-1200
Тепловой поток (кВт/м <sup>2</sup> )	600-1100
Температура теплоносителя на входе/выходе из рабочего участка (°C)	300-500

**2. Программная реализация.** Воспроизведение эксперимента было выполнено с помощью программного кода RELAP5. В целях упрощения, при решении данной задачи, рассмотрение петли SCTM было ограничено рабочим участком.

**Модель рабочего участка.** Схема рабочего участка, реализованная в RELAP5, представлена на рисунке 3. Входная секция представлена время-зависимым объемом (ВЗО) 001 и время-зависимым соединением (ВЗС) 002. Рабочий участок представлен трубой 003. Непосредственно в данной трубе происходит нагрев теплоносителя, описанный в тепловой структуре. Выходной участок представлен одиночным соединением 004 и ВЗО 005.



**Рис. 3.** Схема рабочего участка в RELAP5

Подавляющее большинство расчетных работ в RELAP5 выполнены для легкой воды при докритических давлениях, что соответствует условиям нормальной эксплуатации существующих энергетических установок на легкой воде. Несмотря на то, что данный программный код содержит свойства легкой воды в сверхкритической области, опыт показал, что код недостаточно надежно выполняет расчеты в окрестности критической точки, в отличие от расчетов в докритической области. Проблема может быть частично решена благодаря использованию опций 21 (интерполирует производные плотности и температуры, которые хранятся в паровых таблицах) и 26 (использует билинейные подгонки термодинамических свойств и частных производных плотности и температуры по давлению и внутренней энергии в области сверхкритического давления). Использование данных опций позволило решить рассматриваемую задачу. Однако, для более сложных задач (например, расчета аварий с потерей теплоносителя СКД), в которых давление в системе резко меняется и преодолевает «область псевдофазового перехода», могут потребоваться более серьезные вмешательства в расчетные алгоритмы кода RELAP5.

**3.** Особенности расчета теплоотдачи. Для сравнения результатов эксперимента и результатов, полученных в расчете, использованы значения внешних температур стенки трубки по длине рабочего участка и энтальпии теплоносителя. Логика, используемая в RELAP5, подразумевает, что при давлении, превышающем критическое (22.12 МПа [10]) для

расчета теплоотдачи используется соотношение Диттуса-Болтера [11], так же, как и для однофазной жидкости или пара.

$$Nu = 0.023Re_{\mathcal{H}}^{0.8}Pr_{\mathcal{H}}^{0.4}$$
 (1)

где Nu, Re, Pr — безразмерные критерии Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля, соответственно, а индекс «ж» характеризует физические свойства среды при среднемассовой температуре жидкости.

Корреляция Диттуса-Болтера позволяет предсказывать экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи за пределами «области псевдофазового перехода» [12]. Однако, ее применение для расчета в пределах «области псевдофазового перехода» приводит к значительным отклонениям от экспериментальных данных. Данная корреляция не может быть применена для определения коэффициента теплоотдачи в области с ухудшенным режимом теплоотдачи.

Соотношение Диттуса-Болтера позволяет получить коэффициент теплоотдачи, практически совпадающий с экспериментальным, при тепловом потоке, равно нулю [7]. Известно, что использование данной корреляции приводит к относительно малым коэффициентам теплоотдачи при высоких значениях числа Прандтля. Таким образом, коэффициент теплоотдачи вблизи псевдокритической температуры, при которой число Прандтля становится большим, может быть занижен по сравнению с экспериментальным.

С увеличением теплового потока отклонения значений коэффициента теплоотдачи, полученных с помощью корреляции Диттуса-Болтера становятся более значительными [13]. Это объясняется сильной зависимостью теплофизических свойств, особенно удельной теплоемкости, от температуры. Свойства жидкости вблизи стенки отклоняются от тех, что вдали от стенки, и это отклонение увеличивается с ростом теплового потока.

Проведенные расчеты. Для выполнения расчетов, воспроизводящих эксперименты на петле SCTM, были использованы параметры, соответствующие описанным в пунктах 2.1 и 2.2. Однако, из-за неполноты исходных данных об эксперименте (в основном, данных о гидравлических сопротивлениях), возникла необходимость подбора исходных данных для RELAP5 с целью получения в процессе расчета необходимых номинальных значений, соответствующих условиям эксперимента. Причем, воспроизводились только эксперименты по выявлению режима ухудшенной теплоотдачи, которые проводились при двух фиксированных значениях давлений и различных тепловых потоках. Основные параметры, использованные для расчета представлены в таблице 2.

Таким образом, начальные и граничные значения были заданы в исходном файле. Стоит обратить внимание на различие значений температур теплоносителя на входе в рабочий участок в эксперименте и в расчете (300 °C и 200 °C соответственно).

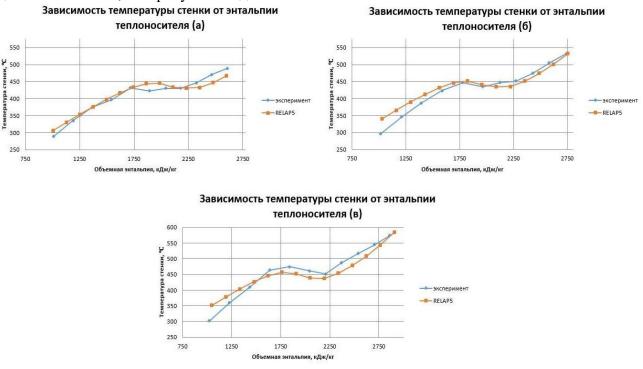
Таблица 2. Основные параметры для расчета

Тепловой поток		Массовая скорость	Температура	
			теплоносителя на	
$(\kappa B_T/M^2)$		(кг/м <sup>2</sup> с)	входе/выходе из	
			рабочего участка (°С)	
568; 602; 642		668; 657; 655	200/500	
929; 989; 1045;		1263; 1261; 1205; 1186	200/500	
1102				
	(кВт/м²) 568; 602; 642 929; 989;	(кВт/м²) 568; 602; 642 929; 989; 1045;	(κΒτ/м²) (κτ/м²c)  568; 602; 642 668; 657; 655  929; 989; 1045; 1263; 1261; 1205; 1186	

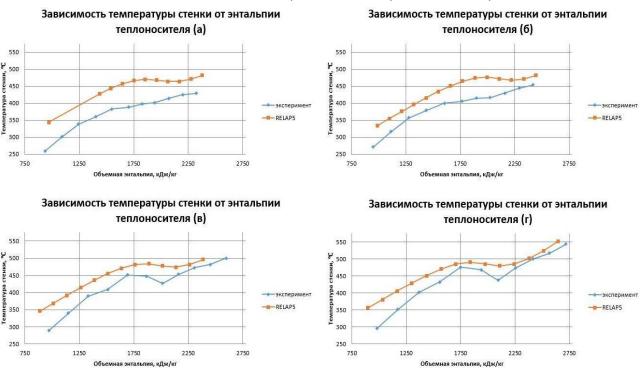
При анализе результатов эксперимента было обнаружено, что, несмотря на указанное в эксперименте значение входной температуры теплоносителя около  $300\,^{\circ}$ C, реальные значения ближе к  $200\,^{\circ}$ C, что было принято во внимание при моделировании. Расчет был

проведен до установления стационарных значений, для чего было достаточно 100 расчетных секунд, что соответствует реальному времени 5 секунд при расчете на процессоре Intel Core i7-351U с минимальным и максимальным шагом по времени  $10^{-7}$  с и  $10^{-2}$  с соответственно.

**Результаты.** По окончании расчетов были построены графики сравнения результатов эксперимента и его расчетного воспроизведения. На рисунке 4 представлены результаты при давлении 23 МПа, а на рисунке 5 – для 25 МПа.



**Рис. 4.** Сравнение результатов эксперимента и его расчетного воспроизведения при давлении 23 МПа для тепловых потоков: а)  $568 \text{ kBt/m}^2$ ; б)  $602 \text{ kBt/m}^2$ ; в)  $642 \text{ kBt/m}^2$ 



**Рис. 5.** Сравнение результатов эксперимента и его расчетного воспроизведения при давлении 25 МПа для тепловых потоков: а) 929 кВт/м $^2$ ; б) 989 кВт/м $^2$ ; в) 1045 кВт/м $^2$ ; г) 1102 кВт/м $^2$ 

По результатам эксперимента четко виден возникающий пик температуры стенки, после которого наблюдается «впадина». Это происходит в «области псевдофазового перехода». По результатам расчета можно видеть такую же картину, но с некоторым смещением относительно результатов эксперимента. Из рисунков видно, что при давлении 23 МПа расхождения результатов эксперимента и расчета меньше, нежели при давлении 25 МПа. В таблице 3 представлены результатов оценки максимального относительного отклонения результатов расчета от результатов эксперимента для каждого из случаев

Таблица 3. Оценка погрешности расчета

Давление (МПа)	Тепловой поток (кВт/м²)	Энтальпия (кДж/кг)	Температура стенки экспериментальная (°C)	Температура стенки расчетная (°C)	Относи- тельное отклоне- ние (%)
23	568	2480	475	449	6
23	602	2183	449	435	3
23	642	2435	499	470	6
25	929	1750	392	467	19
25	989	1831	410	471	15
25	1045	2013	427	477	12
25	1102	2101	437	481	10

Это в очередной раз подтверждает соображения относительно использования корреляции Диттуса-Болтера, описанные в пункте 3.2. Значения тепловых потоков в экспериментах при давлении 25 МПа были практически в два раза выше, чем при давлении 23 МПа. Это оказало серьезное влияние на точность полученных результатов, несмотря на то, что качественно зависимости, полученные по значениям из эксперимента и его воспроизведения, схожи. Из этого следует, что, помимо необходимости модернизации таблиц свойств воды и водяного пара в RELAP5, необходимо также рассмотреть возможность применения в данном программном коде различных корреляций, разработанных специально для сверхкритической области свойств воды.

Заключение. В работе было выполнено воспроизведение эксперимента по изучению теплообмена в трубке с водой сверхкритического давления. Для этого был выбран эксперимент на петле SCTM. По исходным данным из статьи [8] была выполнена серия расчетов по программе RELAP5, воспроизводящей исследования, выполненные в эксперименте. Были построены зависимости внешней температуры стенки от энтальпии теплоносителя в соответствующем объеме. Качественно результат показывает схожие зависимости и позволяет определить пик температуры стенки и ее «впадину» в «области псевдофазового перехода», но по значениям температуры стенки существует достаточно существенная разница. Эта разница обусловлена главным образом особенностями использования соотношения Диттуса-Болтера при расчете свойств воды вблизи «области псевдофазового перехода», где существует значительное отклонение от экспериментальных данных. Если при малых тепловых потоках отклонения несущественны, то при больших они весьма серьезны. Для качественного изучения механизма теплоотдачи в области сверхкритического давления воды программа RELAP5 подходит, но для получения более точных значений (по отношению к экспериментальным) стоит рассмотреть возможность модернизации свойств и соотношений, используемых для расчета теплоотдачи в рассматриваемом диапазоне свойств в данном программном коде. Очевидна потребность в наращивании качественной экспериментальной базы и проведении дальнейших работ по модернизации расчетных кодов и их верификации применительно к работе в условиях сверхкритического давления воды.

#### Список источников

- 1. Kirillov P.L. Bogoslovskaya G.P. Generation IV supercritical water-cooled nuclear reactors: Realistic prospects and research program. Nuclear Energy and Technology, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 67-74, DOI: 10.3897/nucet.5.34293.
- 2. Duffey R.B., Pioro I.L. Supercritical water-cooled nuclear reactors: review and status. Nuclear Materials and Reactors from Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Oxford, UK, 2005, vol. 9.
- 3. Курганов В.А. Теплообмен и сопротивление в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя / В.А. Курганов, Ю.А. Зейгарник, И.В. Маслакова, Ф.П. Иванов. Препринт ОИВТ РАН, 2011. №2-507.
- 4. Zvorykin A. et al. Specifics of heat transfer to supercritical water flowing in short vertical 7-rod bundle. The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE) 2019, The Japan Society of Mechanical Engineers, 2019, p. 1916, DOI: 10.1299/jsmeicone.2019.27.1916.
- 5. Деев В.И. Режимы теплообмена при движении воды сверхкритических параметров в вертикальных каналах / В.И. Деев // Теплоэнергетика, 2017. №. 11. С. 75-83. DOI: 10.1134/S0040363617110030
- 6. Грабежная В.А. Теплообмен при сверхкритических давлениях границы ухудшения теплообмена / В.А. Грабежная, П.Л. Кириллов // Теплоэнергетика, 2006. № 4. С. 46-51.
- 7. Koshizuka S., Takano N., Oka Y. Numerical analysis of deterioration phenomena in heat transfer to supercritical water. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, vol. 38, no.16, pp. 3077-3084, DOI: 10.1016/0017-9310(95)00008-W.
- 8. Yongliang L. et al. Experimental research on heat transfer of supercritical water upflowing in vertical. Proc. ISSCWR 5, 2011.
- 9. RELAP5/mod3.2 code manual. Volume I-VII. NUREG/CR-5535 INEL 95/0174, June 1995 г.
- 10. Moore K.V. ASTEM: A collection of fortran subroutines to evaluate the 1967 asme equations of state for water/STEAM and derivatives of these equations, Aerojet Nuclear Co., Idaho Falls, Idaho, 1971, no. ANCR-1026.
- 11. Dittus F. W. Heat transfer in automobile radiators of the tubler type. Univ. Calif. Pubs. Eng., 1930, vol. 2, 443p.
- 12. Mokry S. J. et al. Supercritical water heat transfer in a vertical bare tube: normal, improved, and deteriorated regimes. Nuclear technology, 2010, vol. 172, no. 1, pp. 60-70, DOI: 10.13182/NT10-A10882.
- 13. Cheng X., Yang Y. H., Huang S. F. A simplified method for heat transfer prediction of supercritical fluids in circular tubes. Annals of Nuclear Energy, 2009, vol. 36, no. 8, pp. 1120-1128, DOI: 10.1016/j.anucene.2009.04.016.

**Суджян Артавазд Манукович.** Инженер кафедры теплофизики НИЯУ МИФИ, младший научный сотрудник НИЦ КИ, AuthorID: 1133311, SPIN-код: 2947-4122, ORCID: 0000-0001-6943-9220, artavazd1994@gmail.com, Россия, Москва.

**Осипов Алексей Михайлович.** К.т.н., начальник отдела НИЦ КИ, ORCID: 0000-0001-6228-2697, Osipov\_AM@nrcki.ru, Россия, Москва.

UDC 536.24.083

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.009

## Application of computer science on the example of the RELAP5 program code for the computational reproduction of experiments on the study of heat transfer in pipes with supercritical pressure water

#### Artavazd M. Sujyan, Aleksey M. Osipov

National Research Center «Kurchatov Institute»,

Russia, Moscow, artavazd1994@gmail.com

**Abstract.** Computational studies of thermal-hydraulic processes in the core of nuclear reactors with supercritical water coolant are of high importance, especially at the stage of concept development of such reactors. At the same time, the complexity of determining the water properties at supercritical parameters leads to the need for further development of thermal-hydraulic models and forecasting tools, for which one has to turn to modern computer science and information systems. Such studies are necessary in justifying the safety of nuclear reactor concepts with supercritical coolant parameters. As a part of the safety justification for pressurized water reactors,

the RELAP5 program code has been widely used. When performing calculations, the correlations used in the program code to describe the heat transfer process between the wall and the liquid are extremely important. In order to assess the correctness of the data on heat transfer in pipes and bundles with supercritical water used in RELAP5 code, a reproduction of an experiment on heat transfer in the vertical pipe was performed. The series of calculations for the wall and the coolant temperatures at the pressures of 23 and 25 MPa and various heat fluxes in the range from  $600 \text{ kW/m}^2$  to  $1100 \text{ kW/m}^2$  have been performed. The results of the experiment are compared with the results of its computational reproduction. The calculated and experimental results are compared with the theoretical characterization of heat transfer mechanism in supercritical pressure water.

**Keywords:** nuclear reactor, computer science, information systems, supercritical water coolant, heat transfer, RELAP5

#### References

- 1. Kirillov P.L. Bogoslovskaya G.P. Generation IV supercritical water-cooled nuclear reactors: Realistic prospects and research program. Nuclear Energy and Technology, 2019, vol. 5, no. 1, pp. 67-74, DOI: 10.3897/nucet.5.34293.
- 2. Duffey R.B. Pioro I.L. Supercritical water-cooled nuclear reactors: review and status. Nuclear Materials and Reactors from Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Oxford, UK, 2005, vol. 9.
- 3. Kurganov V.A., Zeigarnik Y.A., Maslakova I.V., Ivanov F.P. Teploobmen i soprotivlenie v trubah pri sverhkriticheskih davleniyah teplonositelya [Heat transfer and resistance in pipes at supercritical coolant pressures]. Preprint OIVT RAN №2-507, 2011.
- 4. Zvorykin A. et al. Specifics of heat transfer to supercritical water flowing in short vertical 7-rod bundle. The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE) 2019, The Japan Society of Mechanical Engineers, 2019, p. 1916, DOI: 10.1299/jsmeicone.2019.27.1916.
- 5. Deev V.I. et al. Rezhimy teploobmena pri dvizhenii vody sverhkriticheskih parametrov v vertikal'nyh kanalah [Heat transfer regimes during the movement of water of supercritical parameters in vertical channels]. Teploenergetika [Thermal power engineering], 2017, no. 11, pp. 75-83, DOI: 10.1134/S0040363617110030
- 6. Grabezhnaya V.A., Kirillov P.L. Teploobmen pri sverhkriticheskih davleniyah granicy uhudsheniya teploobmena [Heat transfer at supercritical pressures, boundaries of heat transfer deterioration]. Teploenergetika [Thermal power engineering], 2006, no. 4, pp. 46-51.
- 7. Koshizuka S., Takano N., Oka Y. Numerical analysis of deterioration phenomena in heat transfer to supercritical water. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, vol. 38, no.16, pp. 3077-3084, DOI: 10.1016/0017-9310(95)00008-W.
- 8. Yongliang L. et al. Experimental research on heat transfer of supercritical water upflowing in vertical. Proc. ISSCWR 5, 2011.
- 9. RELAP5/mod3.2 code manual. Volume I-VII. NUREG/CR-5535 INEL 95/0174, June 1995 г.
- 10. Moore K.V. ASTEM: A collection of fortran subroutines to evaluate the 1967 asme equations of state for water/STEAM and derivatives of these equations, Aerojet Nuclear Co., Idaho Falls, Idaho, 1971, no. ANCR-1026.
- 11. Dittus F. W. Heat transfer in automobile radiators of the tubler type. Univ. Calif. Pubs. Eng., 1930, vol. 2, 443p.
- 12. Mokry S. J. et al. Supercritical water heat transfer in a vertical bare tube: normal, improved, and deteriorated regimes. Nuclear technology, 2010, vol. 172, no. 1, pp. 60-70, DOI: 10.13182/NT10-A10882.
- 13. Cheng X., Yang Y. H., Huang S. F. A simplified method for heat transfer prediction of supercritical fluids in circular tubes. Annals of Nuclear Energy, 2009, vol. 36, no. 8, pp. 1120-1128, DOI: 10.1016/j.anucene.2009.04.016.

Sujyan Artavazd Manukovich. Engineer of the Department of Thermal Physics, National Research Nuclear University MEPhI, Junior Researcher, NRC KI, AuthorID: 1133311, SPIN: 2947-4122, ORCID: 0000-0001-6943-9220, ar-tavazd1994@gmail.com, Russia, Moscow.

Osipov Alekcey Mikhailovich. Ph.D., Head of Department, NRC KI, ORCID: 0000-0001-6228-2697, Osipov\_AM@nrcki.ru, Russia, Moscow.

Статья поступила в редакцию 15.07.2022; одобрена после рецензирования 14.09.2022; принята к публикации 19.09.2022.

The article was submitted 07/15/2022; approved after reviewing 09/14/2022; accepted for publication 09/19/2022.

УЛК 004.942

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.010

# Моделирование разрушения стоимости российских энергетических компаний

### Дранко Олег Иванович<sup>1</sup>, Благодарный Евгений Владимирович<sup>2</sup>

- 1 Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Россия, Москва
- <sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Россия, Долгопрудный, *blagodarny@phystech.edu*

Аннотация. В статье рассматриваются информационные технологии развития российских предприятий с точки зрения увеличения или уменьшения (разрушения) стоимости бизнеса. Авторы используют модель дисконтированных денежных потоков для оценки фундаментальной стоимости бизнеса. Для исследования ощутимого изменения экономических параметров предприятий разработана модификация формулы стоимости бизнеса на основе дисконтированных денежных потоков в аналитическом виде, предполагая, что многие параметры остаются неизменными. Это предположение подтверждается динамикой развития крупных организаций. Модельные расчеты проводились на основе информации официальной финансовой отчетности российских организаций. Методы обработки больших данных позволили значительно сократить время обработки информации. Для целевого исследования были рассмотрены предприятия энергетической отрасли. Результаты расчетов показывают, что увеличение темпа роста выручки снижает стоимость бизнеса. Для этого используется особый термин – разрушение. Основным условием роста стоимости при увеличении выручки является превышение операционной рентабельности организации над ее фондоемкостью с учетом ставки дисконтирования. Модельные расчеты показали, что для многих российских организаций выбранной отрасли не выполняются оптимизационные условия максимизации стоимости, что позволяет говорить о разрушении стоимости российских энергетических компаний.

**Ключевые слова:** моделирование, рост устойчивости, оценка бизнеса, большие данные, информационные технологии, разрушение стоимости

**Цитирование:** Дранко О.И. Моделирование разрушения стоимости российских энергетических компаний / О.И. Дранко, Е.В. Благодарный // Информационные и математические технологии в науке и управлении. -2022. — № 3(27). — С. 104-112. — DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.010.

**Введение.** Мир и мировая экономика переживают турбулентные времена. Наиболее ключевым вопросом являются критерии управления предприятиями в краткосрочной и долгосрочной перспективе. Управление на основе стоимости (VBM) — один из основных подходов к управлению организациями в развитых странах. VBM исходит из того, что критерий роста стоимости является главной финансовой целью компании. В результате, решения на всех уровнях организации должны приниматься с учетом этой цели.

Согласно [1], концепция управления на основе стоимости (VBM) состоит из трех компонентов: создание ценностного мышления в компании — максимизация стоимости принимается в качестве основной финансовой цели компании; выявление факторов стоимости — понимание того, какие параметры определяют стоимость бизнеса; разработка процессов для управления стоимостью — воплощение ценностного мышления в повседневных делах и решениях компании.

Такой подход к VBM фокусируется на создании внутренней ценности компании. Обоснование концепции VBM заключается в том, что компании, ориентированные на ценность (стоимость), имеют более высокую производительность и обеспечивают большее благосостояние акционеров в долгосрочной перспективе [2]. Среди западных исследователей имеется множество работ по созданию (увеличению) или разрушению (уменьшению) стоимости при горизонтальных и вертикальных слияниях или поглощениях компаний. Пожалуй, работа [3] была одной из первых, в которой было обращено внимание на то, что стоимость может создаваться и разрушаться.

Некоторые авторы (например, [4]) ставят задачу активного управления для снижения потенциала разрушения стоимости. В частности, статья [1] указывает, что ускорение роста доходов компании разрушает стоимость в тех случаях, когда ROIC (доходность инвестированного капитала) меньше, чем WACC (средневзвешенная стоимость капитала) организации. В настоящей статье рассматривается применение подхода, связанного с исследованием влияния роста выручки на оценку фундаментальной стоимости и анализ применения для российских энергетических компаний.

1. Модель оценки стоимости дисконтированных денежных потоков. Рассмотрим математическую модель максимизации стоимости бизнеса. Российский федеральный стандарт оценки (ФСО N 8)<sup>1</sup> предписывает три основных подхода: доходный подход; сравнительный подход; затратный подход, а также использует средневзвешенное значение для определения итоговой оценки стоимости. В российском федеральном стандарте оценки не указано, как определяются веса каждого из подходов, и это оставляет множество возможностей для экспертных оценок. В классической книге на тему оценки [1] указывается, что основным и наиболее точным методом оценки стоимости является доходный метод при расчете дисконтированных денежных потоков. В настоящей работе этот метод будет считаться основным.

В прогнозном периоде делается подробный прогноз денежных потоков [5]. Основная идея этого подхода заключается в прогнозировании денежных потоков на основе финансовой отчетности за несколько последовательных лет. В постпрогнозном периоде делается допущение о фиксированном темпе роста денежного потока на протяжении всего периода деятельности компании

$$EV = \sum_{t=1}^{\infty} \frac{FCF_t}{(1+r)^t} = \sum_{t=1}^{T} \frac{FCF_t}{(1+r)^t} + \sum_{t=T+1}^{\infty} \frac{FCF_t}{(1+r)^t} = EV_1 + EV_2,$$
 (1)

где EV – стоимость бизнеса,  $EV_1$  and  $EV_2$  – стоимость бизнеса в прогнозном и постпрогнозном периодах соответственно, FCF – денежный поток в соответствующем периоде, r – ставка дисконтирования, T – продолжительность прогнозного периода, t – индекс времени.

Введем коэффициенты операционной прибыльности m, рассчитываемый как доля операционной прибыли без учета налога с продаж, и капиталоёмкости a, рассчитываемый как необходимый для роста выручки инвестированный капитал:

$$m = NOPLAT / S,$$
  
 $a = \Delta IC / \Delta S,$  (2)

где m — операционная прибыльность, S — выручка (продажи), NOPLAT — чистая операционная прибыль скорректированная на налоги, a — капиталоемкость, IC — инвестированный капитал.

Для определения коэффициента a (капиталоёмкость) используется ограничение по классу «зрелых» организаций, развитие которых сопровождается примерно пропорциональным увеличением выручки и активов, благодаря различным внутренним проектам. Тогда отношение среднего инвестированного капитала за период к приросту выручки за этот период приблизительно равно отношению инвестированного капитала к выручке по всему периоду:

$$a = \Delta IC / \Delta S \approx IC / S. \tag{3}$$

После простого преобразования [6], принимая во внимание что  $\Delta S_t = S_t \, s_t \, / \, (1 + s_t)$ 

$$EV = \sum_{t=1}^{\infty} \frac{S_t (m_t - a_t s_t / (1 + s_t))_t}{(1 + r)^t}.$$
 (4)

 $<sup>^1</sup>$  Приказ Минэкономразвития России от 01.06.2015 № 326 «Об утверждении Федерального стандарта оценки «Оценка бизнеса» (ФСО № 8)». http://www.consultant.ru/document/cons\_doc\_LAW\_180654/#dst100009. Дата обращения 10.08.2022.

С константными параметрами m, s и a, формула для экспресс-модели оценки стоимости в аналитическом виде принимает следующую форму:

$$EV = S_0 \left\{ \frac{m(1+s) - as}{s - r} \left\{ \left( \frac{1+s}{1+r} \right)^T - 1 \right\} + \frac{m(1+g) - ag}{r - g} \left( \frac{1+s}{1+r} \right)^T \right\}, \tag{5}$$

где  $S_0$  – выручка (продажи) начального периода.

Модель стоимости в аналитическом виде позволяет исследовать целевые показатели для широкого диапазона изменений входных параметров модели.

**2. Исследование модели оценки.** Основные факторы модели, влияющие на оценку: рост выручки; прибыльность; капиталоёмкость; ставка дисконтирования, включающая риск; постпрогнозный уровень роста; продолжительность прогнозного периода.

В работе [1] приводится вывод формулы стоимости через экономическую прибыль, который показывает, что рост стоимости происходит при общей дисконтированной величине экономической прибыли > 0, но не рассматривается распределение (профиль) экономической прибыли во времени, в частности — в прогнозном и постпрогнозном периоде.

Работа [7] показывает, что значительная доля общей стоимости создается в постпрогнозном периоде, в связи с чем важно распределение денежного потока во времени. Исследование показало, что в целях максимизации стоимости, увеличение выручки рекомендуется при соблюдении условия:

$$m - a r > 0, \tag{6}$$

в относительных значениях, или, после умножения на выручку, в абсолютных значениях

$$NOPLAT - IC r > 0, (7$$

в противном случае, происходит уменьшение (разрушение) стоимости. Назовем (7) условием инвестиционной привлекательности.

Научная значимость определения областей целесообразного изменения выручки для увеличения стоимости, описанная формулами (6) или (7), заключается в том, что расчеты проводились единовременно для всего диапазона значений, а не для отдельных значений параметров.

**3.** Данные, информационные системы. В качестве исходных данных был использован сервис открытых данных Росстат за 2013-2018 годы. Используя методы обработки больших объемов данных, была построена база данных финансовой отчетности организаций, а затем проведены расчёты. В связи с техническими ограничениями, база данных была ограничена выборкой крупных и средних организаций России (выручка свыше 800 млн руб.), включающей около 25 тыс. организаций.

Ведется работа по систематическому извлечению данных из финансовой отчетности российских организаций за 2019-2020 годы. По причине изменения формата данных и увеличения финансовых и административных барьеров извлечение данных не было завершено на дату написания настоящей работы. При выборочном извлечении данных за 2019-2020 годы для 11 крупнейших организаций, расчеты модели стоимости немного отличаются от результатов за 2013-2018 годы. По оценкам авторов, выводы останутся неизменными, но дополнительные расчёты в дальнейшем должны быть завершены.

Для проведенного анализа использовалась выборка организаций электроэнергетики (код ОКВЭД-2 «35.11 — Производство электроэнергии»). В выборку вошли 117 организаций с выручкой за 2018-й год более 800 млн. руб.

Авторами настоящей работы разработана информационная система для получения исходной информации из открытых данных Федеральной службы государственной статистики (Росстата) и ФНС России, а также для проведения расчетов.

Данные по нескольким организациям приведены в таблице 1.

Оценка ставки дисконтирования для российских компаний проведена по формуле

$$r = r_{CB} + r_{ERP}, \tag{8}$$

где r — ставка дисконтирования,  $r_{CB}$  — ключевая ставка Банка России,  $r_{ERP}$  — премия за риск капитала.

**Таблица 1.** Экономические показатели отдельных энергетических компаний, 2018 г., млн. руб.

		2010 1., MJin. py			
Название	Выручка	Инвестированный	Чистая	NOPLAT	
		капитал	прибыль		
POCATOM	389 076	1 772 489	39 687	44 551	
ТПЛЮС	230 751	296 431	13 012	23 780	
МОСЭНЕРГО	199 047	281 395	23 770	24 207	
ИНТЕР РАО	194 522	325 572	38 912	38 912	
РУСГИДРО	162 813	1 025 104	36 726	44 498	
ОГК-2	140 870	184 800	11 148	14 757	
ТГК-1	87 080	115 990	7 099	7 822	
ЮНИПРО	81 315	132 555	18 873	18 873	
ДАЛЬНЕВОСТОЧНАЯ ГЕНЕРИ- РУЮЩАЯ КОМПАНИЯ	75 001	74 499	-7 000	-3 333	
ФОРТУМ	73 807	189 210	14 339	19 320	
ЭНЕЛ РОССИЯ	73 452	101 623	5 081	6 894	
ЕВРОСИБЭНЕРГО- ГИДРОГЕНЕРАЦИЯ	66 716	115 187	13 525	22 245	
ИРКУТСКЭНЕРГО	54 481	234 013	12 229	18 124	
КВАДРА	53 364	73 089	969	2 750	
БАШКИРСКАЯ ГЕНЕРИРУЮ- ЩАЯ КОМПАНИЯ	46 779	43 529	5 013	5 013	
ТАТЭНЕРГО	42 365	53 795	2 596	2 947	
ЕВРОСИБЭНЕРГО	36 924	261 440	15 528	25 203	
ЯКУТСКЭНЕРГО	34 605	35 176	30	282	
ТГК-13	33 141	26 718	5 244	7 265	
КУЗБАССЭНЕРГО	31 369	74 463	4 223	9 722	
ТГК-16	30 741	21 652	1 893	2 714	
СИБИРСКАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КОМПАНИЯ	27 970	27 789	1 009	1 593	
КРЫМЭНЕРГО	20 834	25 061	24	33	
ТГК-11	19 516	16 275	1 726	1 757	
НИЖНЕВАРТОВСКАЯ ГРЭС	18 550	23 260	2 677	2 680	
	18 112	11 518	1 535	2 207	
АВЕЛАР СОЛАР ТЕХНОЛОДЖИ	18 112	11 318	1 333	2 20 1	

Ключевая ставка Банка России<sup>2</sup> 6,5% годовых (по состоянию на дату расчёта данных, январь 2020 года). Следует отметить, что расчеты проводились по финансовой отчетности на конец 2020 года. Как следствие, в расчетах использовалось значение 4,25% годовых.

Сложным вопросом является оценка премии за риск при инвестировании в акции компании. Поскольку изучение этого вопроса не является основным для данной работы, используем данные по странам [8]. Согласно данному источнику, премия за риск капитала для России составляет 6,85%. Для справки укажем, что страновая премия за риск для России (рейтинг Moody's Baa3) составляет 2,13%. Итого, оценка ставки дисконтирования

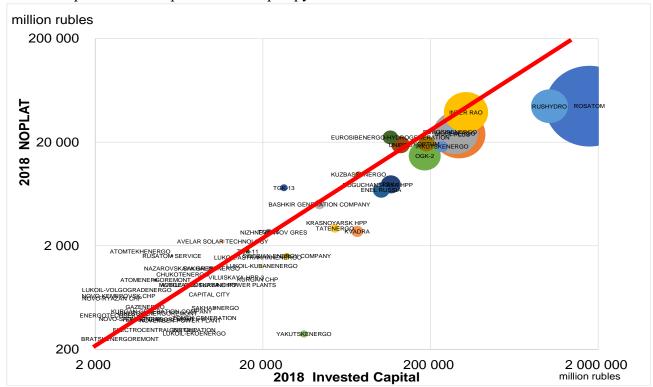
$$r = 4,25\% + 6,85\% = 11,1\%$$
.

**4. Результаты расчётов.** Были исследованы [9] перспективы российских энергетических компаний в условиях COVID, и, было заключено, что: рост выручки компаний мал; меры по ограничению деятельности российских организаций и населения существенно не по-

 $<sup>^2</sup>$  Ключевая ставка Банка России. http://www.cbr.ru/hd\_base/keyrate/. Дата обращения 15.08.2022.

влияли на устойчивость роста выручки и прибыли. С этой точки зрения можно сказать, что российские энергетические компании устойчивы в плане доходов.

На основе исходных данных по выборке организаций, были произведены расчеты о попадании параметров конкретных организаций в целевые решения по росту выручки. На рис. 1 представлены результаты расчетов. Ось X представляет инвестированный капитал (по логарифмической шкале), ось Y — NOPLAT (по логарифмической шкале). Каждый круг соответствует данным одной организации, где площадь круга пропорциональна выручке. Наименование организации отражено в центре круга.



**Рис. 1.** Чистая прибыль и инвестированный капитал российских энергетических организаций

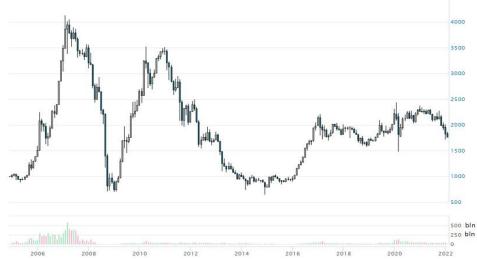
**Таблица 2.** Экономические показатели отдельных энергогенерирующих организаций, 2018 г., млн руб.

10	Кол-во ор-	Выручка,	Инвестированный	NOPLAT,
Категория	ганизаций	ИТОГО	капитал, итого	итого
Условие инвестиционной привлекательности соблюдено	35	649 804	836 728	123 702
Условие инвестиционной привлекательности не соблюдено	82	1 989 962	5 301 381	251 185
Итого	117	2 639 765	6 138 109	374 887

Из 117 рассмотренных организаций подавляющее большинство (82 организации, или 70%) не выполняют условие инвестиционной привлекательности. Более того, на эти организации приходится 75% выручки отрасли и 86% капитала.

- **5. Новые вопросы.** Проведенное исследование поднимает несколько вопросов, некоторые из которых кажутся фундаментальными.
  - 1. Какие критерии следует использовать для управления деятельностью организации?
- В данной работе рассматривается критерий оценки фундаментальной стоимости бизнеса, но корректен ли он для выборки российских энергетических организаций? Судя по результатам расчетов, критерий стоимости не является основным для принятия решений.

Рисунок 2 показывает динамику отраслевого индекса ММВБ Энергетика. После бурного роста, последовавшего за приватизацией РАО ЕЭС на фоне общей эйфории российского фондового рынка, индекс претерпевал резкие колебания, синхронизированные с движениями российского рынка в целом. На протяжении последних пяти лет, в индексе ММВБ Энергетика наблюдалась стагнация. Данное исследование показывает, что внутренние стимулы для увеличения стоимости российских энергетических компаний отсутствуют.



**Рис. 2.** Динамика отраслевого индекса ММВБ Энергетика<sup>3</sup>

- 2. Производство электроэнергии является стратегической инфраструктурной отраслью страны. Как органично совместить интересы страны (потребителей) и бенефициаров организаций?
- 3. Корректно ли использовать финансовую отчетность организаций из официальных источников в контексте организаций? Центры прибыли не совпадают с юридическими границами организаций; целесообразно изучать консолидированную управленческую отчетность по группам связанных компаний, однако, такая отчетность недоступна.
- 4. Как повысить инвестиционную привлекательность энергетических компаний? Настоящее исследование демонстрирует необходимость увеличения операционной прибыльности и снижения капиталоемкости. Последнее могло бы стать темой для отдельных обширных исследований. Опыт авторов в консалтинге показывает, что «зрелые» энергетические организации существенно зависят от устоявшихся технологий производства электроэнергии. Изменение таких технологий ассоциируется со значительными капитальными вложениями, временными рамками, рисками, и, для многих организаций, является существенным барьером;
- 5. Вопросы регулируемого ценообразования в электроэнергетике каким должен быть компромисс между долгосрочным развитием организаций и потребителями, в условиях дефакто монопольного рынка?
- 6. Могут ли организации увеличить свою операционную прибыльность и капиталоем-кость всего на несколько процентов? Из рассматриваемой выборки, 14 организациям необ-ходимо повысить свою инвестиционную привлекательность на 3%, 10 организациям на 5%, 11 организациям на 10%. Опыт авторов в консалтинге показывает, что такая задача посильна для организаций многих отраслей, но может оказаться серьезной проблемой для энергетической отрасли.

Заключение. В статье рассматривается увеличение стоимости российских энергетических организаций с ростом выручки, влияющим на стоимость. Получены и обработаны ис-

\_

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Источник: https://www.moex.com/ru/index/MOEXEU/technical/. Дата доступа 14.02.2022.

ходные данные финансовой отчетности около 100 энергетических организаций России. Проведен анализ, который показал нецелесообразность «прямого» увеличения выручки для большинства энергетических организаций без повышения их инвестиционной привлекательности. Можно сделать вывод, что большинство российских энергетических компаний являются инвестиционно непривлекательными в плане стоимости.

Анализ комплекса мер по повышению инвестиционной привлекательности является актуальной и срочной задачей, рассмотренной в ряде работ отечественных авторов [10-12], однако ещё далёкой от её теоретического и практического решения. Исследование модели сто-имости включает в себя несколько разнородных параметров: рост компании, эффективность и управление рисками. Небольшое изменение параметров может привести к значительному, и даже критическому, изменению целей. Подход к изучению критического результата с комбинацией малых изменений был рассмотрен А. Богомоловым и соавторами. [13, 14].

Сценарный подход (см. работы В. Кульбы, И. Чернова [15, 16]) показывает инструментарий сценарного анализа развития социально-экономической системы и предотвращения разрушения стоимости. Наконец, авторы хотели бы коснуться некоторых мифов, связанных с оценкой [17]. Асват Дамодаран считает, что «не существует точных оценок».

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность В. Филимонову за обсуждение и разработку аналитической модели стоимости компании, О. Крыминой и К. Степанову за обработку данных бухгалтерского учета организаций.

#### Список источников

- 1. McKinsey & Company, Koller T., Goedhart M. Valuation: measuring and managing the value of companies, 7th ed., NY: Wiley Finance, 2020, 896 p.
- 2. Copeland T.E. Why value value? The McKinsey Quarterly, 1994, no.4, pp. 97–109.
- 3. Fruhan W.E. Financial strategy: studies in the creation, transfer and destruction of shareholder value. Homewood, Ill., Irwin, 1979, 301 p.
- 4. Mahajan G. Critically exploring value destruction to create more value, journal of creating value, 2019, no. 5(1), DOI: 10.1177/2394964319841944.
- 5. Грязнова А.Г. Оценка бизнеса / А.Г. Грязнова, М.А Федотова. М.: Финансы и статистика, 2009. 736 с.
- 6. Дранко О.И. Аналитическая модель стоимости компании: факторы капиталистического соревнования / О.И. Дранко // Национальные интересы: приоритеты и безопасность, 2015. №30(315). С. 2–15.
- 7. Dranko O.I. The aggregate model of business valuation by three methods. 13th International Conference «Management of Large-Scale System Development» (MLSD'2020), 2020, no. 30(315), DOI: 10.1109/MLSD49919.2020.9247842.
- 8. Damodaran A. country default spreads and risk premiums. URL: http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New\_Home\_Page/datafile/ctryprem.html (дата обращения:15.08.2022).
- 9. Дранко О.И. Экспресс-модель прогнозирования финансово-экономического состояния энергетических компаний / О.И. Дранко., Н.Е. Маслякова // Труды Международной конференции "Энергетика XXI века: устойчивое развитие и интеллектуальное управление (ENERGY-21)" (Иркутск, 2020), 2020. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020906003.
- 10. Балашов В.Г. Технологии повышения финансового результата / В.Г. Балашов, В.А. Ириков. М.: МЦФЭР, 2009.-672 с.
- 11. Логиновский О.В. Эффективное управление организационными и производственными структурами / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, А.Л. Шестаков [и др.]. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2020. 450 с.
- 12. Бурков В.Н. Информационные технологии разработки систем управления развитием / В.Н. Бурков, И.В. Буркова // Автоматика и телемеханика, 2018. №10. C.95–105.
- 13. Bogomolov A.S., Rezchikov A.F., Kushnikov V.A. and etc.The Problem of Preventing the Development of Critical Combinations of Events in Large-Scale Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020, no. 1224, pp. 274–280.
- 14. Богомолов А.С. Анализ путей возникновения и предотвращения критических сочетаний событий в человекомашинных системах / А.С. Богомолов // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика, 2017. №17(2). С. 219–230.

- 15. Chernov I.V., Cherenkov I.V., Feyzov V.R. The study of the possibilities of constructing cognitive models of complex systems as a result of the analysis of time series of a limited number of factors on the example of financial markets. IFAC-PapersOnLine, 2021, no. 54(13), pp.166–171.
- 16. Shults V.L., Kulba V.V., Avdeeva Z.K. and etc.Decision support system on social stability governance based on scenario approach. International journal of engineering and technology (UAE), 2018, no. 7(2.28), pp.240–242.
- 17. Damodaran A. Valuation. Available at: http://people.stern.nyu.edu/adamodar/pdfiles/country/Brvaln01.pdf (дата обращения: 05.08.2022).

**Дранко Олег Иванович.** Д-р техн. наук, вед.н.с., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, ORCID: 0000-0002-4664-1335, olegdranko@gmail.com, Россия, г. Москва.

**Благодарный Евгений Владимирович.** Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), ORCID: 0000-0002-8993-1682, blagodarny@phystech.edu, Россия, г. Москва.

UDC 004.942

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.010

## Modeling of the value destruction of Russian energy organizations

## Oleg I. Dranko<sup>1</sup>, Evgeniy V. Blagodarnyy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Russia, Moscow

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Russia, Dolgoprudny, blagodarny@phystech.edu

Abstract. The paper addresses the information technology of the development of Russian enterprises from the point of view of increasing or decreasing (destroying) business value. We used a discounted cash flow model to estimate the fundamental value of the business. To study the palpable change in the economic parameters of enterprises, we have developed a modification of the formula for the value of a business based on discounted cash flows in an analytical form, assuming that many parameters remain unchanged. This assumption is confirmed by the dynamics of the development of large organizations. Model calculations were carried out based on information from the official financial statements of the Russian organizations. Methods for processing big data have significantly reduced the processing time of information. For the targeted study, energy-generating industry enterprises were considered. The calculation results show that an increase in the revenue growth rate reduces the value of the business. For this, a particular term is used – destruction. The primary condition for an increase in value with an increase in revenue is the excess of the operating profitability of an organization over its capital-output ratio, taking into account the discount rate. Model calculations showed that for many Russian organizations in the selected industry, the optimization conditions for maximizing the value are not met, which allows us to speak of the destruction of the value of Russian power generating organizations.

**Keywords:** modeling, resilience growth, business valuation, big data, information technology, value destruction **Acknowledgements:** The authors are grateful to V. Filimonov for discussing and developing an analytical model of the company's value and O. Krymina and K. Stepanov for processing accounting data of organizations.

#### References

- 1. McKinsey & Company, Koller T., Goedhart M. Valuation: measuring and managing the value of companies, 7th ed., NY: Wiley Finance, 2020, 896 p.
- 2. Copeland T.E. Why value value? The McKinsey Quarterly, 1994, no.4, pp. 97–109.
- 3. Fruhan W.E. Financial strategy: studies in the creation, transfer and destruction of shareholder value. Homewood, Ill., Irwin, 1979, 301 p.
- 4. Mahajan G. Critically exploring value destruction to create more value, journal of creating value, 2019, no. 5(1), DOI: 10.1177/2394964319841944.
- 5. Gryaznova A.G., Fedotova M.A. Otsenka biznesa [Business valuation]. Moscow, Finansy i statistika [Finance and Statistics], 2009, 736 p. (In Russian)
- 6. Dranko O.I. Analiticheskaya model' stoimosti kompanii: faktory kapitalisticheskogo sorevnovaniya [Analytical model of company value: factors of capitalist competition]. Natsional'nyye interesy: prioritety i bezopasnost'[National interests: priorities and security], 2015, no. 30(315), pp. 2–15. (In Russian)
- 7. Dranko O.I. The aggregate model of business valuation by three methods. 13th International Conference «Management of Large-Scale System Development» (MLSD'2020), 2020, no. 30(315), DOI: 10.1109/MLSD49919.2020.9247842.

- 8. Damodaran A. country default spreads and risk premiums. Available at: http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New\_Home\_Page/datafile/ctryprem.html (accessed: 15.08.2022).
- 9. Dranko O.I., Maslyakova N.E. Ekspress-model' prognozirovaniya finansovo-ekonomicheskogo sostoyaniya energeticheskikh kompaniy [The Forecasting Express-Model of the Energy Companies' Financial State]. Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii "Energetika XXI veka: ustoychivoye razvitiye i intellektual'noye upravleniye (ENERGY-21)" (Irkutsk, 2020) [Proceedings of the International Conference "Energy of the XXI century: sustainable development and intelligent control (ENERGY-21)" (Irkutsk, 2020)], 2020, DOI:10.1051/e3sconf/202020906003. (In Russian)
- 10. Balashov V.G., Irikov V.A. Tekhnologii povysheniya finansovogo rezul'tata [Technologies for Improving Financial Results]. M., MCFER, 2009, 672 p. (In Russian)
- 11. Loginovskiy O.V., Gollay A.V., Shestakov A.L. Effektivnoye upravleniye organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami [Effective management of organizational and production structures]. 2020, Moscow, INFRA-M, 450 p. (In Russian)
- 12. Burkov V.N., Burkova I.V. et al. Informatsionnyye tekhnologii razrabotki sistem upravleniya razvitiyem[Information technologies for the development of development management systems]. Avtomatika i telemekhanika [Automation and telemechanics], 2018, no. 10, pp. 95–105. (In Russian)
- 13. Bogomolov A.S., Rezchikov A.F., Kushnikov V.A. and etc.The Problem of Preventing the Development of Critical Combinations of Events in Large-Scale Systems. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020, no. 1224,pp. 274–280.
- 14. Bogomolov A.S. Analiz putey vozniknoveniya i predotvrashcheniya kriticheskikh sochetaniy sobytiy v chelove-komashinnykh sistemakh [nalysis of the ways of occurrence and prevention of critical combinations of events in human-machine systems]. Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Matematika. Mekhanika. Informatika [Izv. Sarat. university New ser. Ser. Maths. Mechanics. Informatics], 2017, no. 17(2), pp. 219–230. (In Russian)
- 15. Chernov I.V., Cherenkov I.V., Feyzov V.R. The study of the possibilities of constructing cognitive models of complex systems as a result of the analysis of time series of a limited number of factors on the example of financial markets. IFAC-PapersOnLine, 2021, no. 54(13), pp.166–171.
- 16. Shults V.L., Kulba V.V., Avdeeva Z.K. and etc.Decision support system on social stability governance based on scenario approach. International journal of engineering and technology (UAE), 2018, no. 7(2.28), pp.240–242.
- 17. Damodaran A. Valuation. Available at: http://people.stern.nyu.edu/adamodar/pdfiles/country/Brvaln01.pdf (accessed: 05.08.2022).

**Dranko Oleg Ivanovich.** Doctor of Engineering, Leading Researcher., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, ORCID: 0000-0002-4664-1335, olegdranko@gmail.com, Russia, Moscow.

Blagodarnyj Evgeniy Vladimirovich. Postgraduate student, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), ORCID: 0000-0002-8993-1682, blagodarny@phystech.edu, Russia, Moscow.

Статья поступила в редакцию 14.07.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 19.09.2022.

The article was submitted 07/14/2022; approved after reviewing 09/07/2022; accepted for publication 09/19/2022.

# Программные системы и комплексы

УДК 004.77

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.011

# Создание инструментов сбора данных для анализа аспектов безопасности Интернета вещей

Исаева Ольга Сергеевна, Кулясов Никита Владимирович, Исаев Сергей Владиславович

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Россия, Красноярск, isaeva@icm.krasn.ru

Аннотация: Целью работы является создание инструментов для сбора данных и исследования аспектов безопасности информационного взаимодействия распределённых устройств и приложений Интернета вещей (Internet of Things – IoT). Для достижения цели решены задачи: разработан специализированный исследовательский стенд, включающий все функциональные уровни архитектуры ІоТ, созданы инструменты сбора и агрегирования данных, построены показатели для выявления сетевых аномалий. Специализированный стенд включает сенсорный уровень, который состоит из измерительных устройств мониторинга окружающей среды, транспортный уровень, реализованный на основе инфраструктуры корпоративной сети, для сервисного уровня развёрнут кластер сбора и хранения данных, имеющий различные конфигурации настроек безопасности, на прикладном уровне размещено программное обеспечение для работы с данными. Инструменты выполняют сбор, агрегирование и анализ структурированных данных и неструктурированных журналов сетевого трафика, учитывая конфигурации настроек политик безопасности телекоммуникационных узлов. Построены показатели, отражающие активность и легитимность обращений с распределением по дням, странам и серверам. Инструменты предназначены для специалистов по кибербезопасности и позволяют анализировать влияние архитектуры ІоТ на обеспечение безопасности информационного взаимодействия элементов сети.

**Ключевые слова:** Интернет вещей, сетевые аномалии, кластер Kubernetes, протокол обмена сообщениями, Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), Eclipse Mosquitto, Smart environments

**Цитирование:** Исаева О.С. Создание инструментов сбора данных для анализа аспектов безопасности Интернета вещей / О.С. Исаева, Н.В. Кулясов, С.В. Исаев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 3(27). − С. 113-125. − DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.011.

Введение. Современные информационные технологии стали неотъемлемой частью любого производственного процесса. По данным аналитической компании Burning Glass Technologies, доля вакансий, требующих навыков работы в области искусственного интеллекта, больших данных, Интернета вещей, технологии блокчейн и облачных вычислений, существенно превышает объем квалифицированных ІТ-специалистов, ежегодно выпускаемых учебными заведениями в данном сегменте [1]. Особенностью программ обучения в области современных информационных технологий является ориентация не только на теоретическую проработку учебных материалов, но и на получение специализированных навыков проектирования и разработки информационных решений в различных прикладных областях. В этой связи требуется создание современных платформ, обеспечивающих повышение презентативности новых понятий и технологий для глубокого погружения в различные аспекты научно-исследовательской деятельности. Образовательные программы включают учебные стенды для исследования работы телекоммуникационного оборудования и систем управления, контроля или мониторинга данных [2]. В Красноярском математическом центре подготовка квалифицированных кадров сопровождается применением современных инструментов, обеспечивающих постановку и решение научных и прикладных задач. Одним из направлений исследований в этой области математический центр рассматривает создание инструментов практического изучения понятий, методов и технологий концепции промышленного Интернета вещей (Internet of Things – IoT).

Проводимое исследование направлено на создание масштабируемой инфраструктуры, включающей все функциональные уровни Интернета вещей, предназначенной для сбора данных и исследования аспектов безопасности информационного взаимодействия распределённых устройств и приложений. Методология проведения исследований строится на основе архитектурных решений специализированного стенда, объединяющего концептуальные понятия технологии Интернета вещей.

Интернет вещей представляет собой глобальную инфраструктуру информационного общества, обеспечивающую цифровые услуги за счёт организации связи между физическими или виртуальными объектами на основе совместимых информационных и коммуникационных технологий [3, 4]. Интернет вещей является интегратором «вещь-ориентированных», «интернет-ориентированных» и «семантико-ориентированных» технологий [5], определяя концепцию построения вычислительных сетей из распределённых устройств и приложений, где цифровые и физические объекты взаимодействуют между собой и с окружающей средой [6]. Массовое развёртывание огромного количества устройств ІоТ и неоднородность сценариев их использования требуют создания специализированных методов моделирования и анализа. Для такого направления инфокоммуникаций в настоящее время определены только общие подходы, которые постоянно корректируется и дополняется новыми спецификациями, на текущем этапе не способными в полной мере обеспечить надёжность и целостность огромных объёмов данных, получаемых от устройств.

Для проведения исследований выполнен обзор существующих технологических и архитектурных подходов к построению инфраструктуры IoT и рассмотрены проблемы безопасности на различных уровнях инфокоммуникационного взаимодействия распределённых устройств и приложений.

1. Подходы к построению функциональных уровней IoT. Архитектура IoT является естественной платформой для обеспечения автономности сбора данных, их совместимости и развёртывания независимых сервисов и приложений [7]. В общем случает она содержит четыре функциональных уровня: сенсорный, транспортный, сервисный и прикладной. Из-за неоднородности объектов IoT эти уровни могут включать промежуточное программное обеспечение между устройствами и приложениями, которое определяет абстрактное представление объектов для их эффективного обслуживания, управления и использования [8, 9]. Перечень функциональных уровней IoT приведён в табл. 1.

Таблица 1. Функциональные уровни ІоТ

Тип	Уровень	Функции	Примеры	
Приложения	Прикладной	Предоставление инфор-	Интерактивные информационные	
		мации, рекомендаций	панели в Grafana, Kibana. Приложе-	
		пользователю и взаимо-	ния управления предприятием (ERP,	
		действие с ним.	ERM).	
	Сервисный	Хранение данных, их	Облачные решения на основе ин-	
		аналитическая обработка	струментов Hadoop, ClickHouse, ES и	
			др.	
Инфра-	Транспортный	Передача данных между	Различные технологи и протоколы	
структура		уровнями	передачи данных (RS485, Ethernet,	
			COM, CAN, RTU, Modbus, ZigBee, Z-	
			Wave, Lora, BLE).	
	Сенсорный	Взаимодействие с окру-	Системы мониторинга производ-	
		жением (сбор, управле-	ственных помещений и устройств	
		ние).	(протоколѕ MQTT, CoAP).	

В таблице приведены примеры протоколов связи и приложений, используемые в современных архитектурах ІоТ. Выбор конкретных решений влияет на безопасность дальнейшего информационного взаимодействия уровней и приложений. Сенсорный уровень составляют устройства, интегрированные с датчиками, обеспечивающими сбор информации о состоянии наблюдаемых объектов в реальном масштабе времени. Транспортный уровень включает шлюзы и сети передачи данных. На этот уровень поступает большой объем данных, создаваемых устройствами ІоТ. Их объединение реализует инфраструктуру устройств. Данные, собираемые через сеть ІоТ, могут быть переданы службам, размещённым на облачных сервисах, которые позволяют интегрировать их с данными мобильных терминалов и других устройств [10].

Сервисный уровень обеспечивает хранение данных, их аналитическую обработку и управление бизнес-процессами. Прикладной уровень составляют проблемно-ориентированные приложения, решающие задачи конкретной предметной области [11].

Исследования безопасности систем IoT имеют свои особенности (ввиду специфики архитектурных и функциональных подходов) и требуют адаптации или создания новых технологических решений. Инфраструктура, реализующая функциональные уровни IoT, гетерогенна, мобильна и динамична [12], что является причиной развития сетевых атак, направленных на маршрутизацию между устройствами. Защита, в этом случае, специфична для каждого функционального уровня.

На сенсорном уровне строятся системы обнаружения аномального поведения, основанные на профилировании IoT-устройств. В [13] профили устройств содержат статистические характеристики, отражающие интенсивность и продолжительность передачи пакетов. В [14, 15] предложен подход к выявлению аномального трафика методами машинного обучения. Применены методы: дерево решений, случайный лес, нейронная сеть прямого распространения, *k*-ближайших соседей и показано, что все они дают высокий результат обнаружения аномалий трафика. Недостатком подхода является необходимость предварительного поиска обучающих примеров как типичного, так и аномального поведения устройств, что сужает круг обнаруживаемых аномалий. Кроме того, для анализа применяются только структурированные данные о сеансах связи, без учёта дополнительных сведений из неструктурированных журналов сетевого трафика. Ввиду динамичности источников атак и постоянно меняющихся характеристик аномального поведения устройств, автоматического контроля на основе методов машинного обучения недостаточно.

Проблемы безопасности транспортного уровня вызваны используемыми протоколами межуровневого взаимодействия (облегчёнными по сравнению со стандартными протоколами). Протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) [16] работает по схеме «Издатель-Брокер-Подписчик», где издателями выступают датчики и другие измерительные устройства ІоТ, брокерами – сервера для сбора и хранения данных, а подписчики – это объекты, которые потребляют данные, такие, как приложения на смартфон, iPad и пр. Такая схема вызывает проблемы аутентификации различных устройств, проблемы целостности и конфиденциальности пакетов данных, собранных между узлами, или компрометации всей сети устройств, в случае влияния на доступность в инфраструктуре IoT [17]. Анализ проблем безопасности протокола MQTT выполнен в [18, 19]. Показано, что MQTT уязвим к лавинным атакам (разновидность DoS-атаки), заключающимся в захвате соединений с брокером; атакам SYN - flooding, когда устанавливается большое число незакрытых сеансов TCP, нагружающих брокер; атаки типа «отказ в обслуживании», когда устанавливаются несколько соединений с брокером и для каждого соединения отправляются как можно большее количество сообщений; проблемам компрометации или подмены издателей или подписчиков при запросе недопустимых сообщений [20]. Все атаки приводят к загрузке серверов, на которых

размещаются брокеры, до состояния невозможности обслуживать легитимных издателей и подписчиков. В [21] предложено включать флаги безопасности в пакеты передачи по МQТТ и на их основе строить системы разграничения прав доступа. В [22] для этих целей предложены сервисы для авторизации пользователей, выполнена оценка производительности шлюза при высокой периодичности поступления данных. Показано, что по мере возрастания количества сообщений за единицу времени, их доставка за счёт анализа дополнительных заголовков, содержащих сведения о правах доступа, возрастает до 0.5-1 с, что существенно при соизмеримой частоте обновления данных. Необходимо соблюдать баланс между допустимым уровнем требований к безопасности и обеспечением скорости поступления данных. Для обеспечения упреждающего поведения систем мониторинга требуются инструменты, позволяющие специалисту по кибербезопасности проводить анализ статистики обращений, формировать показатели на основе неструктурированных журналов сетевого трафика и исследовать аномалии в данных в зависимости от настроек политики безопасности устройств в структуре IoT.

Созданы инструменты сбора данных и исследования аспектов безопасности информационного взаимодействия распределённых устройств и приложений ІоТ. Методы данного исследования включают проектирование архитектуры исследовательского стенда: состава и размещения измерительных устройств, организации коммутационной среды и кластера для хранения и анализа данных; его реализация позволит обеспечить совместную работу различных технологий и протоколов доступа в распределённой гетерогенной конфигурации. В архитектуру ІоТ предложено включить несколько брокеров данных, имеющих различные конфигурации политик безопасности и выполненных в виде физических или виртуальных серверов. Сбор и анализ данных с одновременно функционирующих брокеров, обладающих разной конфигурацией, позволит выявлять зависимости аномальных факторов от устройства сети ІоТ. Работа продолжает исследования в области кибербезопасности на основе сбора и анализа сетевого трафика [23, 24].

**2.** Построение исследовательского стенда IoT. Архитектура построенного для проведения исследований стенда IoT приведена на рис. 1. Показаны основные устройства и используемые технологические и инструментальные решения. Их выбор для каждого уровня архитектуры производился на основе литературы по IoT, рекомендаций со специализированных форумов разработчиков и выявления современных тенденций в данной предметной области.

Сенсорный уровень выполнен на основе измерительных устройств IoT (CL-210-Е производства ICP DAS), выполняющих мониторинг показателей температуры, влажности, точки росы и концентрации мелкодисперсной пыли для устройств, которые размещены в специализированных технологических помещениях с телекоммуникационным оборудованием. Транспортный уровень реализуется на основе существующей инфраструктуры корпоративной сети Красноярского научного центра, в которую встраиваются устройства IoT. Для сбора, хранения и анализа данных развёрнут кластер Kubernetes [25] (K8s) на 10 узлов.

Вычислительная структура размещена на 3-х физических серверах и отказоустойчивом кластере виртуальных машин: на двух физических серверах запущены 8 виртуальных машин (система виртуализации Hyper-V), третий сервер используется как полноценный узел кластера, дополнительный узел развёрнут на виртуальной машине отдельного кластера Hyper-V. На всех узлах кластера К8s использована операционная система Ubuntu server 20.04. Кластер К8s развернут поверх системы контейнеризации Docker. Централизованное управление жизненными циклами контейнеров выполняется на платформе orchestration Rancher [26]. Узлы кластера выполняют функциональные роли, обеспечивающие распределение рабочих нагру-

зок: Worker – «Рабочее приложение», Etcd – «Хранилище ключей и конфигураций кластера» и ControlPlane – «Поддержка управления».

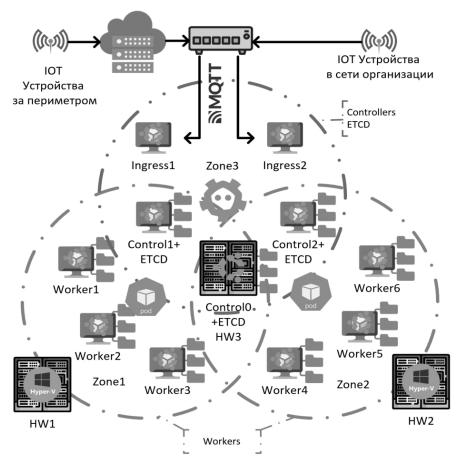


Рис. 1. Схема исследовательского стенда ІоТ

Выделены следующие области распределения ролей узлов кластера: 6 узлов Worker (ттх: 6 threads, 2gb dynamic RAM), на рисунке обозначены пунктиром с точкой, узел Etcd и ControlPlane (ттх: 2 threads, 2gb RAM), пунктир с двойной точкой, на пересечении областей находятся 3 узла, совмещающие роли Worker, Etcd и ControlPlane (ттх: 8 threads, 4gb RAM). Предполагается расширение узлов с индивидуальными настройками политик безопасности.

Накопление данных производится в брокерах, развёрнутых на Eclipse Mosquitto, поддерживающим протокол MQTT, предназначенным для обмена сообщениями между устройствами. Все сервера различаются конфигурацией настроек по способу доступа, использованию протокола шифрования и размещению, для исследования сетевых угроз и средства обеспечения безопасности доступа к данным. Настройки серверов: с авторизацией или без авторизации; с шифрованием (протокол Transport Layer Security, TLS) или без шифрования; с видимостью только из внутренней корпоративной сети или из сети Internet.

Построенная схема IoT реализована в виде исследовательского стенда, который обладает масштабируемостью и позволяет выполнять расширение каждого из уровней IoT.

**3. Формализация схемы информационного взаимодействия ІоТ.** Введём формализацию основных элементов схемы информационного взаимодействия и базовых операций для построения показателей анализа безопасности ІоТ.

### 3.1. Распределённые устройства ІоТ.

 $P = \{p_1, p_2, ..., p_k\}$  – издатели (источники данных), k – количество устройств IoT.

 $B=\{b_1, b_2, ..., b_m\}$  — брокеры (сервера, различающиеся настройками политик безопасности), m — количество виртуальных и физических серверов.

 $S = \{s_1, s_2, ..., s_n\}$  — подписчики (потребители данных, системы анализа и мониторинга), k — количество приложений и источников обращений к данным (значение ограничено в каждый момент времени).

Брокер b ∈ B характеризуется настройками политик безопасности, которые могут быть описаны кортежем признаков Ser(b) = <Vie, Rol, Ac, Cod, Pl>, где Ser — настройки сервера (брокера), Vid — виртуальный или физический сервер, значения: [Vir, Phy], Rol — роль из [Work, Etcd, Contr], Ac — способ доступа, принимает значение из [Auth, Anon], Cod — признак использования шифрования, принимает одно из значений [Open, TLS], Pl — размещение публичное или во внутренней сети, выбирается одно из значений: [Priv, Publ].

Максимальное число различных серверов брокеров определяется мощностью декартова произведения характеристик, то есть  $|B| = |Ac \times Cod \times Pl|$ , где | | - мощность множества.

**3.2.** Пакеты с данными от устройств IoT и сетевые журналы. Распределённые устройства формируют пакеты данных, передают их брокерам, которые, в свою очередь, собирают данные и ведут сетевые журналы. От издателей поступают фактографические данные с результатами измерений (периодичность их поступления зависит от настроек издателей), от подписчиков — запросы на соединение и получение данных.

Множество J — журналов брокеров содержит сообщения от элементов из множества  $\{P, S\}$  к брокеру  $b \in B$ . Обозначим  $J_b(t) \in J$  — журнал брокера b в момент времени t, тогда  $J = \bigcup_{t=0}^T J_b(t)$ . Записи журналов формируются по шаблонам  $Pt = \{Pt_l(c, b)\}$ , где элемент  $c \in \{P, S\}$  выступает как клиент, брокер  $b \in B$  — как сервер. Шаблоны описываются кортежами из характеристик соединений. Для каждого задаётся название —  $Name(Pt_l)$  и служебное слово в сообщении  $Theme(Pt_l)$ .

 $Pt_1$ : Name  $(Pt_1)$ =«Открытие соединения», Theme  $(Pt_1)$ = "New connection from".  $Pt_1(c,b)$ =<t,  $client\_port$ ,  $broker\_port$ >, где t – отметка времени в Unix Timestamp,  $client\_ip$  – адрес подключившегося клиента – элемента c,  $client\_port$  – порт, c которого пришёл запрос на соединение,  $broker\_port$  – порт, на котором брокер b получил запрос на соединение. Пример записи шаблона: %t: Theme % $client\_ip$ :% $client\_port$  on port % $broker\_port$ . Запись в журнале: 1655681432: New connection from 172.16.0.209:42240 on port 1883.

 $Pt_2$ :  $Name(Pt_2)$ =«Подтверждение соединения»,  $Theme(Pt_2)$ = "New client connected from".  $Pt_2(c, b)$ =<t,  $client\_ip$ ,  $client\_port$ ,  $client\_alias$ ,  $protocol\_version$ ,  $session\_status$ , keepalive, username>, где  $client\_alias$  — псевдоним клиента,  $protocol\_version$  — версия протокола,  $session\_status$  — статус сессии, keepalive — продолжительность соединения, username — имя пользователя при авторизации, остальные параметры описаны в шаблоне  $Pt_1$ .

Пример записи шаблона: %t: Theme % $client\_ip$ : % $client\_port$  as % $client\_alias$  (p% $protocol\_version$ , c% $session\_status$ , k%keepalive, u%username). Запись в журнале: 1655681432: New client connected from 172.16.0.209:42240 as  $mqtt2mysql\_k8s$  (p2, c1, k0, u'razor').

 $Pt_3$ : Name ( $Pt_3$ )=«Подписка», Theme( $Pt_3$ )= "Received SUBSCRIBE from".  $Pt_3(c, b)$ =<t,  $client\_alias$ , topick>, где topick – тема подписки, остальные параметры описаны в шаблоне  $Pt_2$ . Пример записи шаблона: %t: Theme % $client\_alias$ . %t % $client\_alias$  %topic. Запись в журнале: 1655681517: Received SUBSCRIBE from mqtt2mysql. 1655681517: mqtt2mysql 'modules/topic/412'.

Структуры шаблонов  $Pt_4$  и  $Pt_5$  совпадают.  $Name\ (Pt_4)$ =«Приём данных»,  $Them\ (Pt_4)$ = "Received PUBLISH from".  $Name\ (Pt_5)$ =«Отправка данных»,  $Theme\ (Pt_5)$ = "Sending PUBLISH to".  $Pt_4\ (c,\ b)$  = $Pt_5\ (c,\ b)$ = $< t,\ client\_alias,\ duplicate,\ qos,\ retain,\ source\_mid,\ topic,\ size>$ , где duplicate — признак дублирования, qos — параметр QOS, retain — удержание,  $source\_mid$  — идентификатор сообщения, size — размер пакета. Пример записи шаблонов: %t:  $Theme\ %client$ 

ent\_alias (d%duplicate, q%qos, r%retain, m%source\_mid, '%topic ' (%size bytes)). Запись в журнале (по шаблону  $Pt_4$ ): 1655681549: Received PUBLISH from  $CL-210-E\_163B59$  (d0, q0, r0, m0, 'modules/mqtt114-434/All' (232 bytes)). Запись в журнале (по шаблону  $Pt_5$ ): 1655681665: Sending PUBLISH to mqtt2mysql (d0, q0, r0, m0, 'modules/mqtt111-206/All', (231 bytes)).

Описаны шаблоны всех действий, включая запрос или подтверждение состояния, разрыв соединения, отмену подписки, пропуск данных, сообщения об ошибках и уведомлениях.

Каждый журнал  $J_b$  содержит записи о прохождении пакетов, соответствующие шаблонам  $Pt=\bigcup_{i=1}^{|Pt|}Pt_i$ , где |Pt| определяет количество шаблонов в заданной реализации. Для анализа журналов выполняется их разбор. Брокеры разбирают пакеты данных и наполняют базу данных с результатами измерений и журналы.

Обозначим D — множество результатов измерений, выполненных в заданные моменты времени. Для каждого издателя  $p \in P$  подмножество  $D_p(t) \in D$  содержит данные, полученные от устройства p в момент времени t. Тогда  $D = \bigcup_{t=1}^T D_p(t)$  описывает все данные от источника p за период наблюдений T, формируемый из отсчётов с интервалом в  $\Delta t + \tau$ ,  $\epsilon \partial e \Delta t$  — период измерений,  $\tau$  — вариация периода.

**3.3.** Операции над данными журналов. Сетевые аномалии могут наблюдаться на всех уровнях информационного взаимодействия ІоТ. Для их выявления выполняется анализ множества {D, J}. Автоматизировать в полной мере анализ возможно только для определения крупных событий, с выраженными признаками, определяемыми по прецедентам, но для превентивного реагирования и мониторинга состояния устройств и коммутационной среды требуются инструменты извлечения данных из неструктурированных источников, группировки показателей по признакам и их визуализации в графических представлениях.

Критерии анализа взаимодействия между брокером и издателями (устройствами IoT) основаны на статистике, отражающей частоту получения данных от каждого из устройств, и их объем. Для  $p \in P$  и  $D_p(t_1), D_p(t_2), \ldots, D_p(t_i)$ , где  $t_i = t_{i-1} + \Delta t + \tau_i$  выполняется:  $0 < D_p(t_i) \le D_p(t_{i-1})$ , то есть поступающие данные ограничены.

Для каждого  $\tau_i = (t_i - t_{i-1} - \Delta t)$  выполняется  $0 \le \tau_i \le \Delta t$ , то есть задержки сети при получении данных не превышают заданный интервал их обновления. Кроме того, сравнение значений  $\tau_i$  с настройками  $Ser(b_j)$  для  $b_j \in B$  позволит выявить влияние политик безопасности на качество доступа к данным IoT.

Критерии анализа взаимодействия между брокером и подписчиками (приложения IoT) основаны на разборе неструктурированных сетевых журналов. Используются стандартные операции объединения, пересечения множеств и вводятся операции выбора подмножества по условию, замены и группировки, которые реализуются в структурах шаблонов множества Pt:

 $\bigcup_{b\in B}J_b$  — объединение журналов для подмножества брокеров.  $\bigcap_{b\in B,A}J_b$  — пересечение журналов для устройств из B по полю A. Например, для выбора запросов от одного источника.

 $Sel~(J_b,~\theta)$  — множество элементов из журнала  $J_b$ , удовлетворяющих условию  $\theta$ . Если  $\theta$ = $\emptyset$ , то функция Sel выбирает все данные журналов, если  $\theta$  = $Pt_i$ , то выбираются данные журналов по условию по шаблону  $Pt_i$ .

 $Sub\ (J_b,\,A,\,V)$  — множество элементов из журнала  $J_b$ , в котором значения параметра A заменены на значения V из дополнительных справочников. Если в качестве A указывается параметр журнала  $client\_ip$ , а V — столбец из справочника с географической привязкой ірадресов, то функция позволяет выбирать и в дальнейшем группировать источники запросов.

*Group* ( $J_b$ , A) – группировка данных из журнала  $J_b$  по признаку A.

Введённые функции позволяют автоматизировать обработку данных, строить выборки и их графические представления, объединяя данные по источникам, странам, датам, типам

обращений, а также настройкам политик безопасности и размещения серверов с брокерами данных. Выбор последовательности записей для каждого источника и рассмотрение по ним результатов соединений по заданным шаблонам позволяют определять легитимность событий. В качестве условия  $\theta$  может быть задана одна из схем взаимодействия данных. Основные схемы, вызывающие интерес, показаны на рис. 2.

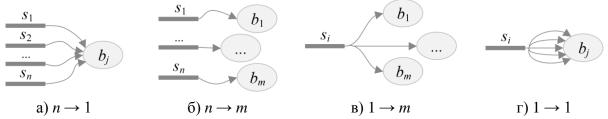


Рис. 2. Схемы взаимодействия с брокером

Выявление показанного на схемах взаимодействия напрямую не свидетельствует о наличии на сервере брокера аномальных соединений, но большое число подобных запросов за ограниченное время требует включения этого показателя в мониторинг для выявления источников и результатов соединений, а в объединении с функциями выбора и объединения данных по шаблонам с результатами источникам позволяют ограничивать трафик.

**4. Результаты применения стенда IoT.** Созданный исследовательский стенд позволяет наглядно демонстрировать основные понятия технологии IoT и подходы к обеспечению кибербезопасности. Инструменты автоматически разделяют данные от устройств и статистику обращений к серверам. Собираемые данные предназначены для анализа сетевых аномалий, отражающих такие угрозы, как перехват данных и управляющих сообщений, подмена информации, перегрузка оборудования ложными пакетами, определяющих свойства надёжности транспортной среды и безопасности межуровневого взаимодействия устройств и приложений.

Рассмотрены показатели сетевого трафика для мониторинга активности и безопасности обращений. На рис. 3 показана динамика роста запросов к устройствам IoT и серверам сбора данных.

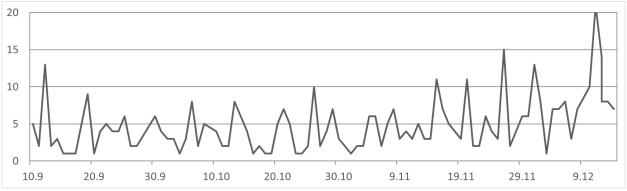


Рис. 3. Активность обращений (оси графика: количество обращений, дата обращения)

Исследования показывают, что после подключения стенда IoT к сети Internet наблюдается постепенный рост количества соединений. Причём факт подключения стенда не был анонсирован в публичном пространстве. Это показывает постоянное сканирование различных устройств и сервисов, поддерживающих технологию IoT.

На рис. 4 показано обобщённое распределение обращений к серверам по странамисточникам. Выполнено объединение данных для всех серверов, независимо от параметров их конфигурации.

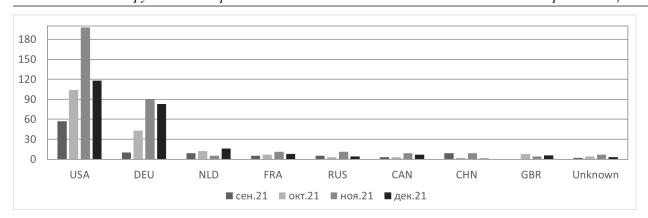


Рис. 4. Распределение обращений по странам

Гистограмма обращений показывает преобладающую активность хостов из США и Германии, что может свидетельствовать не только о популярности технологий IoT в этих странах, но и распространении в них агентов сканирования устройств IoT.

Для исследования безопасности различных конфигураций серверов выполнены выбор нелегитимных обращений и их группировка по серверам, имеющим различные настройки. На рис. 5 показана гистограмма выделенных обращений за несколько месяцев по всем серверам.

Из построенной гистограммы видно, что журналы содержат зафиксированные нелегитимные обращения как из внешней сети, так и из внутренней. Дальнейшее исследование направлено на выявление источников и причин соединений для хостов из внутренней сети.

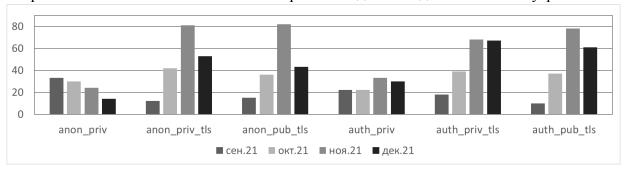


Рис. 5. Количество нелегитимных обращений к серверам

Заключение. В работе получены следующие результаты:

- разработан специализированный исследовательский стенд, включающий все функциональные уровни архитектуры IoT;
- выполнена формализация схемы информационного взаимодействия основных элементов архитектуры IoT в рамках исследовательского стенда;
- предложена формализация базовых операций для построения показателей анализа безопасности IoT;
- созданы инструменты сбора и агрегирования сетевых журналов и контролируемых устройствами ІоТ показателей;
  - построены показатели для выявления сетевых аномалий.

Разработанный исследовательский стенд представляет собой сконфигурированные в единую платформу по технологии Интернета вещей устройства с датчиками мониторинга окружающей среды, телекоммуникационные устройства и сервера для сбора и анализа данных. В состав стенда входит кластер на 10 узлов, вычислительная структура которого объединяет физические сервера и виртуальные машины. Структура стенда обеспечивает совместную работу различных технологий и протоколов доступа в распределённой гетероген-

ной конфигурации. Результаты его работы содержат данные измерений с датчиков и журналы сетевого трафика, которые размещаются в хранилище данных.

Научные и практические результаты работы заключаются в создании формализованных основ для исследования структурированных данных, контролируемых устройствами ІоТ и неструктурированных журналов сетевого взаимодействия между брокером данных, издателями и подписчиками. Это позволит выполнять мониторинг состояния устройств и коммутационной среды для анализа различных аспектов безопасности ІоТ.

Стенд ІоТ позволяет проводить научные исследования и обучение студентов по дисциплинам «Информационные и вычислительные сети» и «Интеллектуальные системы», обеспечивая погружение в тематическую среду, что способствует успешной реализации процесса подготовки квалифицированных ІТ-специалистов. Данные, генерируемые устройствами ІоТ, позволят проводить исследования методов интеллектуального анализа больших данных. Собираемые сетевые журналы позволят исследовать аспекты безопасности при конфигурировании межуровневого взаимодействия ІоТ.

Планируется развитие данных работ для исследования архитектурных и функциональных аспектов технологии IoT и основ обеспечения безопасного взаимодействия устройств и приложений. Все элементы исследовательского стенда имеют потенциал для масштабирования, что позволяет подключать новые наборы устройств IoT и использовать новые сетевые протоколы.

**Благодарности.** Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2022-873).

#### Список источников

- 1. Lyu W., Liu J. Artificial Intelligence and emerging digital technologies in the energy sector. Applied Energy, 2021, no. 303(9), pp. 117615, DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117615.
- 2. Training stand for learning the basics of embedded systems programming. Available at: https://www.dlink.ru/stand.html (дата обращения: 28.03.2022).
- 3. Росляков А.В. Интернет вещей: учебное пособие / А.В. Росляков, С.В. Ваняшин, А.Ю. Гребешков. Самара: ПГУТИ, 2015.-200 с.
- 4. Atzori L., Iera A., Morabito G. The internet of things: A survey. Computer Networks, 2010, no. 54(15), pp. 2787–2805, DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- 5. Angelo G. Simulation of the Internet of Things. Proceedings of the IEEE 2016 International Conference on High Performance Computing and Simulation, 2016, DOI: 10.1109/HPCSim.2016.7568309.
- 6. Мальцева Н.С. Моделирование гибридной топологической инфраструктуры сети «Интернета вещей» / Н.С. Мальцева, А.А. Сорокин, П.С. Резников, В.М. Дорохов // Наука, образование, инновации: пути развития, 2019. № 10. С. 89–93.
- 7. Javed A., Heljanko K., Buda A., Främling K. CEFIoT: A fault-tolerant IoT architecture for edge and cloud IEEE World forum on Internet of things, 2018, pp. 813-818, DOI: 10.1109/WF-IoT.2018.8355149.
- 8. Botta A., Donato W., Persico V., Pescapé A. Integration of cloud computing and internet of things: A survey. Future Generation Computer Systems, 2016, no. 56, pp. 684–700, DOI:10.1016/j.future.2015.09.021.
- 9. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. Future Generation Computer Systems, 2013, no. 29, pp. 1645–1660, DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010.
- 10. Miorandi D., Sicari S., Pellegrini F., Chlamtac I. Internet of things: Vision, applications and research challenges. Ad Hoc Networks, 2012, no. 10(7), pp. 1497-1516.
- 11. Sanabria-Russo L., Pubill D., Serra J., Verikoukis C. IoT data analytics as a network edge service. IEEE Conference on computer communications workshops, 2019, pp. 969-970, DOI: 10.1109/INFCOMW.2019.8845207.
- 12. Кучерявый А.Е. Интернет вещей / А.Е. Кучерявый // Электросвязь, 2013. № 1. С. 21-24.
- 13. Meidan Y., Bohadana M., Mathov Y., Mirsky Y., Breitenbacher D., Shabtai A., Elovici Y. N-BaIoT: Network-based detection of IoT botnet attacks using deep autoencoders. IEEE Pervasive Computing, Special Issue. Securing the IoT, 2018, no. 17(3), pp. 12–22.

- 14. Татарникова Т. М. Обнаружение атак в сетях интернета вещей методами машинного обучения / Т. М. Татарникова, П. Ю. Богданов // Информационно-управляющие системы, 2021. № 6. С. 42–52. DOI: 10.31799/1684-8853-2021-6-42-52.
- 15. Vaccari I., Chiola G., Aiello M., Mongelli M., Cambiaso E. MQTTset, a new dataset for machine learning techniques on MQTT. Sensors, 2020, no. 20, pp. 1-17, DOI:10.3390/s20226578.
- 16. Saxena S., Jain S., Arora D., Sharma P. Implications of MQTT connectivity protocol for IoT based device automation using home assistant and OpenHAB. 6th International conference on computing for sustainable global development, 2019, pp. 475-480.
- 17. Roldán-Gómez J., Carrillo-Mondéjar J., Castelo Gómez J.M., Martínez J.L. Security assessment of the MQTT-SN protocol for the Internet of Things. Journal of Physics: Conference Series, 2021, no. 2224, DOI:10.1088/1742-6596/2224/1/012079.
- 18. Haripriya A., Kulothungan K. Secure-MQTT: An efficient fuzzy logic-based approach to detect DoS attack in MQTT protocol for Internet of Things. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019, DOI: 10.1186/s13638-019-1402-8.
- 19. Firdous S.N., Baig Z., Valli C. A. Ibrahim Modelling and evaluation of malicious attacks against the IoT MQTT protocol. Proceedings of the IEEE International Conference on Internet of Things, 2017, pp. 748–755, DOI: 10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2017.115.
- 20. Wood A.D., Stankovic J.A. Denial of service in sensor networks. Computer, 2002, no. 35, pp. 54–62, DOI: 10.1109/MC.2002.1039518.
- 21. Munshi A. Improved MQTT secure transmission flags in smart homes. Sensors, 2022, no. 22(6), pp. 2–15, DOI: 10.3390/s22062174.
- 22. Дикий Д.И. Протокол передачи данных MQTT в модели удалённого управления правами доступа для сетей Интернета / Д.И. Дикий, В.Д. Артемьева // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2019. № 19(1). С. 109—117. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-109-117.
- 23. Isaev S.V., Kononov D.D. Analysis of the dynamics of Internet threats for corporate network web services. CEUR Workshop Proceedings, 2021, vol. 3047, pp. 71–78, DOI 10.47813/sibdata-2-2021-10.
- 24. Kononov D.D., Isaev S.V. Development of secure automated management systems based on web technologies. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, vol. 537(5), DOI:10.1088/1757–899X/537/5/052024.
- 25. Лукша M. Kubernetes в действии / M. Лукша. M: ДМК Пресс, 2018. 672 с.
- 26. Rancher 1.6 Docs. Available at: https://rancher.com/docs/rancher/v1.2/en/ (accessed: 28.03.2022).

**Исаева Ольга Сергеевна.** К.т.н, с.н.с. отдел Прикладной информатики Институт вычислительного моделирования СО РАН. Область научных интересов: методы искусственного интеллекта, анализ данных, цифровые двойники. SPIN-код: 8412-5807. ORCID: 0000-0002-5061-6765. Researcher ID: A-8905-2018. isaeva@icm.krasn.ru. Россия, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50, стр. 44.

**Кулясов Никита Владимирович.** Программист первой категории в ИВМ СО РАН. Область научных интересов: аналитика данных, информационная безопасность, распределённые вычислительные системы. AuthorID: 884843, SPIN-код: 9017-5937, ORCID: 0000-0001-5582-9498, WOS Research ID: ADA-6587-2022, razor@icm.krasn.ru. Россия, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50, стр. 44.

Исаев Сергей Владиславович. К.т.н, доцент базовой кафедры вычислительных и информационных технологий Сибирского федерального университета, заведующий отделом Информационно-телекоммуникационных технологий и заместитель директора Института вычислительного моделирования СО РАН по научной работе. Область научных интересов: кибербезопасность и защита информации, интернет-технологии, распределённые информационные системы, интеллектуальные системы. SPIN-код: 1552-8542, AuthorID: 1623, ORCID: 0000-0002-6678-0084, si@icm.krasn.ru, Россия, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50, стр. 44.

UDC 004.77

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.011

## Creating data collection tools to analyze security aspects Internet of Things

### Olga S. Isaeva, Nikita V. Kulyasov, Sergey V. Isaev

Institute of Computational Modeling of SB RAS, Russia, Krasnoyarsk, isaeva@icm.krasn.ru

**Abstract.** The goal of investigation is to create data collection tools for studying the security aspects of information interaction between distributed devices and applications of the Internet of Things (IoT). To achieve the goal, the tasks were solved: a specialized research stand including all functional levels of the IoT architecture was developed, tools for collecting and aggregating data were created and indicators to detect network anomalies were built. The specialized stand includes a sensor level, which consists of measuring devices for monitoring the environment, a transport level implemented on the basis of a corporate network infrastructure, a data collection and storage cluster with various configurations of security settings is deployed for the service level, software for working with data is placed at the application level. The tools collect, aggregate and analyze structured data and logs unstructured on network traffic, taking into account the configuration settings of the security policies of telecommunications nodes. The indicators reflecting the activity and legitimacy of requests with distribution by days, countries and servers have been constructed. The tools are designed for cybersecurity specialists and allow you to analyze the impact of the IoT architecture on the security of the information interaction of network elements.

**Keywords:** Internet of Things, network anomalies, Kubernetes cluster, messaging protocol, Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), Eclipse Mosquitto, Smart environments

**Acknowledgements:** This work is supported by the Krasnoyarsk Mathematical Center and financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the establishment and development of regional Centers for Mathematics Research and Education (Agreement No. 075-02-2022-873).

#### References

- 1. Lyu W., Liu J. Artificial Intelligence and emerging digital technologies in the energy sector. Applied Energy, 2021, no. 303(9), pp. 117615, DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117615.
- 2. Training stand for learning the basics of embedded systems programming, Available at: https://www.dlink.ru/stand.html (accessed: 28.03.2022).
- 3. Roslyakov A.V., Vanyashin S.V., Grebeshkov A.Yu. Internet veshchej: uchebnoe posobie [Internet of things: a tutorial], Samara: PGUTI, 2015, 200 p. (In Russian)
- 4. Atzori L., Iera A., Morabito G. The internet of things: A survey. Computer Networks, 2010, no. 54(15), pp. 2787–2805, DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- 5. Angelo G. Simulation of the Internet of Things. Proceedings of the IEEE 2016 International Conference on High Performance Computing and Simulation, 2016, DOI: 10.1109/HPCSim.2016.7568309.
- 6. Malceva N.S., Sorokin A.A., Reznikov P.S. [et al.] Modelirovanie gibridnoj topologicheskoj infrastruktury seti «Interneta veshchej» [Modeling the hybrid topological infrastructure of the Internet of Things network]. Nauka, obrazovaniye, innovatsii: puti razvitiya [Science, education, innovation: ways of development], 2019, no. 10, pp. 89–93. (In Russian)
- 7. Javed A., Heljanko K., Buda A., Främling K. CEFIoT: A fault-tolerant IoT architecture for edge and cloud. IEEE World forum on Internet of things, 2018, pp. 813-818, DOI: 10.1109/WF-IoT.2018.8355149.
- 8. Botta A., Donato W., Persico V., Pescapé A. Integration of cloud computing and internet of things: A survey. Future Generation Computer Systems, 2016, no. 56, pp. 684–700, DOI:10.1016/j.future.2015.09.021.
- 9. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. Future Generation Computer Systems, 2013, no. 29, pp. 1645–1660, DOI: 10.1016/j.future.2013.01.010.
- 10. Miorandi D., Sicari S., Pellegrini F., Chlamtac I. Internet of things: Vision, applications and research challenges. Ad Hoc Networks, 2012, no. 10(7), pp. 1497-1516.
- 11. Sanabria-Russo L., Pubill D., Serra J., Verikoukis C. IoT data analytics as a network edge service. IEEE Conference on computer communications workshops, 2019, pp. 969-970, DOI: 10.1109/INFCOMW.2019.8845207.
- 12. Kucheryavy A.E. Internet veshchej [Internet of Things]. Electrosvyaz [Telecommunications], 2013, no. 1, pp. 21-24. (In Russian)
- 13. Meidan Y., Bohadana M., Mathov Y., Mirsky Y., Breitenbacher D., Shabtai A., Elovici Y. N-BaIoT: Network-based detection of IoT botnet attacks using deep autoencoders. IEEE Pervasive Computing, Special Issue. Securing the IoT, 2018, no. 17(3), pp. 12–22.

- 14. Tatarnikova T. M., Bogdanov P. Yu. Obnaruzhenie atak v setyah interneta veshchej metodami mashinnogo obucheniya [Intrusion detection in internet of things networks based on machine learning methods]. Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems], 2021, no. 6, pp. 42–52, doi:10.31799/1684-8853-2021-6-42-52. (In Russian)
- 15. Vaccari I., Chiola G., Aiello M., Mongelli M., Cambiaso E. MQTTset, a new dataset for machine learning techniques on MQTT. Sensors, 2020, no. 20, pp. 1-17, DOI:10.3390/s20226578.
- 16. Saxena S., Jain S., Arora D., Sharma P. Implications of MQTT connectivity protocol for IoT based device automation using home assistant and OpenHAB. 6th International conference on computing for sustainable global development, 2019, pp. 475-480.
- 17. Roldán-Gómez J., Carrillo-Mondéjar J., Castelo Gómez J.M., Martínez J.L. Security assessment of the MQTT-SN protocol for the Internet of Things. Journal of Physics: Conference Series, 2021, no. 2224, DOI: 10.1088/1742-6596/2224/1/012079.
- 18. Haripriya A., Kulothungan K. Secure-MQTT: An efficient fuzzy logic-based approach to detect DoS attack in MQTT protocol for Internet of Things. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2019, DOI: 10.1186/s13638-019-1402-8.
- 19. Firdous S.N., Baig Z., Valli C. A. Ibrahim Modelling and evaluation of malicious attacks against the IoT MQTT protocol. Proceedings of the IEEE International Conference on Internet of Things, 2017, pp. 748–755, DOI: 10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2017.115.
- 20. Wood A.D., Stankovic J.A. Denial of service in sensor networks. Computer, 2002, no. 35, pp. 54–62, DOI: 10.1109/MC.2002.1039518.
- 21. Munshi A. Improved MQTT secure transmission flags in smart homes. Sensors, 2022, no. 22(6), pp. 2–15, DOI: 10.3390/s22062174.
- 22. Dikii D.I., Artemeva V.D. Protokol peredachi dannyh MQTT v modeli udalyonnogo upravleniya pravami dostupa dlya setej Interneta [MQTT data protocol in remote access control management model for Internet networks]. Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2019, no. 19(1), pp. 109–117, DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-109-117. (In Russian)
- 23. Isaev S., Kononov D. Analysis of the dynamics of Internet threats for corporate network web services. CEUR Workshop Proceedings, 2021, no. 3047, pp. 71–78, DOI: 10.47813/sibdata-2-2021-10.
- 24. Kononov D.D., Isaev S.V. Development of secure automated management systems based on web technologies. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, no. 537(5), DOI: 10.1088/1757–899X/537/5/052024.
- 25. Luksha M. Kubernetes v dejstvii [Kubernetes in action], Moscow, DMK Press, 2018, 672 p. (In Russian)
- 26. Rancher 1.6 Docs. Available at: https://rancher.com/docs/rancher/v1.2/en/ (accessed 28 March 2022).

Isaeva Olga Sergeevna. Ph.D., senior researcher Department of Applied Informatics Institute of Computational Modeling SB RAS. Research interests: artificial intelligence methods, data analysis, digital twins. SPIN: 8412-5807, ORCID: 0000-0002-5061-6765. Researcher ID: A-8905-2018, isaeva@icm.krasn.ru. Russia, Krasnoyarsk, st. Akademgorodok, d. 50, building 44.

Kulyasov Nikita Vladimirovich. Programmer of the first category at the ICM SB RAS. Research interests: data analytics, information security, distributed computing systems. AuthorID: 884843, SPIN code: 9017-5937, ORCID: 0000-0001-5582-9498, WOS Research ID: ADA-6587-2022, razor@icm.krasn.ru. Russia, Krasnoyarsk, st. Akademgorodok, d. 50, building 44.

Isaev Sergey Vladislavovich. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Basic Department of Computing and Information Technologies of the Siberian Federal University, Head of the Department of Information and Telecommunication Technologies and Deputy Director of the Institute of Computational Modeling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences for scientific work. Research interests: cybersecurity and information protection, Internet technologies, distributed information systems, intelligent systems. SPIN: 1552-8542, AuthorID: 1623, ORCID: 0000-0002-6678-0084, si@icm.krasn.ru. Russia, Krasnoyarsk, st. Akademgorodok, d. 50, building 44.

Статья поступила в редакцию 11.04.2022; одобрена после рецензирования 16.09.2022; принята к публикации 19.09.2022.

The article was submitted 04/11/2022; approved after reviewing 09/16/2022; accepted for publication 09/19/2022.

УДК 381.3.06

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.012

# Применение многоуровневой декомпозиции для создания цифрового двойника сборочного производства электронной аппаратуры

### Курносенко Алексей Евгеньевич, Власов Андрей Игоревич

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва, *akurn@bmstu.ru* 

Аннотация. В работе представлен подход к созданию цифрового двойника производства электронной аппаратуры на печатных платах. Применена двухуровневая декомпозиция производственного процесса на операции, технологические переходы и далее на функциональные узлы применяемого технологического оборудования и оснащения для автоматизированных и ручных операций сборки. Рассмотрено моделирование ручных операций сборки, представлена комплексная цифровая модель рабочего места установки компонентов с использованием антропоморфного манекена операторамонтажника. Использовано программное обеспечение Теспотатіх компании Siemens DI. На примере разработанной цифровой модели производства с участием типового изделия рассмотрен ряд сценариев организации рабочего места и производственного участка в целом, выполнено дискретное имитационное моделирование, проанализированы основные результаты применительно к производительности спроектированного участка. Выполнена модернизация цифровой модели в целях увеличения загрузки технологического оборудования и повышения суммарной производительности участка сборки.

**Ключевые слова:** технологическая подготовка производства, цифровое производство, цифровой двойник, автоматизация производства, производство электронных модулей, дискретное имитационное моделирование

**Цитирование:** Курносенко А.Е. Применение многоуровневой декомпозиции для создания цифрового двойника сборочного производства электронной аппаратуры / А.Е. Курносенко, А.И. Власов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. -2022. -№ 3(27). - C. 126-134. - DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.012.

Введение. Цифровизация производства электронной аппаратуры, выполняемая в рамках концепции «Индустрия 4.0» и киберфизических систем, предполагает комплексный подход к цифровой трансформации, учитывающий широкий спектр решаемых задач [1-6] и необходимость эффективной работы с большими данными [7-9]. Прежде всего, это подразумевает целостность и неразрывную связь цифровых моделей выпускаемых изделий, технологических процессов, оборудования, оснащения, материально-логистических потоков и рабочего персонала. Эти модели должны описываться в едином информационном пространстве с возможностью перекрестного обмена данными на входах и выходах, образуя в совокупности структуру, известную как «цифровой двойник» [10, 11]. В настоящее время среди основных проблем внедрения подобных цифровых двойников можно выделить разобщенность данных об изделии, методах, процессах и оборудовании для его изготовления, сложность формализации задачи моделирования и разбиения ее на иерархические подзадачи, трудность цифровой формализации разнородных технологических операций в рамках единого техпроцесса, применение различных САПР для решения отдельных подзадач, сложность учета человеческого фактора в модели автоматизированного производства [11].

Задача иерархического разбиения или, другими словами, декомпозиции общей задачи создания цифрового двойника представляется особенно важной, так как от ее решения зависит получаемая структура модели данных и ее гибкость. Ошибки при построении иерархии задач могут привести к избыточности и нарушению ассоциативности данных, получению громоздкой модели, сложной с точки зрения использования и интерпретации информации. В данной работе мы рассмотрим указанную задачу на характерном для электронной отрасли примере моделирования и подготовки производства электронных модулей I уровня на печатных платах. Следует отметить, что рассматриваемый подход можно применять и для бо-

лее сложных производственных процессов — для отрасли производства электроники примером может выступить, например, производство электронных модулей по технологии трехмерных литых монтажных оснований (3DMID) [6, 12]. Структурно работа предусматривает декомпозицию задачи на уровни, создание моделей технологического оборудования и рабочих мест в составе производственного участка, проведение исследований методом дискретного имитационного моделирования, с анализом результатов и рассмотрением различных вариантов построения производственного участка.

1. Анализ литературных источников. При решении задачи моделирования цифровых производств электронной аппаратуры преимущество отдается методам дискретного имитационного моделирования по сравнению с аналитическими методами [10, 11]. Первая группа методов лучше отвечает дискретному характеру сборочного производства, основанному на последовательности событий, а также позволяет лучше отразить статистический характер внешних воздействий и внутренних отказов производственной системы [12].

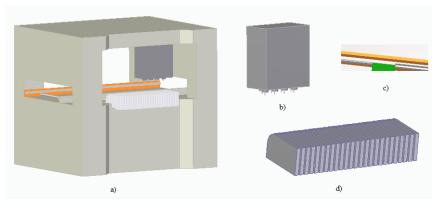
Чтобы эффективно поддерживать единое информационное пространство цифровых моделей, с точки зрения методов программной реализации указанных методов преимущество имеет конструкторская САПР и система подготовки и моделирования производства, преимущественно от одного поставщика программных решений. Обзор рынка таких систем представлен, например, в [13]. Конструкторская САПР в этом случае выполняет функции создания моделей изделия и отдельных узлов технологического оборудования и оснащения, а система подготовки производства отвечает непосредственно за создание цифрового двойника и имитационное моделирование производственных процессов. Преимуществом такого состава сред проектирования является не требующий дополнительных преобразований информации переход от конструкторской к имитационной модели. Среди примеров таких связок – продукты SolidWorks/CATIA и DELMIA от компании Dassault Systemes, а также Solid Edge/NX и Tecnomatix от компании Siemens DI. Немаловажно, что оба решения в области подготовки и моделирования производства способны функционировать под управлением систем поддержки жизненного цикла изделий (соответственно ENOVIA и Teamcenter), которые облегчают поддержку целостности и связности различных моделей в составе цифрового двойника.

Подобные системы автоматизированной подготовки производства решают широкий набор задач, начиная от разработки маршрутного и операционного техпроцессов, компоновки производственного участка и задания материально-логистических потоков до непосредственного имитационного моделирования работы участка/цеха с визуализацией результатов в различной форме и подготовки управляющих программ для автоматизированного технологического оборудования [14-16]. В данной работе использована связка САПР Solid Edge и системы подготовки производства Теспотаtiх.

2. Описание методов и средств создания цифровых двойников. Для решения задачи создания цифрового двойника была реализована декомпозиция производственных объектов на двух уровнях иерархии. Первый, верхний уровень декомпозиции представляет собой разбиение технологического процесса сборки на отдельные операции с последующей классификацией этих операций, как выполняемых полностью на автоматизированном оборудовании, так и вручную с возможным применением средств автоматизации. Этот процесс рассмотрен в [11, 13]. Далее для каждой классифицированной операции осуществляется декомпозиция на втором, нижнем уровне, на отдельные технологические переходы. Она сопровождается декомпозицией технологического оборудования и оснащения на отдельные функциональные узлы, выполняющие переход или группу переходов.

Подробнее остановимся на примерах проведенной на втором уровне декомпозиции (рисунки 1 и 2). На рисунке 1 представлена декомпозиция портального автомата установки

компонентов (а) с выделением в качестве отдельных функциональных узлов блока сборочных головок (b), конвейерной системы транспортировки печатных плат (c) и блока ленточных питателей компонентов из катушек (d). Степень детализации отдельных узлов зависит от требований к реалистичности воспроизведения реальной кинематики движущихся механизмов автомата при моделировании процессов захвата компонента из питателя, проноса его над камерами системы технического зрения и установки в требуемую позицию на печатной плате.



**Рис. 1.** Декомпозиция автомата установки компонентов: а – общий вид автомата; b – блок сборочных головок; с – конвейерная система; d – блок ленточных питателей

На рисунке 2 представлена декомпозиция рабочего места, оснащенного системой ручной установки компонентов (а). Система была декомпозирована на отдельные функциональные узлы, в числе которых рабочий стол для фиксации печатной платы (b), блок ленточных питателей компонентов из катушек (c), карусельный питатель компонентов из россыпи (d), блок питателей компонентов из обрезков лент (e), а также дозатор паяльной пасты с вакуумным пинцетом для установки компонентов (f).

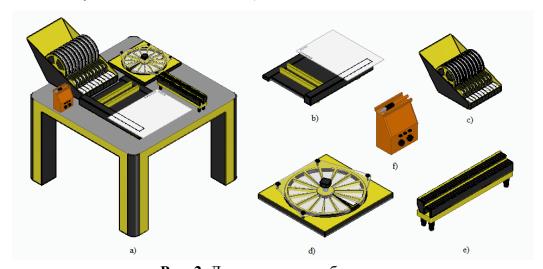


Рис. 2. Декомпозиция рабочего места,

оснащенного системой ручной установки компонентов:

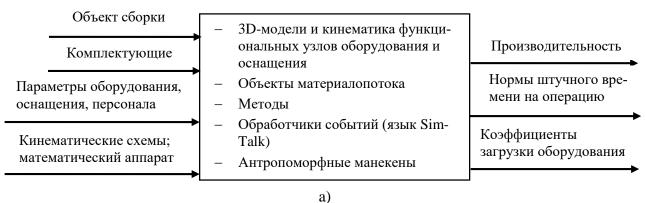
- а общий вид рабочего места; b рабочий стол; с блок ленточных питателей;
  - d карусельный питатель из россыпи; е блок питателей из обрезков лент;

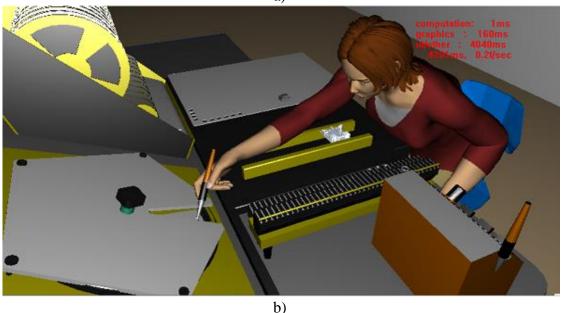
f – дозатор паяльной пасты с вакуумным пинцетом

Такое построение облегчает последующее формирование цифровых моделей технологических переходов вида «взять вакуумный пинцет», «захватить компонент из питателя вакуумным пинцетом», «установить компонент на поверхность печатной платы» и пр. Декомпозированное таким образом рабочее место интегрируется в цифровую модель операции

ручной установки компонентов, которая, в свою очередь, создается с участием цифровых моделей персонала — монтажников в виде антропоморфных цифровых манекенов. Данный механизм реализуется при помощи модуля Jack/Simulate Human из состава системы Теспотаtix, который можно применять, в частности, и для моделирования роботизированных операций [18, 19].

Созданная для указанной операции модель приведена на рисунке 3. Построение таких комплексных моделей, включающих в себя и компоненты технологического оснащения, и рабочий персонал, позволяют оценить, в частности, принципиальную реализуемость операции с точки зрения физической достижимости отдельных узлов и механизмов оператором, выполнить оценку производительности с учетом человеческого фактора — ошибок, накопленной усталости и т.д., а также модифицировать компоновку рабочего места с целью достижения комфортных условий работы оператора и повышения производительности операции.





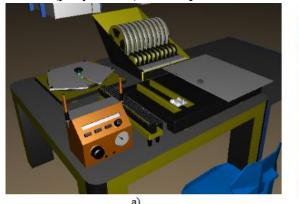
**Рис. 3.** Комплексная цифровая модель рабочего места установки компонентов с антропоморфным манекеном оператора-монтажника:

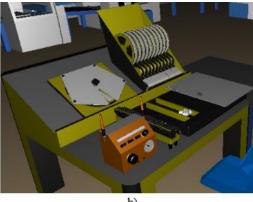
a — входные/выходные данные и состав модели; b — внешний вид модели в САПР Для созданной таким образом цифровой модели сборочного производства выполнялся ряд экспериментов вида «что, если» с различным составом, компоновкой и количеством автоматизированных и ручных рабочих мест.

**3. Обсуждение результатов.** Преимуществом подхода с декомпозицией задачи является, в частности, возможность получения результатов на различных иерархических уровнях. Результаты для отдельных автоматизированных операций подробно представлены в [13]. В

данной работе мы остановимся на некоторых результатах, полученных на цифровых моделях ручных операций, а также на технологической линии в целом.

В таблице 1 представлено накопленное время, которое монтажник тратит на то, чтобы последовательно достичь четырех узлов системы установки компонентов при различной компоновке своего рабочего места. В первом варианте в распоряжении оператора имеется плоский стол (рисунок 4a), во втором — стол с подставкой-возвышением (рисунок 4b).





**Рис. 4.** Варианты компоновки рабочего места монтажника: а – плоский стол; b – стол с подставкой-возвышением

**Таблица 1.** Накопленное время достижения узлов в зависимости от варианта компоновки рабочего места, сек.

Название позиции	Вариант рабочего места		
Пазвание позиции	Плоский стол	Стол с подставкой	
Go	1,5	1,0	
Pose	2,5	2,0	
Sit	2,5	2,0	
Get_P	3,5	3,0	
Position_P	4,0	3,3	
Position_P0	4,3	3,6	
Position_P1	4,7	4,4	
Stand	4,7	_	
Position_P2	6,9	5,0	
Position_P3	9,3	5,5	
Position_P4	11,4	6,3	
Position_P5	13,6	_	
Sit0	13,6	_	
Put_P	14,5	7,0	
Stand0	14,5	7,1	
Go0	15,3	7,7	

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о преимуществе второго варианта с подставкой, позволяющего монтажнику избежать вставания со стула (позиция Stand) и одновременно более чем в 2 раза сокращающего затраты времени на операцию.

Далее была промоделирована вся технологическая линия сборки в составе автомата трафаретной печати, автомата установки компонентов, печи пайки оплавлением и рабочих мест ручной установки компонентов в двух вариантах (рисунок 5): с одним рабочим местом с плоским столом (рисунок 5а) и с тремя рабочими местами со столами, оснащенными подставкой (рисунок 5b). Результаты по производительности линий представлены в таблице 2.

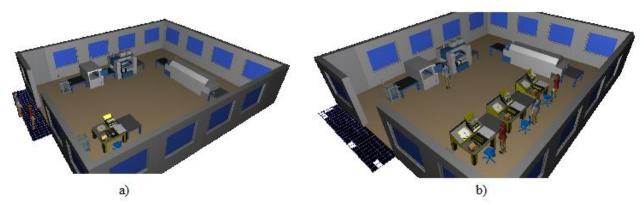


Рис. 5. Варианты компоновки технологической линии сборки: а – с одним рабочим местом ручной установки компонентов с плоским столом; b – с тремя рабочими местами ручной установки компонентов, оснащенными столами с подставкой-возвышением

Таблица 2. Производительность технологических линий сборки

	Вариант комп	поновки линии	
	1 рабочее	3 рабочих	
	место	места	
Среднее штучное время на один модуль, мин	86,5	36,3	
Производительность линии, модулей/ч	9	21	
Загрузка оборудования трафаретной печати, %	3,5	5,1	
Загрузка оборудования установки компонентов, %	35,4	77,4	
Загрузка оборудования пайки оплавлением, %	53,8	93,2	
Загрузка оператора автоматизированного	100,0	89,0	
оборудования, %			
Загрузка монтажников, %	15,0	87,1	

Из результатов очевидно, что вариант с тремя рабочими местами позволяет увеличить производительность линии более чем в два раза. В первом варианте компоновки линии рабочее место ручной установки компонентов является самым узким местом, вследствие чего возникает простой автоматизированного оборудования. Увеличение количества рабочих мест монтажников до трех позволяет сбалансировать работу линии и добиться повышения производительности оборудования и линии в целом.

Заключение. Одним из существенных достоинств цифрового двойника сборочного производства является возможность проигрывать различные сценарии вида «что, если» на каждом из иерархических уровней без затратных натурных экспериментов, связанных с внесением изменений в конфигурацию реальной линии, а также без необходимости проведения тестового запуска самой линии и выполнения техпроцесса сборки физических изделий. Немаловажна также возможность получения не только качественной (пригодно/непригодно), но и количественной оценки описываемых производств — в частности, коэффициента загрузки технологического оборудования, производительности операции установки компонентов с учетом оптимального пути обхода позиций установки [6, 20]. Указанные достоинства эффективно проявляют себя как при создании новых, так и при модернизации существующих производств.

Описанная выше комплексная цифровая модель рабочего места монтажника, декомпозированная на нижнем иерархическом уровне до отдельных узлов, позволяет проработать многочисленные сценарии компоновки, организации и оснащения, что дает возможность спроектировать рабочее место с учетом эргономики и анатомических особенностей человека-оператора и в результате обеспечить повышенную эффективность выполнения технологической операции.

Среди дополнительных областей применения подобных цифровых двойников можно выделить моделирование запуска в производство новых изделий, оптимизацию переналадок технологического оборудования и количества обслуживающего персонала, организацию и оптимизацию логистических потоков комплектующих, материалов, оснащения и готовых изделий с участием автоматизированного склада.

Приведенный подход, основанный на многоуровневой декомпозиции, позволяет сделать цифровую модель компактной, целостной и облегчить ее модификацию путем добавления/исключения/изменения отдельных элементов модели, например, функциональных узлов сборочного оборудования, на необходимых уровнях иерархического разбиения. Подход не привязан к конкретной отрасли и может быть распространен на прочие производственные и иные процессы, допускающие многоуровневую декомпозицию своих составных частей.

**Благодарности.** Отдельные результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту №0705-2020-0041 «Фундаментальные исследования методов цифровой трансформации компонентной базы микро- и наносистем».

#### Список источников

- 1. Akberdina V., Kalinina A., Vlasov A. Transformation stages of the Russian industrial complex in the context of economy digitization. Problems and Perspectives in Management, 2018, no.16(4), pp. 201-211.
- 2. Wang S., Wan J., Li, D. Zhang C., Implementing smart factory of Industry 4.0. Outlook. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016, no. 3159805.
- 3. Vlasov A.I., Shakhnov, V.A.Visual methodology for the multi-factor assessment of industrial digital transformation components. Lecture Notes in Information Systems and Organisation, 2020.
- 4. Breivold H.P., Sandström K. Internet of Things for Industrial Automation Challenges and Technical Solutions. IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems, 2015, pp. 532-539.
- 5. Zhao Q. Presents the Technology, Protocols, and New Innovations in Industrial Internet of Things (IIoT). Internet of Things for Industry 4.0. EAI. Springer Innovations in Communication and Computing, Springer, Cham, 2020.
- 6. Kurnosenko A.E., Arabov D.I. Optimization of electronic components mounting sequence for 3d mid assembly process. Proc. Breakthrough directions of Scientific Research in NRNU MEPhI: Development Perspectives in the Framework of the Strategic. KnE Engineering, 2018, no. 3(6), pp. 311-321.
- 7. Prudius A.A., Karpunin A.A., Vlasov A.I.: Analysis of machine learning methods to improve efficiency of BIG DATA processing in Industry 4.0. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1333(3), no. 032065.
- 8. Vlasov A.I., Muraviev K.A., Prudius A.A., Uzenkov D.A. Load balancing in BIG DATA processing systems. International Review of Automatic Control, 2019, 12(1), pp. 42-47.
- 9. Rygovskiy I.A. Analysis of the effectiveness of methods for processing large data arrays using computing systems. Informatics Problems, 2014, no.2, pp. 54-58.
- 10. Shakhnov V.A., Kurnosenko A.E., Demin A.A., Vlasov A.I. Industry 4.0 visual tools for digital twin system design. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, 1295, pp. 864-875.
- 11. Shakhnov V.A., Kurnosenko A.E. Modelling of the digital electronics manufacturing in the context of Industry 4.0 concept. Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference Digital Transformation of the Industry: Trends, Management, Strategies, 2020, pp. 585-594.
- 12. Franke J. 3D-MID: Three-Dimensional Molded Interconnect Devices. Materials, Manufacturing, Assembly and Applications for Injection Molded Circuit Carriers. Hanser Publications, 2014.
- 13. Kurnosenko A.E, Levin I. V., Semenyakina V. O., Zakharov E. R. Sherstyuk A. E. Simulation Modeling Methods and Tools in the Study of Electronics Preproduction. International Forum "IT-Technologies for Engineering Education: New Trends and Implementing Experience" (ITEE-2019). ITM Web Conf, 2020, vol. 35, N04015.
- 14. Robinson I., Webber J., Eifrem E. Graph Databases, O'Reilly Media, 2013.
- 15. Martijn R.K. MesSimulation Modelling using Practical Examples. A Plant Simulation Tutorial. Software version 13.0 (Netherlands: University of Twente), 2017, pp.20-86.
- 16.Bangsow S. Tecnomatix Plant Simulation: Modeling and Programming by Means of Examples. Springer International Publishing Switzerland, 2016.

- 17. Yudin A.V., Vlasov A.I., Salmina M., Sukhotskiy V. Challenging intensive project-based education: short-term class on mobile robotics with mechatronic elements. Adv. Intel. Sys. Comp, 2019, vol. 829, pp. 79-84.
- 18. Yudin A., Kolesnikov M., Vlasov A., Salmina M. Project oriented approach in educational robotics: From robotic competition to practical appliance. Adv. Intel. Sys. Comp, 2017, vol. 457, pp. 83-94.
- 19. Haller E., Schiller E.F., Hartel I. Impact of the Digital Factory on the Production Planning Process. Integrating Human Aspects in Production Management. IFIP Intl Conf. Inform. Process, 2005, vol. 160, pp. 73-84.
- 20. Ali Fuat Alkaya, Ekrem Duman Application of Sequence-Dependent Traveling Salesman Problem in Printed Circuit Board Assembly. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2013, no. 3(6), pp. 1063-1076.

**Курносенко Алексей Евгеньевич.** Доцент кафедры ИУ-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Основные направления исследований включают в себя ECAD/MCAD-системы в приборостроении, оборудование и технологию производства электронной аппаратуры, технологию 3D-MID. AuthorID: 164230, SPIN-код: 6205-3866, ORCID: 0000-0003-0521-3163, akurn@bmstu.ru, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, кафедра ИУ-4.

Власов Андрей Игоревич. К.т.н., доцент кафедры ИУ-4 МГТУ им. Н.Э. Основные направления исследований включают в себя системный анализ, информационные системы, телекоммуникационные технологии, цифровую обработку сигналов и нейросети. AuthorID: 15646, SPIN-код: 4901-3509, ORCID: 0000-0001-5581-4982, vlasovai@bmstu.ru, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, кафедра ИУ-4.

UDC 381.3.06

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.012

# Using multilevel decomposition to create a digital twin of the electronic equipment assembly production

## Alexey E. Kurnosenko, Andrey I. Vlasov

Bauman Moscow State Technical University, Russia, Moscow, akurn@bmstu.ru

Annotation. The paper presents an approach to creating a digital twin of the PCB electronic equipment production. A two-level decomposition of the production process into operations, steps and further to the functional units of the used technological equipment and tools for automated and manual assembly operations is applied. The modeling of manual assembly operations is considered, a complex digital model of the workplace for component mounting using an anthropomorphic dummy of the assembly operator is presented. Tecnomatix software from Siemens DI was used. On the example of the developed digital production model and the typical product, a number of scenarios for organizing the workplace and the production site as a whole are considered, discrete simulation modeling is performed, and the main results are analyzed in relation to the performance of the designed site. The digital model was modernized in order to increase the loading of process equipment and increase the overall productivity of the assembly site.

**Keywords:** preproduction, digital manufacturing, digital twin, manufacturing automation, electronic module manufacturing, discrete simulation modeling

**Acknowledgements:** Some results were obtained with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for project No. 0705-2020-0041 "Fundamental research of methods for digital transformation of the micro- and nanosystem hardware components".

#### References

- 1. Akberdina V., Kalinina A., Vlasov A. Transformation stages of the Russian industrial complex in the context of economy digitization. Problems and Perspectives in Management, 2018, no.16(4), pp. 201-211.
- 2. Wang S., Wan J., Li, D. Zhang C., Implementing smart factory of Industry 4.0. Outlook. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016, no. 3159805.
- 3. Vlasov A.I., Shakhnov, V.A.Visual methodology for the multi-factor assessment of industrial digital transformation components. Lecture Notes in Information Systems and Organisation, 2020.
- 4. Breivold H.P., Sandström K. Internet of Things for Industrial Automation Challenges and Technical Solutions. IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems, 2015, pp. 532-539.
- 5. Zhao Q. Presents the Technology, Protocols, and New Innovations in Industrial Internet of Things (IIoT). Internet of Things for Industry 4.0. EAI. Springer Innovations in Communication and Computing, Springer, Cham, 2020.
- 6. Kurnosenko A.E., Arabov D.I. Optimization of electronic components mounting sequence for 3d mid assembly

- process. Proc. Breakthrough directions of Scientific Research in NRNU MEPhI: Development Perspectives in the Framework of the Strategic. KnE Engineering, 2018, no. 3(6), pp. 311-321.
- 7. Prudius A.A., Karpunin A.A., Vlasov A.I.: Analysis of machine learning methods to improve efficiency of BIG DATA processing in Industry 4.0. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1333(3), no. 032065.
- 8. Vlasov A.I., Muraviev K.A., Prudius A.A., Uzenkov D.A. Load balancing in BIG DATA processing systems. International Review of Automatic Control, 2019, 12(1), pp. 42-47.
- 9. Rygovskiy I.A. Analysis of the effectiveness of methods for processing large data arrays using computing systems. Informatics Problems, 2014, no.2, pp. 54-58.
- Shakhnov V.A., Kurnosenko A.E., Demin A.A., Vlasov A.I. Industry 4.0 visual tools for digital twin system design. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, 1295, pp. 864-875.
- 11. Shakhnov V.A., Kurnosenko A.E. Modelling of the digital electronics manufacturing in the context of Industry 4.0 concept. Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference Digital Transformation of the Industry: Trends, Management, Strategies, 2020, pp. 585-594.
- 12. Franke J. 3D-MID: Three-Dimensional Molded Interconnect Devices. Materials, Manufacturing, Assembly and Applications for Injection Molded Circuit Carriers. Hanser Publications, 2014.
- 13. Kurnosenko A.E, Levin I. V., Semenyakina V. O., Zakharov E. R. Sherstyuk A. E. Simulation Modeling Methods and Tools in the Study of Electronics Preproduction. International Forum "IT-Technologies for Engineering Education: New Trends and Implementing Experience" (ITEE-2019). ITM Web Conf, 2020, vol. 35, N04015.
- 14. Robinson I., Webber J., Eifrem E. Graph Databases, O'Reilly Media, 2013.
- 15. Martijn R.K. MesSimulation Modelling using Practical Examples. A Plant Simulation Tutorial. Software version 13.0 (Netherlands: University of Twente), 2017, pp. 20-86.
- Bangsow S. Tecnomatix Plant Simulation: Modeling and Programming by Means of Examples. Springer International Publishing Switzerland, 2016.
- 17. Yudin A.V., Vlasov A.I., Salmina M., Sukhotskiy V. Challenging intensive project-based education: short-term class on mobile robotics with mechatronic elements. Adv. Intel. Sys. Comp, 2019, vol. 829, pp. 79-84.
- 18. Yudin A., Kolesnikov M., Vlasov A., Salmina M. Project oriented approach in educational robotics: From robotic competition to practical appliance. Adv. Intel. Sys. Comp, 2017, vol. 457, pp. 83-94.
- 19. Haller E., Schiller E.F., Hartel I. Impact of the Digital Factory on the Production Planning Process. Integrating Human Aspects in Production Management. IFIP Intl Conf. Inform. Process, 2005, vol. 160, pp. 73-84.
- 20. Ali Fuat Alkaya, Ekrem Duman Application of Sequence-Dependent Traveling Salesman Problem in Printed Circuit Board Assembly. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2013, no. 3(6), pp. 1063-1076.

Kurnosenko Alexey Evgenievich. Associate Professor of the Department of IU-4 MSTU. N.E. Bauman. The main areas of research include ECAD / MCAD systems in instrumentation, equipment and technology for the production of electronic equipment, 3D-MID technology. AuthorID: 164230, SPIN: 6205-3866, ORCID: 0000-0003-0521-3163, akurn@bmstu.ru, 105005, Moscow, st. 2nd Baumanskaya, d. 5, building 1, Department of IU-4.

Vlasov Andrey Igorevich. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of IU-4 MSTU. N.E. The main areas of research include systems analysis, information systems, telecommunications technologies, digital signal processing and neural networks. AuthorID: 15646, SPIN: 4901-3509, ORCID: 0000-0001-5581-4982, vlasovai@bmstu.ru, 105005, Moscow, st. 2nd Baumanskaya, d. 5, building 1, Department of IU-4.

Статья поступила в редакцию 05.08.2022; одобрена после рецензирования 06.09.2022; принята к публикации 16.09.2022.

The article was submitted 08/05/2022; approved after reviewing 09/06/2022; accepted for publication 09/16/2022.

УДК 004.94: 504:631.1:045

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.013

# Модуль «Планирование в условиях рисков» программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства»

### Ковалева Евгения Александровна, Иваньо Ярослав Михайлович

Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, Россия, Иркутский район, п. Молодежный, *zhenia-93com@ya.ru* 

Аннотация. Предложено специальное информационное, математическое и алгоритмическое обеспечение для модуля «Планирование в условиях рисков» в составе программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства» АГРЭКО. Описана параметрическая эколого-математическая модель для оптимизации производства аграрной продукции с учетом рисков, связанных с климатическими событиями. С помощью алгоритма выделения аномальных уровней путем построения многоуровневых трендов и стохастического анализа оценены производственные риски в будущем с определением ущербов от потери урожая. Реализованы тестовые задачи на примере сельскохозяйственной организации Иркутской области СХЗАО «Приморский» Нукутского района, деятельность которой подвержена значительному влиянию рисков, связанных с экстремальными климатическими явлениями, прежде всего, засухами. Многоуровневые тренды построены на примере временного ряда урожайности зерновых культур.

**Ключевые слова:** программный комплекс, эколого-математическая модель, оптимизация, аграрная продукция, риски

**Цитирование:** Ковалева Е.А. Модуль «Планирование в условиях рисков» программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства» / Е.А. Ковалева, Я.М. Иваньо // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 3(27). − С. 135-147. − DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.013.

Введение. Эколого-математические модели с критерием оптимальности в виде минимизации ущерба окружающей среде или максимизации доходов с учетом минимизации отрицательного воздействия на природную систему представляют собой научнопрактический интерес в решении задач планирования производства аграрной продукции. На практике апробированы подобные модели c интервальными и вероятностными коэффициентами при неизвестных целевой функции и ограничениях. Вместе с тем сельское хозяйство в значительной степени подвержено воздействию экстремальных климатических явлений, которые увеличивают риски производства сельскохозяйственной продукции. помимо эколого-математических моделей, позволяющих деятельность сельскохозяйственного производителя для некоторых усредненных природноклиматических условий, в работе [1] предлагается модель, учитывающая производство продукции при формировании экстремальных событий.

условиях континентального возрастает резко климата влияние агрометеорологических явлений на производство сельскохозяйственной продукции. В последние годы на урожай сельскохозяйственных культур сильно влияют засушливые условия, которые проявляют себя в увеличении температур и уменьшении осадков в начальный период вегетации. В связи с этим актуальна разработка модуля для решения эколого-математических моделей оптимизации производства сельскохозяйственной продукции в условиях риска с минимизацией ущерба окружающей среде.

Целью статьи является описание модуля «Планирование в условиях рисков» программного комплекса АГРЭКО, который позволяет оптимизировать производство аграрной продукции в условиях климатических рисков с минимальными ущербами водным и земельным ресурсам. Для достижения цели решались следующие задачи:

- 1) рассмотрение математического и алгоритмического обеспечения для минимизации ущербов окружающей среде при производстве аграрной продукции в условиях климатических рисков;
- 2) реализация модели минимизации ущербов окружающей среде при производстве продукции с учетом климатических рисков на реальном объекте с помощью разработанного программного комплекса АГРЭКО.

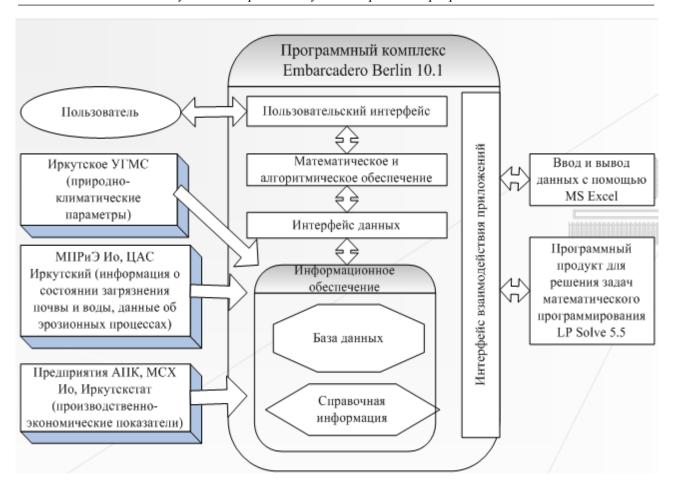
Материалы и методы. При построении и реализации эколого-математических моделей для оптимизации производства сельскохозяйственной продукции с помощью программного использованы следующие данные: комплекса производственноэкономические, природно-климатические и экологические, характеризующие загрязнение и эрозию почвы. К производственно-экономическим показателям относятся: площади сельскохозяйственных угодий, урожайность сельскохозяйственных культур, поголовье и продуктивность животных, затраты на производство по статьям расходов, прибыль с единицы площади и головы, объемы воды для нужд сельского хозяйства. Природноклиматические показатели включают в себя: температуру воздуха, количество осадков, гидрометеорологические явления, характеристики рельефа, качество почвы. Показатели загрязнения и эрозии почв характеризуются фоновым и фактическим содержанием вредных веществ в почве и воде, концентрациями загрязнителей, площадью эрозионных процессов, потерями плодородного слоя.

Источниками информации являются многолетние данные бухгалтерской отчетности сельскохозяйственной организации, сведения регионального управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, материалы государственных докладов «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области», карты состояния почвенного покрова сельскохозяйственных угодий региона, сведения территориального органа Федеральной службы государственной статистики.

Для оценки свойств изменчивости показателей, входящих в эколого-математические модели оптимизации производства аграрной продукции, применены методы теории вероятностей и математической статистики [2-6]. В частности, к ним относятся способы построения законов распределения вероятностей, корреляционно-регрессионный, автокорреляционный анализ, метод статистических испытаний. При определении потерь плодородного слоя почвы использован метод оценки потенциальной опасности эрозии почв под воздействием дождей и расчетная формула интенсивности выноса почвы от ветровой [7-8]. Решение прикладных экстремальных задач основано математического программирования в условиях неопределенности [9-11]. Кроме того, для модуля «Планирование в условиях рисков» использованы методы проектирования программных комплексов [12-14].

Для получения результатов моделирования производства аграрной продукции в условиях рисков использован алгоритм выделения из временного ряда последовательностей разных уровней, построения на их основе трендов с помощью регрессионного анализа и подбора вероятностных законов распределения по эмпирическим данным, характеризующим отклонения уровней исходного ряда от значений тренда нижних уровней [15].

**Результаты работы и их обсуждение.** Авторами статьи в соавторстве создан программный комплекс АГРЭКО — с разработанным специальным математическим, алгоритмическим и информационным обеспечением [16, 17]. Программный комплекс АГРЭКО (рис. 1) решает прикладные задачи на основе информационного, математического, алгоритмического и программного обеспечения.



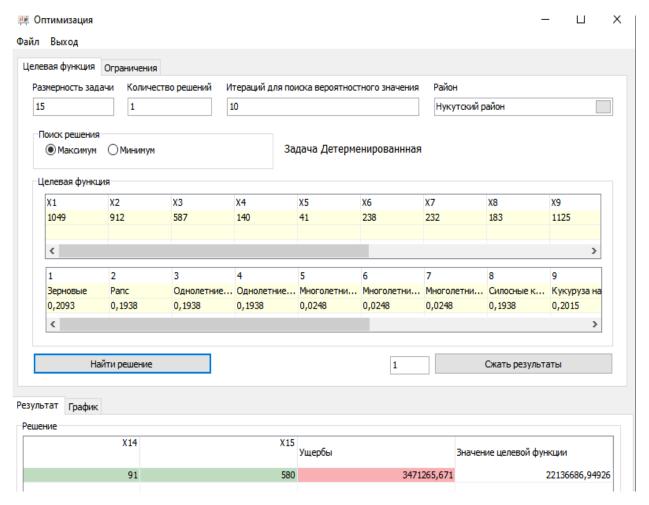
**Рис. 1.** Схема функционирования программного комплекса «Эколого-математическое моделирование аграрного производства» — АГРЭКО

Реализация интерфейса программного комплекса АГРЭКО и методов математической статистики осуществлялась при помощи интегрированной среды разработки Embarcadero Berlin 10.1. Алгоритмическое обеспечение представляет собой разработанные алгоритмы решения эколого-математических задач с использованием имитационного моделирования. Для реализации моделей планирования производства сельскохозяйственной продукции применен программный продукт LP Solve 5.5. Результаты статистической обработки данных, решений задач математического программирования и сведения из базы данных можно сохранять в виде таблиц в приложении MS Excel. Кроме того, с помощью программной среды реализованы различные методы оценки статистических параметров, критерии соответствия аналитических законов распределения вероятностей эмпирическим функциям и другие способы статистической обработки производственно-экономических, природно-климатических и экологических показателей.

На основе выявленных статистических особенностей временных рядов определяются математические модели, которые используются для решения задач оптимизации производства аграрной продукции с учетом ущербов окружающей среде в условиях неопределенности.

На рисунке 2 приведен пример реализации оптимизационной эколого-математической задачи. В верхней части «Целевая функция» значения X1, X2,..., X15 – отображают прибыль, получаемую от продажи 1 ц товарной продукции отрасли растениеводства или животноводства. Ниже приведены расчетные значения коэффициентов негативного воздействия техногенных и природных процессов на почву на богарных и орошаемых землях при возделывании сельскохозяйственных культур — 0,2093, 0,1938, ..., 0,2015. В нижней

части окна «Результат» показан определенный в процессе решения задачи оптимальный план со значениями целевой функции в виде прибыли и ущербов предприятия.



**Рис. 2.** Окно определения оптимального решения задачи эколого-математического моделирования продовольственной продукции с учетом ущербов от негативного влияния на окружающую среду для СХЗАО «Приморский» Нукутского района

С помощью программного комплекса (ПК) АГРЭКО апробированы экологоматематические модели с детерминированными, интервальными и вероятностными коэффициентами при неизвестных целевой функции и ограничений с критерием оптимальности в виде минимизации ущерба окружающей среде или максимизации доходов с учетом минимизации отрицательного воздействия на природную систему. При этом ПК позволяет получать оптимальные решения для разных отраслей сельского хозяйства и их сочетания в условиях орошаемого и неорошаемого земледелия.

Отдельно следует выделить задачи математического программирования, позволяющие оптимизировать производство аграрной продукции в условиях проявления экстремальных гидрометеорологических и биологических событий [1].

Модель описывает сочетания производства растениеводческой и животноводческой продукции на орошаемых и неорошаемых сельскохозяйственных угодьях. В этой модели целевая функция характеризует максимум доходов с учетом ущербов окружающей среде в результате ведения сельского хозяйства в условиях природных рисков. Ограничения описывают наличие земельных и трудовых ресурсов, объемы производства, загрязнение почвы и водной среды, эрозию сельскохозяйственных угодий, сочетание растениеводческой

и животноводческой продукции в условиях проявления сильных засух или ливневых осадков.

В общем виде сформулирована параметрическая задача оптимизации производства аграрной продукции, учитывающая ущерб окружающей среде и риск наступления природного события.

Целевая функция:

$$f = \sum_{i \in I} (1 - l_i) c_i p_i(t) x_i - \sum_{i \in I} (1 - l_i) d_i^F p_i^F \omega_i + \sum_{i \in I} (1 - l_i') c_i' p_i'(t) x_i' - \sum_{i \in I} (1 - l_i') d_i^{'F} p_i^{'F} \omega_i' + \sum_{k \in K} (1 - \alpha_k) c_k r_k(t) y_k - \sum_{k \in K} (1 - \alpha_k) d_k^F r_k^F \omega_k \to \max,$$
(1)

где  $^{C_{i}}$ ,  $^{C'_{i}}$ - прибыль, получаемая от продажи 1 ц товарной продукции культуры вида i при богарном и орошаемом земледелии;  $^{\it C_k}$  - прибыль, получаемая от продажи 1 ц товарной продукции животных вида k ;  $d_i^F$  – потери прибыли от продажи 1 ц товарной продукции культуры вида i при богарном и орошаемом земледелии, связанные с влиянием климатического события;  $d_k^F$  – потери прибыли от продажи 1 ц товарной продукции животных вида k , связанные с влиянием климатического события;  $p_i(t)$  ,  $p_i'(t)$  \_ урожайность при богарном и орошаемом земледелии і-вида сельскохозяйственной культуры зависимая от параметра  $t; x_i, x_i'$  – площади богарных и орошаемых земель;  $\omega_i, \omega_i'$  – площади богарных и орошаемых земель, подвергшиеся влиянию климатического события;  $p_i^F$  ,  $p_i^{'F}$  потери урожайности на богарных и орошаемых землях і-вида сельскохозяйственной культуры под влиянием климатического события;  $r_k(t)$  – продуктивность животных k, связанная с параметром t;  $r_k^F$  — продуктивность животных k с учетом влияния климатического события;  $l_i, l_i'$  – коэффициенты негативного воздействия техногенных и природных процессов на почву на богарных и орошаемых землях при возделывании культуры  $i; \alpha_k$  – коэффициент негативного воздействия на окружающую среду при выращивании животных k;  $y_k$  – количество животных;  $\omega_k$  – количество животных, подвергшихся влиянию климатического события; F – вероятность события; I, K – число видов сельскохозяйственных культур и животных. Параметр t изменяется в интервале  $[\tau_1, \tau_2].$ 

Ограничения по минимальному объему производства товарной растениеводческой продукции на предприятии выглядят так:

$$\sum_{i \in I} (1 - l_i) p_i(t) x_i + \sum_{i \in I} (1 - l_i') p_i'(t) x_i' - \sum_{i \in I} (1 - l_i) p_i^F \omega_i - \sum_{i \in I} (1 - l_i') p_i^{F} \omega_i' \ge S_i - Z_i^F - Z_i^{F},$$
(2)

где  $S_i$  — минимальный объем производства растениеводческой продукции;  $Z_i^F$ ,  $Z_i^{\prime F}$  — слагаемые уменьшения минимального объема производства растениеводческой продукции в условиях влияния климатического события на богарных и орошаемых землях.

Ограничения по минимальному объему производства животноводческой продукции имеют вид:

$$\sum_{k \in K} (1 - \alpha_k) \, r_k(t) \, y_k - \sum_{k \in K} (1 - \alpha_k) \, r_k^F \, \omega_k \ge S_k - Z_k^F, \tag{3}$$

где  $S_k$  — минимальный объем производства животноводческой продукции;  $Z_k^F$  — слагаемое уменьшения минимального объема производства животноводческой продукции в условиях влияния климатического события.

Ограничения по увязке производства растениеводческой продукции и потребности в ней животноводства записываются так:

$$\sum_{k \in K} h_{ik} y_k \ge S_i \ (i \in I), \tag{4}$$

где  $h_{ik}$  – потребность животных вида k в корме с использованием культуры i.

Ограничения по наличию трудовых ресурсов имеют вид:

$$\sum_{i \in I} b_i x_i + \sum_{i \in I} b_i' x_i' + \sum_{k \in K} b_k y_k + \sum_{i \in I} b_i^F \omega_i + \sum_{i \in I} b_i^F \omega_i' + \sum_{k \in K} b_k^F \omega_k \le B,$$
(5)

где  $b_i$ ,  $b_i'$  — затраты трудовых ресурсов на обработку 1 га богарных и орошаемых земель соответственно;  $b_i^F$  и  $b_i'^F$  — дополнительные затраты трудовых ресурсов на обработку 1 га богарных и орошаемых земель с учетом влияния климатического события;  $b_k$ ,  $b_k^F$  — затраты трудовых ресурсов для ухода за животными без учета и с учетом влияния климатического события; B — имеющиеся трудовые ресурсы.

Условия по предельно допустимой концентрации (ПДК) некоторых вредных веществ в почве выглядят так:

$$\sum_{i \in I} \varphi_{ij}(x_i + \omega_i) + \sum_{i \in I} \varphi'_{ij}(x_i' + \omega_i') + \sum_{i \in I} v_{ij}(x_i + \omega_i) + \sum_{i \in I} v'_{ij}(x_i' + \omega_i') \le \Omega_j \quad (j \in J),$$
(6)

где  $\varphi_{ij}$ ,  $\varphi'_{ij}$  исходная концентрация вредного вещества j на богарных и орошаемых землях, соответственно;  $v_{ij}, v'_{ij}$  — концентрация вредного вещества j, попавшего на богарные и орошаемые земли;  $\Omega_j$  — величина предельно допустимой концентрации вредного вещества j в почве; J — количество вредных веществ. Показатели  $\varphi_{ij}$ ,  $\varphi'_{ij}$ ,  $v_{ij}$  и  $v'_{ij}$  являются приведенными к единице площади сельскохозяйственных угодий.

Ограничения на водозабор в реке имеют вид

$$\sum_{i \in I} q_i x'_i \le T' \xi,\tag{7}$$

где  $q_i$  — оросительная норма культуры  $i;\ T'$  — вегетационный период;  $\xi$  — расход воды реки.

Условие по предельно допустимой концентрации некоторых вредных веществ в реке записывается в виде:

$$\psi_{j}T'\xi + \mu_{j}\sum_{i \in I}[(q_{i} + \lambda)(x'_{i} + \omega_{i}) + \lambda(x_{i} + \omega_{i})] \leq W_{j} \quad (j \in J)$$
(8)

где  $\Psi_j$  – исходная концентрация вредного вещества j в реке;  $\mu_j$  – концентрация вредного вещества j в единице объема возвратных вод хозяйства;  $\lambda$  – осадки, выпадающие за вегетационный период;  $W_j$  0 заданные величины предельно допустимой концентрации вредного вещества j в реке.

Ограничение на почвенные потери от водной и ветровой эрозии имеет вид

$$\sum_{i \in I} RU_i D_i V_i C_i P_i(x_i + \omega_i) + \sum_{i \in I} RU_i D_i V_i C_i P_i(x_i' + \omega_i') + \sum_{i \in I} M_i T \le \eta,$$

$$\tag{9}$$

где  $\eta_i$  — максимальные годовые почвенные потери (т/га); R — эродирующая способность дождей;  $U_i$  — фактор податливости почв эрозии (т/га);  $D_i$  — фактор длины склона;  $V_i$  — «Information and mathematical technologies in science and management» 2022 № 3 (27)

фактор крутизны склона;  $C_i$  — фактор растительности и севооборота;  $P_i$  — фактор эффективности противоэрозионных мероприятий;  $M_i$  — интенсивность выноса почвы, т/га в 1 час, T — время, в течение которого почва разрушается (в часах). Для расчета параметров, входящих в ограничение (9,) используются нормативные методики.

Условие неотрицательности переменных:

$$x_i, x_i', \omega_i, \omega_i', y_k, \omega_k \ge 0.$$
 (10)

Функции  $p_i(t)$ ,  $p_i'(t)$  могут быть описаны в виде линейных и нелинейных выражений. Согласно [16], наиболее приемлемыми для описания урожайности сельскохозяйственных культур для Иркутской области являются логистическая, асимптотическая и степенная функции:

$$p_i(t) = \frac{p_i^{\text{max}}}{(1 + e^{-\beta_i t})},$$
 (11)

$$p_{i}(t) = p_{i}^{\max} - (p_{i}^{\max} - p_{i}^{\min})e^{-\beta_{i}t},$$
(12)

$$p_i(t) = p_i^0 t^{\beta_i} \,, \tag{13}$$

где  $p_i^{\max} p_i^{\min}$  — верхняя и нижняя оценки урожайности культуры  $i; \beta_i$  — коэффициенты, характеризующие степень роста показателя;  $p_i^0$  — значение функции при t=1.

Особенностью предложенной эколого-математической модели оптимизации производства аграрной продукции (1)-(13) является оценка ущербов от негативного влияния техногенных и природных факторов в условиях природных рисков, а также применение задачи параметрического программирования в условиях неопределенности. Ущербы окружающей среде включены в качестве коэффициентов негативного влияния в критерий оптимальности и ограничения по установленным объемам производства аграрной продукции. В статье [18] приведена схема последовательных операций по определению коэффициента негативного влияния природных и техногенных факторов на почву и водную среду.

Алгоритм реализации приведенной модели заключается в выполнении следующих операций. Во-первых, на основе исходных данных разных источников определяются коэффициенты при неизвестных и правые части. Во-вторых, вычисляются коэффициенты негативного влияния на окружающую среду. В-третьих, находятся значимые многоуровневые тренды, согласно которым выделяются и оцениваются вероятностные значения событий, влияющих на производство продукции. В-четвертых, с помощью разработанного программного комплекса АГРЭКО решается задача параметрического программирования. В-пятых, модель реализуется для разных ситуаций, связанных с повторяемостью и значением экстремального события, с использованием метода Монте-Карло.

Решение экстремальной задачи оптимизации производства аграрной продукции на богарных и орошаемых землях при сочетании отраслей растениеводства и животноводства в условиях формирования экстремальных событий с помощью программного комплекса АГРЭКО требует разработки дополнительного модуля, позволяющего выполнять следующие функции:

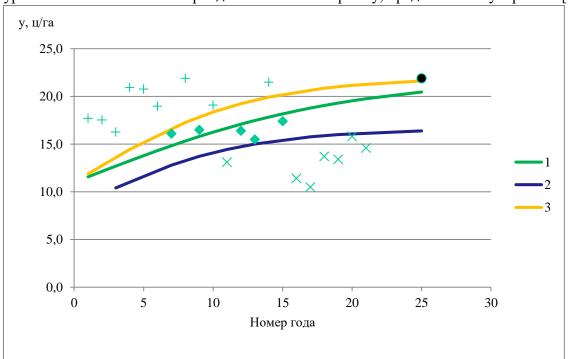
- 1) выделять события разными способами в зависимости от особенностей временного ряда;
- 2) оценивать их вероятности появления;

3) решать задачи оптимизации производства аграрной продукции с учетом минимизации ущерба окружающей среде в условиях проявления экстремальных событий.

Первая функция связана с особенностью временного ряда. Если обосновано, что он является случайным, то оценить вероятность события можно с помощью закона распределения вероятностей. Возможен другой вариант, когда ряд может быть описан значимым трендом или авторегрессионным выражением. В такой ситуации применимы многоуровневые динамико-стохастические модели, позволяющие определять тенденции производственно-экономических, природно-климатических и экологических показателей, а также выделять экстремальные события или аномальные уровни для их вероятностной опенки.

В работе [15] описан алгоритм выделения аномальных уровней временных рядов, характеризуемых значимыми трендами. К таким рядам относятся урожайности сельскохозяйственных культур, для которых приведены результаты моделирования. Идея разделения значений многолетних рядов на последовательности с разными уровнями, принадлежащая И.П. Дружинину с соавторами [19], использована для оценки динамики трех последовательностей – всех уровней, нижних и верхних значений.

На рис. 3 показан пример получения аномальных уровней с использованием многоуровневых логистических трендов согласно алгоритму, предложенному в работе [15]:



**Рис. 3.** Выделение аномальных значений (событий) по многоуровневым трендам логистической функции всего ряда (1), последовательностей нижних (2) и верхних уровней (3) для урожайности зерновых культур в Нукутском районе по данным 2000-2020 гг.:

- × аномальные значения, соответствующие высоким рискам;
- + аномальное значение, связанное с благоприятными условиями;
  - – планируемый уровень насыщения

Аномальные уровни или события, связанные с неблагоприятными условиями, характеризуют ситуации деятельности сельскохозяйственного товаропроизводителя в условиях рисков.

На рисунке 4 изображен закон распределения вероятностей с оценкой выделенных аномальных уровней. Аномальные значения расположились в четверти с отрицательными значениями.

По эмпирическим данным, вероятность появления аномальных уровней колеблется от 0.043 до 0.261, а в соответствии с аналитической функцией распределения Пирсона III типа — в пределах 0.044 - 0.233. Отметим, что в приведенном примере распределение Пирсона III типа лучше согласуется с эмпирическими значениями по сравнению с нормальным законом. Число аномальных уровней, соответствующих высоким рискам, равно 7. Следует иметь в виду, что вид функции влияет на количество выделяемых аномальных уровней (табл. 1).

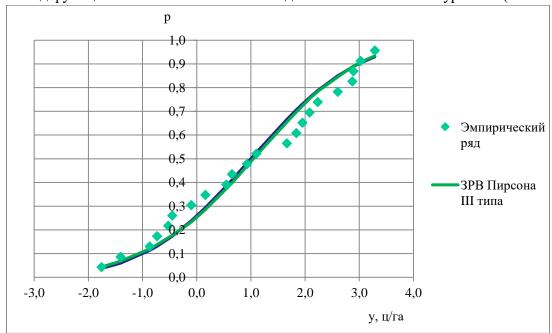


Рис. 4. Функция распределения Пирсона III типа разностей между фактическими значениями ряда и уровнями, полученными по тренду логистической функции последовательности нижних членов для урожайности зерновых культур в Нукутском районе по данным 2000-2020 гг.

**Таблица 1.** Результаты моделирования аномальных уровней для оценки потерь урожайности зерновых по данным Нукутского района за 2000-2020 гг.

Показатель	Год	Логистическая функция	Вероятность
Потери по трендам, ц/га	2024	5,5	
Потери по аномальному уровню, ц/га	2016	8,3	0,044
	2015	7,1	0,068
	2018	5,9	0,120
	2017	5,4	0,138
	2020	5,2	0,167
	2010	3,8	0,177
	2019	3,6	0,233

Потенциальные потери урожайности для зерновых культур составляют 5.5 ц/га. При этом возможны дополнительные ущербы, соответствующие аномальным уровням, вероятность которых предложено оценивать с помощью вероятностного распределения

Пирсона III типа. Самые большие потери приходятся на 2015 и 2016 годы. Предложенный алгоритм позволяет прогнозировать возможные потери.

Общая параметрическая эколого-математическая модель аграрного производства в условиях экстремальных событий с учетом ущербов окружающей среде при сочетании богарного и орошаемого земледелия описывается формулами (1)-(13). Рассмотрим частный случай задачи математического программирования в условиях климатических рисков. В этой задаче учитывалось сочетание производства животноводческой и растениеводческой продукции, влияние эрозии, загрязнения почвы и воды в условиях влияния на деятельность сельскохозяйственного производителя сильных засух при богарном и орошаемом земледелии.

При реализации параметрической эколого-математической модели для СХЗАО «Приморский» Нукутского района в экстремальных условиях многоуровневые тренды построены по временному ряду урожайности зерновых культур.

В качестве неизвестных в задаче оптимизации производства аграрной продукции использованы площади десяти сельскохозяйственных культур. К ним относятся: зерновые  $(x_1)$ , рапс  $(x_2)$ , однолетние травы на сено  $(x_3)$  и зеленый корм  $(x_4)$ , многолетние травы на сено  $(x_5)$ , зеленый корм  $(x_6)$  и семена  $(x_7)$ , силосные культуры  $(x_8)$ , кормовая кукуруза  $(x_9)$ , кукуруза орошаемая  $(x_{10})$ . Кроме того, в моделях использованы пять переменных отрасли животноводства: поголовье коров основного стада  $(x_{11})$ , поголовье коров на откорме  $(x_{12})$ , количество лошадей основного стада  $(x_{13})$ , количество лошадей на откорме  $(x_{14})$  и количество пчелосемей  $(x_{15})$ .

С помощью программного комплекса АГРЭКО в условиях риска были получены следующие результаты (табл. 2).

**Таблица 2.** Значения целевой функции (*f*) в виде прибыли при оптимизации производства аграрной продукции при сочетании орошаемого и богарного земледелия с минимизацией ущербов окружающей среде для СХЗАО «Приморский» в условиях риска, тыс. руб.

Тренд	Год	Значение целевой функции f	Экологические ущербы	
Средний уровень тренда	2024	24244,6	3814,6	
Нижний уровень тренда	2024	21559,9	3350,8	
Средний уровень тренда	2020	23767,5	3812,8	
Нижний уровень тренда	2020	21409,2	3319,2	
Нижний уровень тренда	2016	21147,2	3264,4	
Аномальное значение		19304,0	3755,5	

Согласно полученным результатам, в 2024 году прибыль по нижнему уровню составит 21,6, по среднему уровню — 24,2 млн руб. В 2020 году эти значения соответствовали 21,4 и 23,8 млн руб.. Для аномального уровня урожайности зерновых (ситуация 2016 года) прибыль составит 19,3 млн руб. В этом случае потери прибыли с учетом экологических потерь относительно нижнего уровня составили 2,3 млн руб.

Оптимальный план с учетом влияния засухи на производство продукции отличается от аналога, полученного по тренду среднего уровня. Для 2020 года: в неблагоприятной ситуации уменьшение площади зерновых культур составило 3589 га (67%), однолетних трав на зеленый корм — 4439 га (50%), а площади силосных культур сократились до 0 (100%). Количество коров основного стада уменьшилось до 3744 голов (сокращение на 24%). При этом увеличились площади однолетних трав на сено до 13180 га (в 4 раза), кукурузы — на силос — до 1130 га (на 125%), а также поголовье коров на откорме — до 1846 голов (на 85%).

Задача решена с помощью модуля «Планирование в условиях рисков» программного комплекса АГРЭКО – «Эколого-математическое моделирование аграрного производства». С использованием пункта меню «Регрессия» построены многоуровневые тренды. Тренды можно получить в виде значений функций и графиков. Аномальные уровни или события определены благодаря пункту меню «Статистические показатели». Задача математического программирования решена с помощью пункта меню «Оптимизация». При этом расширены возможности для решения задачи параметрического программирования вводом функции выбора в ограничениях вида тренда и его значений.

**Заключение.** Предложено математическое, алгоритмическое и информационное обеспечение для модуля «Планирование в условиях рисков» программного комплекса АГРЭКО – «Эколого-математическое моделирование аграрного производства».

Рассмотрена модель оптимизации производства аграрной продукции на богарных и орошаемых землях при сочетании отраслей растениеводства и животноводства в условиях формирования сильных засух, реализованная в тестовом режиме на примере сельскохозяйственной организации СХЗАО «Приморский» Иркутской области.

## Список литературы

- 1. Ivanyo Y.M., Petrova S.A., Kovaleva E.A. Ecological-Mathematical modeling in planning production of agricultural products in conditions of risks. IOP Conference series:earth and environmental science, virtual, online, 10–12 января 2022 года, Virtual, Online, 2022, p. 022083, DOI 10.1088/1755-1315/988/2/022083, EDN GUYDCD.
- 2. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсон: пер. с англ. М.: Мир, 1976. –356 с.
- 3. Гриневич Г.А., Композитное моделирование гидрографов / Г.А. Гриневич, Н.А. Петелина, А.Г. Гриневич. М.: Наука, 1972. 182 с.
- 4. Статистическое моделирование и прогнозирование / под. ред. А.Г. Гранберга. –М.: Финансы и статистика, 1990. –383 с.
- 5. Хастингс Н. Справочник по статистическим распределениям / Н. Хастингс, Дж. Пикок. –М.: Статистика, 1980. –95 с.
- 6. Юзбасиев М.М. Статистический анализ тенденций и колеблемости / М.М. Юзбасиев, А.М. Манелл. –М.: Финансы и статистика, 1998. –207 с.
- 7. ГОСТ 17.4.4.03-86. Метод определения потенциальной опасности эрозии под воздействием дождей : издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета. СССР по стандартам от 10 ноября 1986 г. № 3401 : дата введения 1987-07-01 / разработан Государственным агропромышленным комитетом СССР. Москва: Стандартинформ, 1986. 8 с.
- 8. Волков С.Н. Землеустройство. Т. 2. Землеустроительное проектирование. Внутрихозяйственное землеустройство / С.Н. Волков. –М.: Колос, 2001. –648 с.
- 9. Кирилюк, В.С. Меры риска в задачах стохастической оптимизации для получения робастных решений / В.С. Кирилюк // Стохастическое программирование и его приложения. 2012. С. 104—124.
- 10. Кнопов П.С. Метод эмпирических средних в задачах стохастической оптимизации и оценивания / П.С. Кнопов // Стохастическое программирование и его приложения. -2012.-C.12-149.
- 11. Кузьменко В.Н. Решение двухэтапных задач стохастического программирования большой размерности PNK-методом / В.Н. Кузьменко // Стохастическое программирование и его приложения. 2012. —С. 150—159.
- 12. Гагарина Л. Г. Разработка и эксплуатация автоматизированных информационных систем / Л.Г. Гагарина. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2013. –384 с.
- 13. Липаев В.В. Программная инженерия. Методологические основы / В.В. Липаев. -М.: ТЕИС, 2006. 608 с.
- 14. Проектирование экономических информационных систем / под. ред. Ю.Ф. Тельнова. –М.: Финансы и статистика, 2003. –512с.
- 15. Иваньо Я.М. Об одном алгоритме выделения аномальных уровней временного ряда для оценки рисков / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова // Актуальные вопросы аграрной науки, 2022. №42 С. 48—57.
- 16. Ковалева Е.А., Программный комплекс для эколого-математического моделирования производства сельскохозяйственной продукции / Е.А. Ковалева, Я.М. Иваньо // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2020. № 2(18). С. 94—106. DOI 10.38028/ESI.2020.18.2.008

- 17. Иваньо Я.М. Программный комплекс моделирования природных и техногенных рисков / Я.М. Иваньо, С.А. Петрова // Известия Иркутской государственной экономической академии, 2015. Т. 25 №3 С. 533–541. DOI: 10.17150/1993-3541.2015.25(3).533-541.
- 18. Ковалева Е.А. Коэффициенты негативного влияния на окружающую среду в эколого-математическом моделировании аграрного производства / Я.М. Иваньо, Е.А. Ковалева // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК: материалы науч.-практ. конф. молодых ученых (20 мая 2020 г.). − Иркутск: Изд-во ИрГАУ, 2020. − С. 153–160.
- 19. Дружинин И.П. Динамика многолетних колебаний речного стока. / И.П. Дружинин., В.Р. Смага, А.Н. Шевнин. М.: Наука, 1991. 176 с.

**Ковалева Евгения Александровна.** Аспирант заочного обучения, SPIN-код: 2446-8670, zhenia-93com@ya.ru, Россия, Иркутский район, п. Молодежный.

**Иваньо Ярослав Михайлович.** Д.т.н., профессор, SPIN-код: 9654-8057, AuthorID: 106394, iymex@rambler.ru, Россия, Иркутский район, п. Молодежный.

UDC 004.94: 504:631.1:045

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.013

# Module "Planning under risks" of the software package "Ecological and mathematical modeling of agricultural production"

## Eugenia A. Kovaleva, Yaroslav M. Ivanyo

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky,

Irkutsk district, Molodezhny, zhenia-93com@ya.ru

Abstract. On the basis of the created software package, special information, mathematical and algorithmic support is proposed for the module "Planning under risk conditions" of the software package "Ecological and mathematical modeling of agricultural production". A parametric ecological and mathematical model for optimizing the production of agricultural products, taking into account the risks associated with climatic events, is described. With the help of an algorithm for identifying abnormal levels by constructing multilevel trends and stochastic analysis, production risks in the future are estimated with the determination of damages from crop loss. The test tasks were implemented on the example of the agricultural organization of the Irkutsk region of the Primorsky Agricultural District of the Nukutsky district, whose activities are significantly affected by the risks associated with extreme climatic events, primarily droughts. Multilevel trends are based on the example of a time series of grain yields.

**Keywords:** software package, ecological and mathematical model, optimization, agricultural products, risks

#### References

- Ivanyo Y.M., Petrova S.A., Kovaleva E.A. Ecological-Mathematical modeling in planning production of agricultural products in conditions of risks. IOP Conference series:earth and environmental science, virtual, online, 10–12 января 2022 года, Virtual, Online, 2022, p. 022083, DOI 10.1088/1755-1315/988/2/022083, EDN GUYDCD.
- 2. Anderson T. Statisticheskij analiz vremennyh ryadov [Statistical analysis of time series]: per. s angl. M., Mir [World], 1976, p.356.
- 3. Grinevich G.A., Petelina N.A., Grinevich A.G. Kompozitnoe modelirovanie gidrografov [Composite modeling of hydrographs]. M., Nauka [The science], 1972, p.182.
- 4. Statisticheskoe modelirovanie i prognozirovanie [Statistical modeling and forecasting]. pod. red. A.G. Granberga, M., Finansy i statistika [Finance and statistics], 1990, p.383.
- 5. Hastings N., Pikok Dzh. Spravochnik po statisticheskim raspredeleniyam [Handbook of statistical distributions]. M., Statistika [Statistics], 1980, p. 95.
- 6. Yuzbasiev M.M., Manell A.M. Statisticheskij analiz tendencij i koleblemosti [Statistical analysis of trends and fluctuations]. M., Finansy i statistika [Finance and statistics], 1998, p. 207.
- 7. GOST 17.4.4.03-86. Metod opredeleniya potencial'noj opasnosti erozii pod vozdejstviem dozhdej [Method for determining the potential hazard of erosion from rainfall]. Moscow, Standartinform Publ., 1986, p. 8.

- 8. Volkov S.N. Zemleustrojstvo. Vol. 2. Zemleustroitel'noe proektirovanie. Vnutrihozyajstvennoe zemleustrojstvo [Land management. Vol. 2. Land management design. On-farm land management]. M., Kolos [Ear], 2001. p. 648
- 9. Kirilyuk V.S. Mery riska v zadachah stohasticheskoj optimizacii dlya polucheniya robastnyh reshenij [Risk measures in stochastic optimization problems for obtaining robust solutions]. Stokhasticheskoye programmirovaniye i yego prilozheniya [Stochastic programming and its applications], 2012, pp. 104–124.
- 10. Knopov P.S. Metod empiricheskih srednih v zadachah stohasticheskoj optimizacii i ocenivaniya [The method of empirical averages in stochastic optimization and estimation problems]. Stokhasticheskoye programmirovaniye i yego prilozheniya [Stochastic programming and its applications], 2012, pp. 125–149.
- 11. Kuz'menko V.N. Reshenie dvuhetapnyh zadach stohasticheskogo programmirovaniya bol'shoj razmernosti PNK-metodom [Solving two-stage large-dimensional stochastic programming problems using the PNK method]. Stokhasticheskoye programmirovaniye i yego prilozheniya [Stochastic programming and its applications], 2012, pp. 150–159.
- 12. Gagarina L. G. Razrabotka i ekspluataciya avtomatizirovannyh informacionnyh system [Development and operation of automated information systems]. M., FORUM: INFRA-M, 2013, p. 384.
- 13. Lipaev V. V. Programmnaya inzheneriya. Metodologicheskie osnovy [Software engineering. Methodological basis]. M., TEIS, 2006, p. 608.
- 14. Proektirovanie ekonomicheskih informacionnyh system [Design of economic information systems]. pod. red. Yu. F. Tel'nova. M., Finansy i statistika [Finance and statistics], 2003, p. 512.
- 15. Ivan'o Ya.M., Petrova S.A. Ob odnom algoritme vydeleniya anomal'nyh urovnej vremennogo ryada dlya ocenki riskov [On one algorithm for the allocation of anomalous levels of a time series for risk assessment]. Aktual'nyye voprosy agrarnoy nauki [Topical issues of agricultural science], 2022, no. 42, pp. 48–57.
- 16. Kovaleva E.A., Ivan'o Ya.M. Programmnyj kompleks dlya ekologo-matematicheskogo modelirovaniya proizvodstva sel'skohozyajstvennoj produkcii [Software package for ecological and mathematical modeling of agricultural production]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2020, no. 2(18), pp. 94–106., DOI: 10.38028/ESI.2020.18.2.008.
- 17. Ivan'o Ya. M., Petrova S.A. Programmnyj kompleks modelirovaniya prirodnyh i tekhnogennyh riskov [Software package for modeling natural and man-made risks]. Izvestiya Irkutskoy gosudarstvennoy ekonomicheskoy akademii [Proceedings of the Irkutsk State Academy of Economics], 2015, no.25-3, pp. 533–541,DOI: 10.17150/1993-3541.2015.25(3).533-541.
- 18. Ivanyo Ya., Kovaleva E. Koefficienty negativnogo vliyaniya na okruzhayushchuyu sredu v ekologo-matematicheskom modelirovanii agrarnogo proizvodstva [Coefficients of negative influence on the environment in ecological and mathematical modeling of agricultural production]. Nauchnyye issledovaniya i razrabotki k vnedreniyu v APK: materialy nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh (20 maya 2020 g.) [Scientific research and development for implementation in the agro-industrial complex: materials of the scientific and practical conference of young scientists (May 20, 2020)], 2020, pp. 153–160.
- 19. Druzhinin I.P., Smaga V.R., Shevnin A.N. Dinamika mnogoletnih kolebanij rechnogo stoka [Dynamics of long-term fluctuations of river flow]. M., Nauka [The science], 1991, p. 176.

**Kovaleva Evgeniya Aleksandrovna.** Postgraduate student of correspondence studies, SPIN: 2446-8670, zhenia-93com@ya.ru, Irkutsk district, Molodezhny.

Ivanyo Yaroslav Mikhailovich. Doctor of Technical Sciences, Professor, SPIN: 9654-8057, AuthorID: 106394, iymex@rambler.ru, Irkutsk district, Molodezhny.

Статья поступила в редакцию 31.08.2022; одобрена после рецензирования 16.09.2022; принята к публикации 19.09.2022.

The article was submitted 08/31/2022; approved after reviewing 09/16/2022; accepted for publication 09/19/2022.

# Математическое моделирование и его применение

УДК 621.311.001.57

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.014

# Метод динамических расчетов элементов теплоэнергетических установок, сводящий решение систем дифференциальных уравнений в частных производных к решению задач линейного программирования

#### Клер Александр Матвеевич, Апанович Данил Владимирович

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

Россия, Иркутск, dvapan@gmail.com

Аннотация. Расчеты динамических процессов в элементах теплоэнергетических установок (теплообменники, камеры сгорания, турбомашины и др.) необходимы для обоснования допустимых и оптимальных режимов работы, выбора конструктивных характеристик элементов, оценки их надежности и т. д. Эти задачи сводятся к решению систем уравнений в частных производных. В настоящее время для таких расчетов в основном используются метод конечных разностей и метод конечных элементов. Эти методы громоздки и сложны. В статье предлагается метод, основная идея которого заключается в сведении решения указанных систем уравнений к решению задач линейного программирования. Работа метода демонстрируется на примере теплообменника периодического действия.

**Ключевые слова:** численные методы, дифференциальные уравнения в частных производных, линейное программирование, динамические процессы

**Цитирование:** Клер А.М. Метод динамических расчетов элементов теплоэнергетических установок, сводящий решение систем дифференциальных уравнений в частных производных к решению задач линейного программирования / А.М. Клер, Д.В. Апанович // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 3(27). − С. 148-161. − DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.014.

**Введение.** Расчеты стационарных и нестационарных режимов работы ряда элементов теплоэнергетических установок (теплообменников различных типов, топок, камер сгорания, турбинных ступеней и др.) сводятся к решению систем дифференциальных уравнений в частных производных (СДУЧП). Основными методами решения таких систем являются методы конечных разностей (МКР), методы контрольных объемов (МКО) и методы конечных элементов (МКЭ).

При использовании МКР на расчетной области строится сетка и для каждого ее узла, на основе исходных дифференциальных уравнений, формируется подсистема алгебраических уравнений [1-4]. В этих уравнениях частные производные заменяются соответствующими конечными разностями. Подсистемы алгебраических уравнений отдельных узлов сетки объединяются в единую систему алгебраических уравнений, к которой добавляются краевые условия. Следует отметить, что при этом точность решения СДУЧП сильно зависит от величин шагов сетки по пространственным координатам и по времени. Стремление поднять точность решения приводит к сокращению размеров шагов и соответственно к увеличению числа узлов сетки и размерности системы алгебраических уравнений. Во многих случаях эта размерность становится столь большой, что система не может быть решена как единое целое без использования тех или иных методов декомпозиции. Снижения размерности системы можно добиться использованием сетки с переменными шагами, но это сильно усложняет алгоритм решения задачи, что особенно ощутимо для расчетного пространства со сложной геометрией.

МКО применим к задачам, в которых дифференциальные уравнения отражают законы сохранения массы (полной или отдельных химических элементов), энергии и импульса [3-5]. К таким задачам относятся большинство задач тепломассообмена. Поэтому данный метод наиболее широко используется в вычислительной гидрогазодинамике. В соответствии с МКО

расчетная область разбивается на контрольные объемы, для которых допустима неправильная геометрическая форма. Для каждого объема формируются балансовые уравнения, учитывающие обмен данного объема с соседними объемами массой, энергией и импульсом. Эти уравнения являются алгебраическими. В них производные заменяются на конечные разности, определяемые по значениям соответствующих параметров в геометрических центрах смежных контрольных объемов. Кроме того, в уравнения входят площади граничных поверхностей между смежными контрольными объемами, причем балансы массы, энергии и импульса соблюдаются для контрольных объемов вне зависимости от места расположения разделяющих смежные объемы поверхностей. МКО позволяют более точно и более просто, чем МКР, представить сложную расчетную область. К недостаткам как МКР, так и МКО, следует отнести невозможность расчета искомых переменных в точках, не являющихся узлами сетки или центрами контрольных объемов.

МКЭ первоначально предназначались для статических расчетов строительных конструкций [6-8]. Они основаны на разбиении расчетной области на достаточно большое число конечных элементов простой формы, как правило, многогранников. На каждом элементе выделяются узлы. В первую очередь это вершины многогранников, однако, возможен выбор в качестве узлов и других точек. Для каждого элемента для всех искомых из системы дифференциальных уравнений функций ищутся линейные комбинации заранее заданных базисных функций, связывающие пространственные координаты и время с соответствующей искомой переменной. Совокупность таких комбинаций для всех элементов должна отвечать следующим условиям: достигается минимум суммы квадратов невязок для всех узлов всех конечных элементов (невязки получаются при подстановке в производных соответствующих дифференциальные уравнения нужных комбинаций базисных функций); равенство искомых переменных в вершинах смежных элементов при определении их из линейных комбинаций базисных функций этих элементов; равенство расчетных краевых условий при определении их на основе соответствующих линейных комбинаций базисных функций. Следует отметить, что при согласованном подборе числа конечных элементов, числа узлов в элементах и числа базисных функций можно добиться того, что невязки в узлах элементов при соблюдении указанных условий окажутся равными нулю, т.е. минимума достигает сумма квадратов невязок. При этом количество невязок должно быть равно количеству искомых коэффициентов линейных разложений базисных функций. Указанные условия порождают систему алгебраических уравнений, решение которой дает линейные комбинации базисных функций, позволяющие определить искомые переменные в любой точке расчетной области, что является несомненным достоинством МКЭ. Следует отметить, что если исходная СДУЧП линейная, то и системы алгебраических уравнений, к которым сводится приближенное решение СДУЧП, будут линейными.

При решении многих нестационарных задач с использованием МКР, МКО и МКЭ получают системы алгебраических уравнений большой размерности и для их решения используются методы декомпозиции, состоящие, как правило, в разделении решения по пространственным координатам и по времени. Выделяется подсистема уравнений, относящаяся к одному моменту времени. После ее решения находятся частные производные искомых величин по времени. С использованием этих производных определяются значения соответствующих величин в следующий момент времени (на следующем временном слое). При этом используются различные явные и неявные разностные схемы [9].

В рассмотренных методах условием малого отклонения приближенного решения СДУЧП от ее точного решения является малость величин характерных геометрических размеров (шаги сетки, максимальные размеры контрольных объемов и конечных элементов).

Наиболее обоснованным численным критерием такого отклонения (качества приближенного решения) является значение максимальной по модулю невязки во всех рассматриваемых (контрольных) точках расчетной области. Однако ни в одном из рассмотренных методов данный критерий не используется.

С учетом указанных недостатков МКР, МКО и МКЭ предлагается более эффективный метод решения СДУЧП, который впервые был рассмотрен в [10]. В настоящей статье приводится его более подробное изложение. Метод основан на поиске таких значений коэффициентов линейных разложений базисных функций, представляющих зависимости искомых из СДУЧП функций от пространственных координат и времени, при которых минимального значения достигает максимальная по модулю невязка, определяемая среди всех невязок в заданных контрольных точках расчетной области. Переход от минимизации суммы квадратов невязок к минимизации максимальной по модулю невязки значительно улучшает качество приближенного решения и позволяет перейти от малых конечных элементов к достаточно крупным блокам, в пределах каждого из которых ищутся свои линейные разложения базисных функций. В основе метода лежит назначение в пределах расчетной области контрольных точек, в каждой из которых определяются невязки. Важно подчеркнуть, что количество невязок может и должно быть больше, причем существенно, числа коэффициентов линейных разложений базисных функций.

Все контрольные точки расчетной области делятся на три группы. Первая группа – это внутренние контрольные точки блоков. В данных точках рассчитываются только невязки исходных дифференциальных уравнений, получающиеся после подстановки в них искомых функций и их частных производных, определяемых из линейных разложений базисных функций. Вторая группа – это точки, лежащие на границах блоков. В этих точках невязки лифференциальных уравнений рассчитываются для каждого смежного использованием его линейных разложений. Кроме того, определяются невязки между искомыми функциями смежных блоков. К третьей группе относятся контрольные точки, лежащие на границах расчетной области. В этих точках состав невязок дифференциальных уравнений дополняется невязками, определяющими точность приближения полученного решения к начальным и граничным условиям. В частности, определяются невязки между заданными значениями величин на границах расчетной области и рассчитанными из линейных комбинаций базисных функций значениями этих величин.

Если расчетная область делится на подобласти, каждая из которых описывается своей системой дифференциальных уравнений, то на блоки делятся указанные подобласти. В точках, лежащих на границах смежных подобластей, определяются невязки между значениями тех искомых функций, которые входят в системы дифференциальных уравнений обеих подобластей.

Следует отметить, что при минимизации максимальной по модулю невязки приходится сравнивать невязки, имеющие различную размерность и различный физический смысл. Поэтому такое сравнение возможно проводить лишь между относительными невязками, получающимися при делении абсолютных невязок на их максимально допустимые значения (максимально допустимые погрешности расчета соответствующих зависимостей).

Если исходная СДУЧП является линейной, то предлагаемый метод, который можно назвать методом контрольных точек (МКТ), сводится к решению задачи линейного программирования (ЛП) [11, 12]. В противном случае необходимо решать задачу нелинейного математического программирования.

Необходимо указать, что авторы настоящей работы являются специалистами в области математического моделирования и оптимизации теплоэнергетических установок и их элементов. Поэтому задача математически строгого обоснования предлагаемого метода в

данной статье не ставится, также не ставится задача достаточно полного обзора значительного числа методов решения подобных задач и сопоставления их с предлагаемым. Внимание уделяется обоснованию эффективности предлагаемого метода на основе опыта решения сложных задач динамических расчетов элементов энергетических объектов, одна из которых представлена в статье в качестве примера.

**1.** Математическая постановка задачи. Имеется расчетная область Q. Каждая точка этой области определяется N —мерным вектором x. В пространстве N параметров, определяющих область Q, протекает рассчитываемый динамический процесс. Как правило, данные параметры — это пространственные координаты и время.

В некоторых случаях динамические процессы, протекающие в различных частях расчетной области Q, могут описываться различными системами дифференциальных уравнений. В связи с этим полагаем, что область Q делится на L подобластей, в каждой из которых действует своя система дифференциальных уравнений в частных производных. В качестве примера подобластей можно рассмотреть трубчатый теплообменник "газжидкость"; для него можно выделить подобласти, в которых движутся газ и жидкость, а также подобласть, заполненную материалом теплообменных труб. Принимается, что для подобласти  $Q_l$  система включает  $K_l$  дифференциальных уравнений. Искомыми для этой подобласти являются  $K_l$  функций вида:

$$y_{2}^{l} = f_{2}^{l}(x),$$

$$y_{2}^{l} = f_{2}^{l}(x),$$
...
$$y_{K_{l}}^{l} = f_{K_{l}}^{l}(x).$$
(1)

При этом i -ое дифференциальное уравнение в общем виде зависит от функций:  $y_i^l$ ,  $i=1,...,K_l$ , их первых производных  $(y_{ij}^l)'$ ,  $i=1,...,K_l$ , j=1,...,N (общее число первых производных:  $K_l \cdot N$ ), их вторых производных  $(y_{ijq}^l)''$ ,  $i=1,...,K_l$ , j=1,...,N, q=1,...,N (с учетом того, что  $(y_{ijq}^l)'' = (y_{iqj}^l)'' -$  общее число вторых производных  $K_l \cdot (N^2 + N)/2$ ), где i-10 номер функции, i=11, i=12, i=13, i=13, i=14, i=14, i=14, i=14, i=15, i=15

$$D^{lj}(y_1^l, ..., y_{K_l}^l, (y_{11}^l)', ..., (y_{K_l,N}^l)', (y_{111}^l)', ..., (y_{K_l,NN}^l)'', ...) = 0,$$

$$j = 1, ..., K_l,$$
(2)

где  $D^{lj}-j$ -е дифференциальное уравнение в подобласти  $Q_l$  записанное в неявной форме.

Отметим, что среди подобластей  $Q_l$ ,  $l=1,\ldots,K_l$  можно выделить пары смежных подобластей. Если некоторая точка x принадлежит границе пары смежных подобластей  $Q_i$  и  $Q_j$  (обозначим эту границу через  $\Gamma_{ij}$ ), то некоторые функции, искомые из системы уравнений подобластей  $Q_i$ , равны в этой точке соответствующим (как правило, имеющим тот же физический смысл) функциям, определяемым из системы уравнений подобласти  $Q_j$ . Отметим, что в общем случае номер некоторой функции в системе уравнений подобласти  $Q_i$  может не совпадать с номером соответствующей ей функции в системе уравнений подобласти  $Q_i$ . Если подобласти  $Q_i$  и  $Q_i$  не являются смежными (т.е. не имеют общих точек),

то  $\Gamma_{ij}=\emptyset$ . Для каждой пары смежных подобластей  $Q_i$  и  $Q_j$  вводится множество пар номеров соответствующих функций

$$S^{ij} = \left\{ \left( n_1^{ij}, p_1^{ij} \right), \left( n_2^{ij}, p_2^{ij} \right), \dots, \left( n_{K_{ij}^{eq}}^{ij}, p_{K_{ij}^{eq}}^{ij} \right) \right\},$$
(3)

где  $n_k^{ij}$  — номер функции в системе уравнений подобласти  $Q_i$  в -ой паре соответствия, входящей в  $S^{ij}$ ,  $p_k^{ij}$  — номер функции в системе уравнений подобластей  $Q_j$  в k-ой паре соответствия, входящей в  $S^{ij}$ ,  $K_{ij}^{\rm eq}$  — число пар соответствия для систем уравнений подобластей  $Q_i$  и  $Q_j$ . Если  $x \in \Gamma^{ij}$ , то должны выполняться условия:

$$y_{n_{ij}}^{i}(x) = y_{p_{1}}^{j}(x),$$

$$y_{n_{2}}^{i}(x) = y_{p_{2}}^{j}(x),$$

$$...$$

$$y_{n_{k_{ij}}^{i}}^{i}(x) = y_{p_{k_{ij}}^{i}}^{j}(x).$$

$$(4)$$

Для каждой подобласти  $Q_l$  вводятся множества внешних границ  $\Gamma_{\rm ext}^{li},\ i=1,...,I_{\rm ext}^l,$  где  $I_{\rm ext}^l$  — число внешних границ подобласти  $Q_l$ . Для каждой границы  $\Gamma_{\rm ext}^{li}$  вводится множество номеров искомых функций, значения которых на данной границе задано:

$$J_{\text{ext}}^{li} = \left\{ j_{\text{ext1}}^{li}, \dots, j_{\text{ext}K_{\text{ext}}^{li}}^{li} \right\},\,$$

где  $K_{\mathrm{ext}}^{li}$  — число функций, задаваемых на границе  $\Gamma_{\mathrm{ext}}^{li}$ . В каждой точке  $x \in \Gamma_{\mathrm{ext}}^{ij}$  должны выполняться условия:

$$y_{j_{\text{ext}1}}^{l}(x) = y_{j_{\text{ext}1}}^{lz}(x),$$

$$y_{j_{\text{ext}2}}^{l}(x) = y_{j_{\text{ext}2}}^{lz}(x),$$
...
$$y_{j_{\text{ext}}K_{\text{ext}}}^{l}(x) = y_{j_{\text{ext}}K_{\text{ext}}}^{lz}(x),$$
(5)

Надстрочным индексом z обозначаются заданные функции от независимых параметров. Аналогичным образом граничные условия могут быть введены не только для значений функций, но и для их производных.

Как видно, если функции  $y_1^l = f_1^l(x), ..., y_{K_l}^l = f_{K_l}^l(x), l = 1, ..., L$  являются решениями систем дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих подобласти  $Q_1, ..., Q_l$ , то для каждой точки  $x \in Q_l$  должны выполняться условия (2); для каждой точки  $x \in \Gamma^{ij}$ , если  $\Gamma^{ij} \in \emptyset$ , должны выполняться краевые условия (4), а для каждой внешней границы множества  $Q_l$  должны выполняться краевые условия (5).

В настоящей работе вместо неизвестных функций (1), отвечающих условиям (2), (4), (5) и являющихся точными решениями, ищется приближенное решение в виде линейных комбинаций базисных функций. В качестве базисных функций используются функции вида  $x_1^{i_1} \cdot x_2^{i_2} \cdot ... \cdot x_N^{i_N}$ , где  $x_l - l$ -ая компонента вектора x;  $i_1, i_2, ... i_N$  — показатели степени, отвечающие условиям:

$$0 \le i_j \le S,\tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^{N} i_i \le S. \tag{7}$$

Искомые функции представляются в виде:

$$f(x_1, ..., x_N) = \sum_{k=1}^{C} a_k x_1^{i_{1k}} \cdot ... \cdot x_N^{i_{Nk}},$$
(8)

где  $C = N^{S+1}$  — число всех возможных сочетаний степеней, отвечающих условиям (6), (7),  $i_{jk}$  — показатель степени в -ом элементе сочетания при j-ой компоненте вектора x.

Коэффициенты  $a_k$  являются искомыми коэффициентами линейного разложения базисных функций.

Поскольку искомые линейные разложения базисных функций являются приближенными решениями рассматриваемых систем, то условия (2), (4), (5) строго выполнятся не будут.

В связи с этим их целесообразно представить в следующем виде.

1. Условия (2) заменяются выражением:

$$D^{lj}(y_1^l, \dots, y_{K_{l'}}^l, (y_{11}^l)', \dots, (y_{K_{l},N}^l)', (y_{111}^l)', \dots, (y_{K_{l}NN}^l)'', \dots) = \delta^{lj},$$

$$j = 1, \dots, K_l, \forall x \in Q_l, l = 1, \dots, K_l,$$

$$(9)$$

где  $\delta^{lj}$  – абсолютная невязка -го дифференциального уравнения системы дифференциальных уравнений l -ой подобласти  $Q_l$ .

2. Условия (4) заменяются выражениями:

$$y_{n_{i}^{ij}}^{i}(x) - y_{p_{1}^{ij}}^{j}(x) = \delta_{k}^{ij}, (n_{k}^{ij}, p_{k}^{ij}) \in S^{ij},$$

$$k = 1, \dots, K_{ij}^{eq}, \forall x \in \Gamma^{ij},$$

$$i = 1, \dots, L, j = 1, \dots, L,$$
(10)

где  $\delta_k^{ij}$  – абсолютная невязка условий (4) для подсистем уравнений подобластей  $Q_i$  и  $Q_j$  номера которых указаны в -ой паре номеров множества  $S^{ij}$ . Аналогично выражению (10) могут быть сформированы ограничения для производных искомых функций.

3. Условия (5) заменяются выражениями:

$$y_{j_{\text{ext}k}}^{l}(\overline{x}) - y_{j_{\text{ext}k}}^{li}(\overline{x}) = \delta_{\text{ext}k}^{li},$$

$$k = 1, \dots, K_{\text{ext}}^{li}, \forall \overline{x} \in \Gamma_{\text{ext}}^{li},$$
(11)

где  $\delta_{\rm extk}^{\rm li}$  — абсолютная невязка для функции системы уравнений подобласти  $Q_{\rm i}$ , номер которой содержится в -ом элементе множества  $J_{\rm ext}^{\rm li}$ .

Полиномы заданной степени S (8), зависящие от вектора x и вектора коэффициентов A, где  $A = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_s \end{pmatrix}$ , не всегда с достаточной точностью могут представлять решение системы

дифференциальных уравнений соответствующей подобласти  $Q_l$  в точках этой подобласти. Для повышения указанной точности возможны два способа. Первый состоит в повышении степени полиномов, однако при слишком большой степени возникают значительные вычислительные трудности, преодоление которых требует очень высокой точности расчета коэффициентов полиномов при больших показателях степени. Второй способ состоит в разбиении подобласти  $Q_l$  на ряд блоков, в каждом из которых используются свои полиномы умеренных степеней. При этом на границах смежных блоков контролируются невязки значений функций  $y_1, \dots, y_{K_l}$ .

Введем дискретное множество N -мерных контрольных точек  $(x_K^1, ..., x_K^v)$ , с достаточной плотностью (смысл этого понятия будет пояснен далее) покрывающее все подобласти расчетной области Q. Эти точки должны достаточно плотно покрывать пространство выделенных блоков, границы между смежными блоками внутри подобластей, границы между подобластями и внешние границы подобластей.

Обозначим множество контрольных точек, принадлежащих k — ому блоку подобласти  $Q_l$  через  $\psi_B^{lk}$ , а множество контрольных точек, принадлежащее границам смежных блоков i и j подобласти  $Q_l$ , через  $\Gamma_B^{lij}$ . Количество блоков в подобласти  $Q_l$  обозначим через  $B_l$ . Обозначим искомые функции (полиномы) k -го блока подобласти  $Q_l$  через

$$\tilde{y}_1^{lk} = F_1^{lk}(x, A_1^{lk}), \dots, \tilde{y}_{K_l}^{lk} = F_{K_l}^{lk}(x, A_{K_l}^{lk}), \tag{12}$$

где  $A_i^{lk}$  — C-мерный вектор коэффициентов полинома, представляющего i-ую искомую функцию -го блока подобласти  $Q_l$ .

Если некоторая контрольная точка  $x_K^d \in \psi_B^{lk}$ , то, подставляя координаты этой точки в выражения (12), можно определить значения искомых функций  $y_{1d}^{lk}, \dots, y_{K_ld}^{lk}$  в этой точке. Поскольку все входящие в дифференциальные уравнения функции-производные легко находятся дифференцированием полинома (8), то, подставляя в данные функции координаты контрольной точки  $x_K^d$ , можно найти числовые значения частных производных функций  $\tilde{y}_1^{lk}, \dots, \tilde{y}_{K_l}^{lk}$ .

Подставляя вычисленные значения функций и их производных в выражения (9), найдем значения невязок для точки  $x_K^d$ . В этом случае (9) примет вид:

$$D^{lkjd}(\tilde{y}_{1}^{lk}(x_{K}^{d}, A_{1}^{lk}), \dots, \tilde{y}_{K_{l}}^{lk}(x_{K}^{d}, A_{K_{l}}^{lk}), \\ (\tilde{y}_{11}^{lk}(x_{K}^{d}, A_{1}^{lk}))', \dots, (\tilde{y}_{K_{l},N}^{lk}(x_{K}^{d}, A_{N}^{lk}))', \\ (\tilde{y}_{111}^{lk}(x_{K}^{d}, A_{1}^{lk}))'', \dots, (\tilde{y}_{K_{l}NN}^{lk}(x_{K}^{d}, A_{K_{l}}^{lk}))'', \dots) = \delta^{lkjd}$$
(13)

где l — номер подобласти, k — номер блока в подобласти, j — номер дифференциального уравнения в системе уравнений подобласти  $Q_l$ , d — номер контрольной точки.

Если контрольная точка принадлежит границе двух блоков k и t, входящих в подобласть  $Q_l$ , то невязки (9) определяются отдельно для полиномов k и t-ого блоков. Кроме того, определяются невязки вида:

$$\delta_{1}^{lktd} = \tilde{y}_{1}^{lk} (x_{K}^{d}, A_{1}^{lk}) - \tilde{y}_{1}^{lt} (x_{K}^{d}, A_{1}^{lt}), \\
\dots \\
\delta_{K_{l}}^{lktd} = \tilde{y}_{K_{l}}^{lk} (x_{K}^{d}, A_{K_{l}}^{lk}) - \tilde{y}_{K_{l}}^{lt} (x_{K}^{d}, A_{K_{l}}^{lt}).$$
(14)

Если точка  $x_K^d$  является угловой точкой границ между блоками, принадлежащей одновременно нескольким блокам подобласти  $Q_l$ , то в ней невязки вида (14) определяются для каждой пары смежных блоков.

Если точка  $x_K^d$  принадлежит одновременно k-ому блоку подобласти  $Q_i$  и -ому блоку подобласти  $Q_j$ , то в такой точке должны определяться невязки (10), которые примут вид:

$$\delta_{1}^{itjkd} = \tilde{y}_{n_{1}^{ij}}^{ik} \left( x_{K}^{d}, A_{n_{1}^{ij}}^{lk} \right) - \tilde{y}_{p_{1}^{ij}}^{ik} \left( x_{K}^{d}, A_{p_{1}^{ij}}^{lk} \right),$$

$$\vdots$$

$$\delta_{K_{ij}^{eq}}^{itjkd} = \tilde{y}_{n_{K_{ij}^{eq}}^{ik}}^{ik} \left( x_{K}^{d}, A_{K_{ij}^{eq}}^{lk} \right) - \tilde{y}_{p_{K_{ij}^{eq}}^{ij}}^{ik} \left( x_{K}^{d}, A_{K_{ij}^{eq}}^{lk} \right).$$
(15)

Если точка  $x_K^d$  принадлежит некоторому блоку k подобласти  $Q_l$  и одновременно принадлежит внешней границе i данной подобласти, то в такой точке дополнительно должны быть определены невязки (11), которые примут вид:

$$\delta_{\text{ext1}}^{lkid} = \tilde{y}_{j_{\text{ext}}^{li}}^{lk} \left( x_K^d, A_{j_{\text{ext}}^{li}}^{lk} \right) - \tilde{y}_{j_{\text{ext}}^{li}}^{lz} \left( x_K^d \right),$$

$$\cdots$$

$$\delta_{\text{ext}K_{\text{ext}}^{ll}}^{lkl} = \tilde{y}_{j_{\text{ext}}^{li}K_{\text{ext}}}^{ll} \left( x_K^d, A_{j_{\text{ext}}^{li}K_{\text{ext}}}^{ll} \right) - \tilde{y}_{j_{\text{ext}}^{li}K_{\text{ext}}}^{ll} \left( x_K^d \right),$$

$$(16)$$

Зная геометрию расчетной области задачи Q (разбиение ее на подобласти, разбиение подобластей на блоки, внешние границы подобластей, состав дифференциальных уравнений в подобластях, принадлежность контрольных точек подобластям, блокам и границам) можно сформировать систему уравнений для расчета абсолютных невязок в контрольных точках. Как уже отмечалось, для сопоставления различных невязок необходим переход от

абсолютных невязок к относительным. Для этого каждую абсолютную невязку нужно разделить на ее заранее заданную предельно допустимую величину. В общем виде относительная невязка определяется из выражения:

$$\delta_i^{\text{rel}} = \frac{\delta_i^{\text{abs}}}{\varepsilon_i^{\text{max}}},\tag{17}$$

где  $\delta_i^{\rm abs}$  – абсолютное значение i -ой невязки,  $\delta_i^{\rm rel}$  – относительное значение i-ой невязки,  $\varepsilon_i^{\rm max}$  – предельно допустимое значение -ой невязки.

Каждой относительной невязке в соответствие ставятся два ограничения-неравенства:

$$g_i^+ = z - \delta_i^{\text{rel}} \ge 0,$$
  

$$g_i^- = z + \delta_i^{\text{rel}} \ge 0,$$
(18)

где z – вспомогательный параметр, причем  $z \ge 0$ .

Если решать задачу на минимизацию z, то использование двух неравенств (18) обеспечит "двухстороннее сжатие" невязки. Если значение невязки положительное, то ее сокращение будет обеспечено за счет неравенства  $g^+$ , а если ее значение отрицательное, то сокращение будет обеспечено за счет невязки  $g^-$ .

Если исходные дифференциальные уравнения линейные, то система равенств и неравенств (13)–(18) будет линейной.

Как правило, исходное дифференциальное уравнение разрешено относительно какойлибо производной (первой степени, второй степени и т.д.), которые стоят в левой части данного уравнения. Приведение уравнений к виду (2), т.е. к неявной форме, осуществляется за счет переноса правых частей уравнений в левые части с изменением знака (при этом правые части уравнений оказываются равными нулю).

По поводу выбора допустимой погрешности решения систем уравнений (13)–(16) можно отметить следующее. Выбор предельно-допустимых значений невязок для условий (14)–(16), как правило, не вызывает сложностей, поскольку из содержательного анализа решаемой задачи можно оценить требуемые точности расчета искомых функций (1) Сложнее выбрать предельно допустимые погрешности решения систем дифференциальных уравнений в частных производных (13). В этом случае можно использовать следующий эвристический подход.

Рассмотрим исходное дифференциальное уравнение, в левой части которого стоит первая производная  $\frac{\partial y_k^l}{\partial x_i}$ , где l — номер подпространства, k — номер искомой функции, i — номер свободного параметра.

Положим, что для функции  $y_k^l$  на основе содержательного анализа определена предельно-допустимая погрешность  $\varepsilon_k^l$ . Тогда предельно-допустимая погрешность при определении производной  $\varepsilon_{ki}^l$  может быть оценена из условия

$$\varepsilon_k^l \ge \varepsilon_{ki}^l \cdot \left| \Delta x_i^l \right| \cdot N,\tag{19}$$

где  $\Delta x_i^l$  — максимальное изменение параметра  $x_i$  в подпространстве  $Q_l$ , N — размерность вектора независимых параметров в подпространстве  $Q_l$ .

Заменяя в (19) знак неравенства на равенство и разрешая полученное уравнение относительно  $\varepsilon_{ki}^l$ , имеем

$$\varepsilon_{ki}^l = \frac{\varepsilon_k^l}{|\Delta x_i^l| \cdot N}.$$

После того, как будут определены требуемые точности расчета первых производных, с использованием данного подхода можно определить требуемые точности расчета вторых производных и т.д.

Теперь можно определить систему ограничений, построенную на основе неравенств (18). Обозначим ее за  $M^{\Sigma}$ -мерную векторную функцию  $G(z, A^{\Sigma})$ . Она включает в себя невязки описанных выше типов для всех контрольных точек.

В результате задача математического программирования, к которой сводится решение исходной системы дифференциальных уравнений в частных производных, может быть представлена в виде:

$$\min_{z,A^{\Sigma}} z \tag{20}$$

при ограничениях

$$G(z, A^{\Sigma}) \ge 0, \tag{21}$$

$$\underline{A}^{\Sigma} \le A^{\Sigma} \le \overline{A}^{\Sigma},\tag{22}$$

где z — вспомогательный параметр,  $A^{\Sigma}$  —  $N^{\Sigma}$ -мерный вектор оптимизируемых параметров (коэффициентов полиномов всех блоков),  $\bar{A}^{\Sigma}$ ,  $\underline{A}^{\Sigma}$  — вектора, элементы которых задают нижнюю и верхнюю границы компонентов вектора  $A^{\Sigma}$ . Если G — система линейных неравенств, то (20)—(22) будет задачей линейного программирования.

Общее число ограничений-неравенств в  $M^{\Sigma}$  в задаче определяется числом контрольных точек, распределением их на внутренние и граничные, подсистемами дифференциальных уравнений и граничными условиями. Число оптимизируемых параметров, кроме того, определяется числом блоков и степенями полиномов, с помощью которых описываются искомые функции.

Если в точке решения задачи (20)–(22)  $z \le 1$ , то абсолютные невязки находятся в допустимых интервалах. Если в точке решения z > 1, то требуется увеличить число блоков (при сохранении степени полиномов) или увеличить степени полиномов (при сохранении числа блоков).

Следует отметить, что с использованием найденных в результате оптимизации полиномов, аппроксимирующих искомые функции, легко может быть проведен расчет в проверочных точках, число которых существенно больше числа контрольных точек. Если при  $z \le 1$  в некоторых проверочных точках условия (21) не выполняются, то из проверочных точек с максимальными значениями относительных невязок могут быть выбраны дополнительные контрольные точки, которые включаются в исходную задачу. Если во всех проверочных точках условия (21)–(22) при z=1 выполняются, то можно считать, что пространство решения задачи заполнено контрольными точками с достаточной плотностью.

2. Математическая модель теплообменника. В качестве примера рассмотрим расчет керамического теплообменника периодического действия. В отличие от модели в [13], где предполагается мгновенная передача тепла внутри керамических шаров, будет построена модель, которая учитывает конечную скорость передачи тепла между слоями керамических шаров. Такой теплообменник представляет собой цилиндрический объем, заполненный шаровой засыпкой, состоящей из керамических шаров одинакового малого радиуса *R*. В теплообменник периодически подается греющий газ (продукты сгорания органического топлива), нагревающий шаровую засыпку и нагреваемый воздух, охлаждающий шаровую засыпку. При этом движение потоков газа и воздуха происходит вдоль оси цилиндра в противоположных направлениях. Работа теплообменника имеет периодический характер. Сначала следует стадия нагрева шаровой засыпки, тогда в теплообменник подается газ. Затем следует стадия охлаждения шаровой засыпки, тогда в теплообменник подается воздух.

Особенностью данной задачи является то, что значения температур керамики в любой момент процесса неизвестны.

При расчете делается упрощающее предположение, состоящее в том, что теплообмен между всеми шарами, расположенными в одном сечении, перпендикулярном оси цилиндра и продуктами сгорания или воздухом, протекает одинаково.

Обозначим через  $T_{gh}$ ,  $T_{gc}$ ,  $T_{ch}$ ,  $T_{cc}$  температуры: греющего газа, воздуха, керамики при ее нагреве и керамики при ее охлаждении соответственно.

Обозначим  $\alpha_{\rm gas}$  — коэффициент теплоотдачи от газа к керамике,  $\alpha_{\rm air}$  — коэффициент теплоотдачи от керамики к воздуху,  $F_{\rm spec}$  — удельная площадь теплообмена (на кубический метр засыпки),  $\rho_{\rm gas}$ ,  $\rho_{\rm air}$  — плотность газа и воздуха соответственно.  $W_{\rm gas}$ ,  $W_{\rm air}$  — скорость газа и воздуха,  $C_{\rm gas}$ ,  $C_{\rm air}$  — удельные теплоемкости газа, воздуха,  $F_{\rm *}$  — площадь живого сечения на единицу площади засыпки, A — коэффициент температуропроводности керамики,  $\lambda$  — теплопроводность керамики.

На стадии нагрева керамики дифференциальное уравнение теплового баланса газа имеет следующий вид:

$$\left(T_{gh}(x,\tau) - T_{ch}(x,\tau,r)\right) \alpha F_{\text{spec}} + \rho_{\text{gas}} C_{\text{gas}} F_* \left(W_{\text{gas}} \frac{\partial T_{gh}(x,\tau)}{\partial x} + \frac{\partial T_{gh}(x,\tau)}{\partial \tau}\right) = 0.$$
(23)

Теплообмен между воздухом и керамикой описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\left(T_{gh}(x,\tau) - T_{ch}(x,\tau,r)\right) \alpha F_{\text{spec}} - \lambda \frac{\partial T_{ch}(x,\tau,r)}{\partial \tau} = 0.$$
 (24)

Дифференциальное уравнение распространения тепла в керамике учитывает распространение тепла внутри шара керамической засыпки. Рассматривается радиальное распространение тепла в однородном шаре радиуса R. Предполагается, что в любой момент времени t температура в точках, находящихся на одном расстоянии r от центра шара, будет одинаковой. Это означает, что температура зависит в каждом шаре только от r и от t. Если для каждого шара ввести сферические координаты, то процесс распространения тепла описывается дифференциальным уравнением Фурье [14]:

$$T_{ch}(x,\tau,r) - A\left(\frac{\partial^2 T_{ch}(x,\tau,r)}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T_{ch}(x,\tau,r)}{\partial r}\right) = 0. \tag{25}$$

На стадии охлаждения керамики дифференциальное уравнение теплового баланса воздуха имеет следующий вид:

$$\left(T_{gc}(x,\tau) - T_{cc}(x,\tau,r)\right)\alpha F_{\text{spec}} + \rho_{\text{air}}C_{\text{air}}F_*\left(W_{\text{air}}\frac{\partial T_{gc}(x,\tau)}{\partial x} + \frac{\partial T_{gc}(x,\tau)}{\partial \tau}\right) = 0.$$
(26)

Теплообмен между воздухом и керамикой в процессе охлаждения керамики описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\left(T_{gc}(x,\tau) - T_{cc}(x,\tau,r)\right) \alpha F_{\text{spec}} - \lambda \frac{\partial T_{cc}(x,\tau,r)}{\partial \tau} = 0.$$
 (27)

И для распространения тепла внутри керамической засыпки дифференциальное уравнение Фурье примет следующий вид:

$$T_{cc}(x,\tau,r) - A\left(\frac{\partial^2 T_{cc}(x,\tau,r)}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial T_{cc}(x,\tau,r)}{\partial r}\right) = 0.$$
 (28)

В модели учитываются граничные условия (условия реверсивности), требующие, чтобы температура керамики во всех контрольных точках в момент начала стадии нагрева равнялась температуре керамики в соответствующих контрольных точках в момент окончания стадии охлаждения и температура керамики в контрольных точках в момент окончания стадии нагрева равнялась температуре керамики в контрольных точках в момент начала стадии охлаждения. Таким образом, в данной задаче имеются две подобласти. В одной действуют

дифференциальные уравнения передачи тепла от газа к керамике, в другой – передачи тепла от керамики к воздуху.

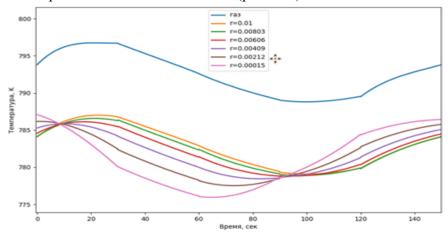
Поскольку коэффициенты, характеризующие теплообмен, являются функциями от рассчитываемых в результате решения данной задачи температур газа, воздуха и керамики, то расчет теплообменника осуществляется итерационно.

На первой итерации задаются приближенные значения коэффициентов (теплоемкость, теплопроводность и т. д.) в различных токах теплообменника в разные моменты времени, после чего решается задача (20)–(22). В результате решения получаем температуры керамики, газа и воздуха. На основе полученных температур уточняются указанные коэффициенты, после чего снова решается задача (20)–(22). Процесс уточнения идет до тех пор, пока разность температур, полученных на соседних итерациях, не окажется меньше некоторой заданной величины.

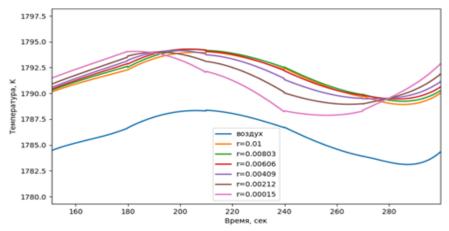
**3. Результаты расчета.** Расчет теплообменника проводится при следующих исходных данных. Радиус цилиндрического теплообменника 2 м. Высота теплообменника — 4 м. Продолжительность стадии нагрева и продолжительность стадии охлаждения 150 секунд. Радиус шара засыпки составляет 0,01 м. На протяжении всей стадии нагрева температура газа на входе в теплообменник составляет 1800 К. На протяжении всей стадии охлаждения температура воздуха составляет 778 К. Расход газа и воздуха составляет соответственно 8,74 кг/с и 11,43 кг/с

При проведении расчетов выделялись 2 подобласти. Подобласть стадии нагрева, и подобласть стадии охлаждения. Каждая подобласть делилась на 25 блоков с использованием деления времени на 5 равных интервалов и длины теплообменника на 5 равных интервалов.

Общее количество контрольных точек, на стадии нагрева и на стадии охлаждения – по 13650 для каждой из подобластей. Общее количество невязок: 36330. Общее число ограничений в задаче составляет 72660, количество оптимизируемых параметров составляет: 1501. Каждый из полиномов, входящих в 25 блоков подобласти, описывается десятью (для газа или воздуха) и двадцатью (для керамики) параметрами. К общему числу параметров вспомогательный параметр Z. C учетом необходимости коэффициентов, входящих в дифференциальные уравнения и зависящих от температур газа, керамики, были проведены 3 итерации решения задачи программирования. Оптимальное значение задачи 0,9541. Расчет невязок в проверочных точках (которых было в 2 раза больше, чем контрольных) показал, что максимальная невязка равна 0,9724. Ниже представлены рассчитанные значения температур газа, воздуха и керамики для некоторых точек теплообменника (рис. 1-2).



**Рис. 1.** Температура газа (синий) и керамики на различных расстояниях от центра на стадии нагрева керамики на выходе из теплообменника (на противоположном от точки подачи газа конце)



**Рис. 2.** Температура воздуха (синий) и керамики на различных расстояниях от центра на стадии охлаждения керамики на выходе из теплообменника (на противоположном от точки подачи воздуха конце)

При нагреве керамического шара внешние его слои будут иметь более высокую температуру, чем внутренние, а при охлаждении шара внешние слои будут иметь более низкую температуру, чем внутренние. При чередовании процессов нагрева и охлаждения должен происходить «переворот» температурных напоров внутри шара, который хорошо виден на представленных рисунках, что говорит о правильном представлении процесса, как минимум, на качественном уровне.

Расчеты показывают, что теплопроизводительность теплообменника (передача тепла от газа к воздуху) за один цикл нагрев-охлаждение (300 с.) составляет  $2.36 \cdot 10^6$  кДж.

Необходимо отметить, что решаемая задача является весьма сложной для методов МКР МКО и МКЭ. Она решается следующим образом. Задаются приближенные значения температуры керамики в начальный момент времени. Затем моделируются многократно процессы нагрева и охлаждения керамики до тех пор, пока температура в начале стадии нагрева не стабилизируется и не будет близка к температуре керамики в конце стадии охлаждения.

При характерных для керамики значений коэффициентов температуропроводности, рассматриваемая система дифференциальных уравнений является "жесткой". Это требует задания малых характерных размеров по пространственным координатам и по времени, что обусловливает значительный расход вычислительных ресурсов при использовании МКО и МКЭ. Применение рассмотренного подхода существенно сокращает необходимые для решения задачи ресурсы. Время решения представленной задачи ЛП на процессоре Intel Core і9 Alder Lake с 16-ю ядрами составило 81 с. Полное решение с учетом 3-х стадий уточнения температур воздуха, газа и керамики составило 247 с.

Решить данную задачу с помощью МКО решить не удалось в связи с недопустимо большим расходом машинного времени.

Заключение. Расчеты динамических процессов в элементах теплоэнергетических установок (теплообменники, камеры сгорания, турбомашины и др.) необходимы для обоснования допустимых и оптимальных режимов работы, выбора конструктивных характеристик элементов, оценки их надежности и т. д. Эти задачи сводятся к решению систем уравнений в частных производных, при этом в основном используются метод конечных разностей и метод конечных элементов, которые громоздки и сложны.

На основе анализа недостатков существующих методов предлагается эффективный численный метод решения этих задач (метод контрольных точек). Метод основан на сведении решения СДУЧП к решению задач линейного программирования. Метод особенно эффективен, когда неизвестны все начальные условия (в примере с теплообменником это

значения температур керамики), а также система дифференциальных уравнений является жесткой.

Метод иллюстрируется вычислительным экспериментом с расчетом действия периодического керамического теплообменника с шаровой засыпкой

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01654, https://rscf.ru/project/22-29-01654.

#### Список источников

- 1. Самарский А. А. Методы решения сеточных уравнений: Учебное пособие / А.А. Самарский, Е.С.Николаев. Наука, 1978.
- 2. Calatayud J. et al. Constructing reliable approximations of the probability density function to the random heat PDE via a finite difference scheme./Applied Numerical Mathematics, 2020, T. 151, pp. 413-424. DOI 10.1016/j.apnum.2020.01.012.
- 3. Smith G., Numerical solution of partial differential equations: finite difference methods. Oxford university press, 1985, 321 p.
- 4. Kazem S., Dehghan M. Application of finite difference method of lines on the heat equation. Numerical Methods for Partial Differential Equations, 2018, vol. 34, no. 2, pp. 626-660, DOI: 10.1002/num.22218
- 5. Пантакар С., Тепло и массообмен в пограничных слоях / С. Пантакар, Д. Сполдинг, 1971.
- 6. Cebula A., Taler J., Ocloń P. Heat flux and temperature determination in a cylindrical element with the use of finite volume finite element method. International journal of thermal sciences, 2018, vol. 127, pp. 142-157, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.01.022
- 7. Zienkiewicz O.C., Taylor R. L., Zhu J. Z. The finite element method: its basis and fundamentals. Elsevier, 2005.
- 8. Eymard R., Gallouët T., Herbin R. Finite volume methods //Handbook of numerical analysis, 2000, vol. 7, pp. 713-1018.
- 9. Johnson C. Numerical solution of partial differential equations by the finite element method. Courier Corporation, 2012.
- 10. Kler A., Apanovich D., Maximov A. An effective method for calculating the elements of thermal power plants, which are reduced to solving systems of partial differential equations. E3S Web of Conferences, EDP Sciences, 2020, vol. 209, pp. 03029, DOI: 10.1051/e3sconf/202020903029
- 11. Юдин Д.Б. Задачи и методы линейного программирования / Д.Б. Юдин, Е.Г. Гольштейн, 1961.
- 12. Gale D. Linear programming and the simplex method. Notices of the AMS, 2007, vol. 54, no. 3, pp. 364-369.
- 13. Клер А.М. Разработка математической модели системы высокотемпературных керамических теплообменников периодического действия / А.М. Клер, А.Ю. Маринченко, Ю.М. Потанина, П.В. Жарков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. − 2018. − Т. 329. − № 3. − С. 26-35. DOI: 10.1134/S0002331019060062
- 14. Кошляков Н.С. Уравнения в частных производных математической физики / Н.С. Кошляков и др. //М.: Высшая школа, 1970. Т. 712. С. 11.

**Клер Александр Матвеевич.** Доктор технических наук, профессор, заведующий отделом «Тепловые системы», Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, SPIN-код: 8502-2561, AuthorID: 20219, kler@isem.irk.ru, 664130, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова 130.

**Апанович Данил Владимирович.** Инженер-исследователь отдела «Тепловые системы», Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, dvapan@gmail.com, 664130, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова 130.

UDC 621.311.001.57

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.014

# The method of dynamic calculations of elements of thermal power plants, which reduces the solution of systems of differential equations in partial derivatives to the solution of linear programming problems

#### Alexandr M. Kler, Danil V. Apanovich

Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Russia, Irkutsk, dvapan@gmail.com

**Abstract.** Calculations of dynamic processes in the elements of thermal power plants (heat exchangers, combustion chambers, turbomachines, etc.) are necessary to justify the permissible and optimal operating modes, select elements of design characteristics, assess their reliability, etc. These problems are reduced to solving systems of partial differential equations. Currently, for such calculations, the finite difference method and the

finite element method are mainly used. These methods are cumbersome and complicated. The article proposes a method, the main idea of which is to reduce the solution of these systems of equations to the solution of linear programming (LP) problems. The operation of the method is demonstrated on the example of a batch heat exchanger.

Keywords: numerical methods, partial differential equations, linear programming, dynamic processes

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-01654, https://rscf.ru/project/22-29-01654/

#### References

- 1. Samarskiy A. A., Nikolayev Ye. S. Metody resheniya setochnykh uravneniy: Uchebnoye posobiye [Methods for solving grid equations: textbook. for universities]. Nauka [Science], 1978.
- 2. Calatayud J. et al. Constructing reliable approximations of the probability density function to the random heat PDE via a finite difference scheme / Applied Numerical Mathematics, 2020, T. 151, pp. 413-424. DOI 10.1016/j.apnum.2020.01.012.
- 3. Smith G., Numerical solution of partial differential equations: finite difference methods. Oxford university press, 1985, 321 p.
- 4. Kazem S., Dehghan M. Application of finite difference method of lines on the heat equation. Numerical Methods for Partial Differential Equations, 2018, vol. 34, no. 2, pp. 626-660, DOI: 10.1002/num.22218
- 5. Pantakar S., Spolding D. Teplo i massoobmen v pogranichnykh sloyakh [Heat and mass transfer in boundary layers], 1968.
- 6. Cebula A., Taler J., Ocloń P. Heat flux and temperature determination in a cylindrical element with the use of finite volume finite element method. International journal of thermal sciences, 2018, vol. 127, pp. 142-157, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2018.01.022
- 7. Zienkiewicz O.C., Taylor R. L., Zhu J. Z. The finite element method: its basis and fundamentals. Elsevier, 2005.
- 8. Eymard R., Gallouët T., Herbin R. Finite volume methods // Handbook of numerical analysis, 2000, vol. 7, pp. 713-1018.
- 9. Johnson C. Numerical solution of partial differential equations by the finite element method. Courier Corporation, 2012.
- 10. Kler A., Apanovich D., Maximov A. An effective method for calculating the elements of thermal power plants, which are reduced to solving systems of partial differential equations. E3S Web of Conferences, EDP Sciences, 2020, vol. 209, pp. 03029, DOI: 10.1051/e3sconf/202020903029
- 11. Yudin D. B., Gol'shteyn Ye. G. Zadachi i metody lineynogo programmirovaniya [Problems and Methods of Linear Programming], 1961.
- 12. Gale D. Linear programming and the simplex method. Notices of the AMS, 2007, vol. 54, no. 3, pp. 364-369.
- 13. Kler A. M., Marinchenko A. YU., Potanina YU. M., Zharkov P.V. Razrabotka matematicheskoy modeli sistemy vysokotemperaturnykh keramicheskikh teploobmennikov periodicheskogo deystviya [Development of a mathematical model of a system of high-temperature ceramic heat exchangers of periodic action] Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering], 2018, vol.329, no.3, pp.26-35.
- 14. Koshlyakov N. S. i dr. Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki [Equations in partial derivatives of mathematical physics]. Vysshaya shkola [Higher school], Moscow, 1970, 712 p.

Alexandr M. Kler. Doctor of Science, professor, Head of the Department of Thermal Systems of the Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, SPIN: 8502-2561, AuthorID: 20219, kler@isem.irk.ru, Russia, Irkutsk, st. Lermontova d.130.

**Danil V. Apanovich.** Research Engineer of the Department of Thermal Systems of the Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, dvapan@gmail.com, Russia, Irkutsk, st. Lermontova d.130.

Статья поступила в редакцию 12.04.22; одобрена после рецензирования 25.07.2022; принята к публикации 29.07.2022.

The article was submitted 04/12/22; approved after reviewing 07/25/2022; accepted for publication 07/29/2022.

УДК 519.862.6

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.015

# Исследование критериев нелинейности аддитивных степенных регрессий

#### Базилевский Михаил Павлович, Караулова Анна Витальевна

Иркутский государственный университет путей сообщения,

Россия, Иркутск, mik2178@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена, в первую очередь, исследованию поведения критерия нелинейности «по площади» для аддитивных степенных регрессий с одной объясняющей переменной в зависимости от степени. Этот критерий исследован на монотонность и доказано, что его пределы на бесконечности равны единице. На основе доказанной теоремы введено понятие «воронка нелинейности». Показано, как с помощью «воронок нелинейности» можно контролировать при оценивании степень нелинейности аддитивных степенных регрессий. Предложен новый критерий нелинейности, вычисляемый как разность между единицей и значением коэффициента детерминации в линейной регрессии зависимости объясняющей переменной от той же переменной, возведенной в степень. Установлено, что предложенный критерий корректно использовать только на выборках большого объема.

**Ключевые слова:** аддитивная степенная регрессия, критерий нелинейности, коэффициент детерминации, «воронка нелинейности»

**Цитирование:** Базилевский М.П. Исследование критериев нелинейности аддитивных степенных регрессий / М.П. Базилевский, А.В. Караулова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. -2022. № 3(27). -C. 162-173. -DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.015.

Введение. Проблема оценивания степени нелинейности различных математических функций является весьма актуальной. Её решению посвящены множество научных работ. Так, в [1] предложен подход к определению степени нелинейности дискретных функций, заданных на циклической группе примарного порядка. Работа [2] посвящена оценке нелинейности координатных полиномов произведения преобразований двоичного векторного пространства. В [3] доказывается верхняя оценка нелинейности булевых функций от четного числа переменных. В [4] проведен анализ нелинейных искажений в радиотракте с применением различных методов оценки нелинейности. В [5] описана методика оценивания степени нелинейности отклика грунта при сильных воздействиях. В [6] в качестве критерия нелинейности выступает индекс нелинейности, основанный на преобразовании Гильберта. Работа [7] посвящена измерению нелинейных свойств функций, применяемых в криптографии. В [8] исследованы критерии максимальной нелинейности функции над конечным полем. В [9] рассмотрено оценивание нелинейности в задаче построения доверительных областей движения потенциально опасных астероидов.

При проведении регрессионного анализа [10,11] исследователи часто прибегают к построению нелинейных моделей [12–15]. Степень нелинейности таких регрессий необходимо тщательно контролировать, иначе их будет проблематично интерпретировать.

Рассмотрим аддитивную степенную регрессию с одной объясняющей переменной x:

$$y_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_i^k + \varepsilon_i, \qquad i = \overline{1, n},$$
 (1)

где n — объем выборки;  $y_i$ ,  $i=\overline{1,n}$  — значения объясняемой переменной;  $x_i$ ,  $i=\overline{1,n}$  — значения объясняющих переменных;  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  — неизвестные параметры; k — выбранное число из промежутка  $\left(-\infty,0\right)\cup\left(0,\infty\right)$ ;  $\varepsilon_i$ ,  $i=\overline{1,n}$  — ошибки аппроксимации. Будем считать, что  $x_i>0$ ,  $i=\overline{1,n}$ .

При k=1 модель (1) является линейной, а при  $k \in (-\infty,0) \cup (0,1) \cup (1,\infty)$  нелинейной по объясняющей переменной, но линейной по параметрам, поэтому она легко оценивается с помощью метода наименьших квадратов (МНК). Число k в (1) нельзя брать равным нулю

из-за возникновения совершенной мультиколлинеарности. Возникает вопрос: как меняется нелинейность модели (1) в зависимости от степени k? Ответ на этот вопрос позволит контролировать нелинейность рассмотренной регрессии при её построении.

Для оценки нелинейности будем использовать критерий нелинейности «по площади», предложенный в [16–18]. Для модели (1) он имеет вид

$$NC = \frac{\left| \frac{x_{\text{max}}^{k} + x_{\text{min}}^{k}}{x_{\text{max}}^{k} - x_{\text{min}}^{k}} - \frac{2 \int_{x_{\text{min}}}^{x_{\text{max}}} x^{k} dx}{\left( x_{\text{max}} - x_{\text{min}}^{k} \right) \left( x_{\text{max}}^{k} - x_{\text{min}}^{k} \right)} \right|, \tag{2}$$

где  $x_{\min}$  и  $x_{\max}$  — минимальное и максимальное значение переменной x на выборке. По определению критерий (2) принимает значения от 0 до 1. Если NC=0, то модель (1) является линейной. Очевидно, что NC=0 при k=1, а чем ближе значение NC к единице, тем выше степень нелинейности модели.

Целью данной работы является исследование зависимости критерия нелинейности NC от степени k аддитивной степенной регрессии (1).

# 1. Исследование зависимости критерия нелинейности NC от k .

*Теорема*. Если  $x_{\max} > 0$ ,  $x_{\min} > 0$  и  $x_{\max} > x_{\min}$ , то критерий нелинейности *NC* (2) монотонно убывает на промежутке  $(-\infty,0) \cup (0,1)$  и возрастает на промежутке  $(1,\infty)$ . При этом  $\lim_{k\to -\infty} NC = \lim_{k\to \infty} NC = 1$ .

Доказательство.

Заметим, что при k = 0 функция (2) является неопределенной.

Сначала исследуем поведение критерия (2) при отсутствии знака модуля. Для этого рассмотрим 2 случая.

Случай №1. При  $k \neq -1$  функция (2) без модуля будет иметь вид:

$$NC^* = \frac{x_{\text{max}}^k + x_{\text{min}}^k}{x_{\text{max}}^k - x_{\text{min}}^k} - \frac{2(x_{\text{max}}^{k+1} - x_{\text{min}}^{k+1})}{(k+1)(x_{\text{max}} - x_{\text{min}})(x_{\text{max}}^k - x_{\text{min}}^k)} = \frac{x_{\text{min}}^k \left( \left( \frac{x_{\text{max}}}{x_{\text{min}}} \right)^k + 1 \right)}{x_{\text{min}}^k \left( \left( \frac{x_{\text{max}}}{x_{\text{min}}} \right)^k - 1 \right)} - 2 \frac{x_{\text{min}}^{k+1} \left( \left( \frac{x_{\text{max}}}{x_{\text{min}}} \right)^{k+1} - 1 \right)}{(k+1)x_{\text{min}}^{k+1} \left( \left( \frac{x_{\text{max}}}{x_{\text{min}}} \right) - 1 \right) \left( \left( \frac{x_{\text{max}}}{x_{\text{min}}} \right)^k - 1 \right)}.$$

Пусть  $\frac{x_{\text{max}}}{x_{\text{min}}} = b > 1$ . Тогда

$$NC^* = \frac{b^k + 1}{b^k - 1} - 2\frac{b^{k+1} - 1}{(k+1)(b-1)(b^k - 1)} = \frac{b^k - 1 + 2 - 2\frac{1}{b-1}\frac{b^{k+1} - 1}{k+1}}{(b^k - 1)} = 1 + \frac{2(b-1)(k+1) - 2(b^{k+1} - 1)}{(b^k - 1)(b-1)(k+1)}.$$
(3)

Используя (3), нетрудно показать, что  $\lim_{k\to\infty} NC^* = -1$ , а  $\lim_{k\to\infty} NC^* = 1$ .

Также с помощью (3) можно установить, что

$$\lim_{k \to 0} NC^* = 1 - \frac{2b}{b-1} + \frac{2}{\ln b}, \qquad \qquad \lim_{k \to -1} NC^* = \frac{b^{-1} + 1}{b^{-1} - 1} - \frac{2}{b-1} \cdot \frac{\ln b}{b^{-1} - 1},$$

поэтому в точках k = 0 и k = -1 функция  $NC^*$  имеет устранимые разрывы.

Теперь докажем, что для любого b > 1 функция  $NC^*$  монотонно возрастает на промежутке  $(-\infty, -1) \cup (-1, 0) \cup (0, \infty)$ .

Первая производная функции (3) имеет вид:

$$\left(NC^*\right)' = \frac{2b^k \ln b(b-1)}{(b^k-1)^2(k+1)^2} \cdot J, \tag{4}$$

где 
$$J = \frac{\left(b^{k+1}-1\right)\left(b^{k}-1\right)}{b^{k}\ln b(b-1)} - k(k+1).$$

Очевидно, что знак производной (4) будет зависеть от знака функции J. Исследуем функцию J. Её первая, вторая и третья производные имеют вид:

$$J' = \frac{b^{2k+1} - 1}{b^k (b-1)} - (2k+1), \quad J'' = \frac{\ln b (b^{2k+1} + 1)}{b^k (b-1)} - 2, \quad J''' = \ln^2 b \frac{b^{2k+1} - 1}{b^k (b-1)}.$$

Заметим, что при b>1  $\lim_{k\to -1}J''=\frac{\ln b\left(b^{-1}+1\right)}{b^{-1}(b-1)}-2=\frac{\ln b\left(1+b\right)}{b-1}-2>0$ ,

$$\lim_{k\to -\frac{1}{2}}J''=\frac{2\ln b}{b^{-\frac{1}{2}}(b-1)}-2<0,\ \lim_{k\to 0}J''=\frac{\ln b\left(b+1\right)}{(b-1)}-2>0\,.$$
 Из этого следует, что  $J''=0$  в некоторой точке  $k_1\in\left(-1,-\frac{1}{2}\right)$  и  $k_2\in\left(-\frac{1}{2},0\right).$ 

Рассмотрим следующие 4 случая.

- 1. Переменная  $k \in (0,\infty)$ . В этом случае J'''>0, поэтому J'' возрастает. При  $k\to 0$  производная J''>0, поэтому J' возрастает. При  $k\to 0$  производная  $J'\to 0$ , следовательно, J'>0, поэтому J возрастает. При  $k\to 0$  функция  $J\to 0$ , следовательно, функция J>0, поэтому и  $\left(NC^*\right)'>0$ . Это означает, что при  $k\in (0,\infty)$  функция  $NC^*$  возрастает для любого b>1.
- 2. Переменная  $k \in \left(-\frac{1}{2}, 0\right)$ . В этом случае J''' > 0, поэтому J'' возрастает. При  $k \to 0$  производная J'' > 0, а при  $k \to -\frac{1}{2}$  производная J'' < 0, следовательно, J'' < 0 при  $k \in (-\frac{1}{2}, k_2)$  и J'' > 0 при  $k \in (k_2, 0)$ . Тогда J' убывает при  $k \in (-\frac{1}{2}, k_2)$  и возрастает при  $k \in (k_2, 0)$ . При  $k \to 0$  производная  $J' \to 0$ , следовательно, J' < 0, поэтому J убывает при  $k \in (k_2, 0)$ . При  $k \to -\frac{1}{2}$  производная  $J' \to 0$ , следовательно, J' < 0, поэтому J убывает при  $k \in (-\frac{1}{2}, k_2)$ . При  $k \to 0$  функция  $J \to 0$ , следовательно, функция J > 0, поэтому и  $\left(NC^*\right)' > 0$ . Это означает, что при  $k \in \left(-\frac{1}{2}, 0\right)$  функция  $NC^*$  возрастает для любого b > 1.
- 3. Переменная  $k \in \left(-1, -\frac{1}{2}\right)$ . В этом случае J''' < 0, поэтому J'' убывает. При  $k \to -1$  производная J'' > 0, а при  $k \to -\frac{1}{2}$  производная J'' < 0, следовательно, J'' > 0 при

 $k \in (-1,k_1)$  и J'' < 0 при  $k \in \left(k_1, -\frac{1}{2}\right)$ . Тогда J' возрастает при  $k \in (-1,k_1)$  и убывает при  $k \in \left(k_1, -\frac{1}{2}\right)$ . При  $k \to -1$  производная  $J' \to 0$ , следовательно, J' > 0, поэтому J возрастает при  $k \in \left(-1,k_1\right)$ . При  $k \to -\frac{1}{2}$  производная  $J' \to 0$ , следовательно, J' > 0, поэтому J возрастает при  $k \in \left(k_1, -\frac{1}{2}\right)$ . При  $k \to -1$  функция  $J \to 0$ , следовательно, функция J > 0, поэтому и  $\left(NC^*\right)' > 0$ . Это означает, что при  $k \in \left(-1, -\frac{1}{2}\right)$  функция  $NC^*$  возрастает для любого b > 1.

4. Переменная  $k \in (-\infty, -1)$ . В этом случае J''' < 0, поэтому J'' убывает. При  $k \to -1$  производная J'' > 0, поэтому J' возрастает. При  $k \to -1$  производная  $J' \to 0$ , следовательно, J' < 0, поэтому J убывает. При  $k \to -1$  функция  $J \to 0$ , следовательно, функция J > 0, поэтому и  $\left(NC^*\right)' > 0$ . Это означает, что при  $k \in (-\infty, -1)$  функция  $NC^*$  возрастает для любого b > 1.

Таким образом, при  $k \in (-\infty, -1) \cup (-1, 0) \cup (0, \infty)$  функция  $NC^*$  возрастает для любого b > 1.

Случай №2. При k = -1 функция (2) без модуля будет иметь вид:

$$NC^{**} = \frac{x_{\text{max}}^{-1} + x_{\text{min}}^{-1}}{x_{\text{max}}^{-1} - x_{\text{min}}^{-1}} - \frac{2 \ln^{x_{\text{max}}} x_{\text{min}}}{(x_{\text{max}} - x_{\text{min}})(x_{\text{max}}^{-1} - x_{\text{min}}^{-1})} =$$

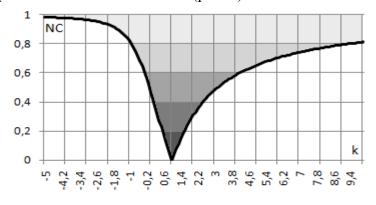
$$= \frac{b^{-1} + 1}{b^{-1} - 1} - \frac{2 \ln b}{(b - 1)(b^{-1} - 1)}.$$

Поскольку  $NC^{**} = \lim_{k \to -1} NC^*$ , то функция (2) в точке k = -1 будет непрерывна.

Учитывая, что функция (2) содержит знак модуля, можно сделать вывод, что для любого b>1 она монотонно убывает при  $k\in (-\infty,0)\cup (0,1)$  и возрастает при  $k\in (1,\infty)$ . Теорема доказана.

Из доказанной теоремы следует, что для любой положительной переменной x график функции NC от k будет представлять собой «воронку». Продемонстрируем это на конкретном примере.

*Пример*. Пусть переменная x принимает значения  $x_1 = 7,7$ ,  $x_2 = 2,9$ ,  $x_3 = 8,3$ ,  $x_4 = 4,3$ ,  $x_5 = 3$ ,  $x_6 = 4,6$ ,  $x_7 = 7,6$ ,  $x_8 = 0,3$ ,  $x_9 = 4,9$ ,  $x_{10} = 1,7$ . Для этой переменной построим график зависимости критерия нелинейности NC от k (рис. 1).



**Рис. 1.** Зависимость NC от k

Построенный на рис. 1 график будем называть «воронкой нелинейности». По нему видно, что при  $k \to \pm \infty$  критерий  $NC \to 1$ . На промежутке  $(-\infty,1)$  функция монотонно убывает, а на промежутке  $(1,\infty)$  возрастает. В точке k=1 функция достигает своего наименьшего значения NC=0. Также можно заметить, что график не является симметричным относительно прямой k=1, т.е. изменение отрицательных степеней степенной функции приводит к более резкому изменению нелинейности, чем при изменении положительных степеней. Так, например, на рис. 1 критерий NC достигает значения 0,8 на промежутке  $(-\infty,1)$  уже при k=0,92, а на промежутке  $(1,\infty)$  только при k=9,4.

При неизвестном k аддитивная степенная регрессия (1) является нелинейной, поэтому возникает проблема с её оцениванием. Для приближенного оценивания зачастую назначают некоторую область изменения степени k, разбивают полученный интервал точками, в каждой точке находят оценки параметров  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$ , и на основе заданного критерия выбирают наилучшие оценки. При этом возникают две проблемы. Первая связана с тем, как на начальном этапе назначать область изменения степени k. Вторая заключается в том, что оцененная модель может оказаться значительно нелинейной, а значит, и плохо интерпретируемой. С помощью предложенных «воронок нелинейности» можно решить обе эти проблемы, контролируя в процессе оценивания степень нелинейности модели. Причём, это работает не только для однофакторных (1), но и для многофакторных аддитивных степенных регрессий.

Рассмотрим возможный вариант контроля степени нелинейности при оценивании аддитивной степенной регрессии. Пусть в распоряжении исследователя имеется *т* объясняющих переменных. Предположим, что, исходя из своих знаний в данной предметной области, для каждой из этих переменных он может назначить степень нелинейности. Например, одни переменные должны характеризоваться слабой нелинейностью, другие — сильной, а третьи — любой. Для этого можно использовать, например, значения «слабая», «умеренная», «заметная», «высокая», «весьма высокая» из таблицы 1, которая сформирована по аналогии с применяемой в теории корреляции шкалой Чеддока [19].

Степень нелинейности	Значение критерия <i>NC</i>			
Слабая	0 - 0,2			
Умеренная	0,2-0,4			
Заметная	0,4-0,6			
Высокая	0,6-0,8			
Весьма высокая	0,8 – 1			

Таблица 1. Шкала нелинейности

Затем для каждой переменной необходимо построить «воронки нелинейности» и на основе таблицы 1 определить области изменения степеней k, после чего внутри полученных промежутков искать наилучшие с точки зрения выбранного критерия аппроксимации оценки.

На рис. 1 разные зоны нелинейности выделены своим оттенком. По этой «воронке» видно, что с ростом критерия NC область изменения параметра k меняется от точки при NC = 0 до бесконечного промежутка  $(-\infty, \infty)$  при  $NC \to 1$ . В принципе, по этому графику исследователь сам может визуально выбрать подходящую ему зону нелинейности и соответствующий ей промежуток параметра k. Для нашего примера если нелинейность:

- 1) слабая, то  $k \in (0.55, 1.57)$ ;
- 2) умеренная, то  $k \in (0.15, 0.55) \cup (1.57, 2.46)$ ;
- 3) заметная, то  $k \in (-0.29,0) \cup (0,0.15) \cup (2.46,4.2)$ ;

- 4) высокая, то  $k \in (-0.92, -0.29) \cup (4.2, 9.4)$ ;
- 5) весьма высокая, то  $k \in (-\infty, -0.92) \cup (9.4, \infty)$ .

Отметим, что если целью исследователя является интерпретация модели, то степень нелинейности для каждой переменной нужно задавать «слабой».

**2.** Исследование альтернативного подхода к оценке нелинейности модели. Возникает справедливый вопрос: можно ли использовать для измерения степени нелинейности модели (1) какой-либо другой критерий? Поэтому рассмотрим альтернативный подход к оценке степени её нелинейности. Для этого будем использовать коэффициент детерминации  $R^2$  следующей регрессионной модели:

$$x_i = \beta_0 + \beta_1 x_i^k + \varepsilon_i \,, \qquad i = \overline{1, n} \,. \tag{5}$$

По определению  $R^2$  принимает значения от 0 до 1. Очевидно, что  $R^2=1$  при k=1, т.е. когда модель (1) является линейной. Как ведет себя этот критерий при больших по абсолютной величине значениях k, неизвестно.

Коэффициент детерминации модели (5) находится по формуле:

$$\begin{split} R^2 = & \frac{\left(\overline{x \cdot x^k} - \overline{x} \cdot \overline{x^k}\right)^2}{D_x D_{x^k}} \,, \\ \text{где } & \overline{x \cdot x^k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i x_i^k \,, \ \overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \,, \ \overline{x^k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^k \,, \ D_x = \overline{x^2} - \left(\overline{x}\right)^2, \ D_{x^k} = \overline{x^{2k}} - \left(\overline{x^k}\right)^2. \end{split}$$

К сожалению, исследовать функцию  $R^2$  от k на монотонность не так просто, поскольку она будет зависеть от всех наблюдаемых значений переменной x. Например, при одинаковых значениях переменной x функция  $R^2$  будет вовсе неопределенной, поскольку дисперсия  $D_x = 0$ . Тем не менее, вывод о целесообразности её применения на практике можно сделать на основе следующих рассуждений.

Подставляя в функцию  $\mathbb{R}^2$  выражения для дисперсий и средних величин, получим равенство:

$$R^{2} = \frac{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_{i}\cdot x_{i}^{k} - \frac{1}{n^{2}}\sum_{i=1}^{n}x_{i}\sum_{i=1}^{n}x_{i}^{k}\right)^{2}}{D_{x}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_{i}^{2k} - \frac{1}{n^{2}}\left(\sum_{i=1}^{n}x_{i}^{k}\right)^{2}\right)}.$$

Найдем предел  $R^2$  при  $k \to \infty$ :

$$\lim_{k \to \infty} R^{2} = \lim_{k \to \infty} \left( x_{\max}^{k} \left( \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{i} \cdot x_{i}^{k}}{x_{\max}^{k}} - \frac{1}{n^{2}} \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{i}^{k} \sum_{i=1}^{n} x_{i}^{k}}{x_{\max}^{k}} \right)^{2} \left( D_{x} x_{\max}^{2k} \left( \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{i}^{2k}}{x_{\max}^{2k}} - \frac{1}{n^{2}} \left( \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{i}^{k}}{x_{\max}^{k}} \right)^{2} \right) \right)^{-1} = \frac{\left( \frac{1}{n} x_{\max} - \frac{1}{n^{2}} \sum_{i=1}^{n} x_{i} \right)^{2}}{D_{x} \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n^{2}} \right)} = \frac{\left( x_{\max} - \frac{1}{x} \right)^{2}}{D_{x} (n-1)}.$$

Аналогично можно доказать, что  $\lim_{k\to -\infty} R^2 = \frac{\left(x_{\min} - \overline{x}\right)^2}{D_x(n-1)}$  .

Тем самым, значения критерия  $R^2$  на плюс и минус бесконечности различны и зависят от объема n выборки. Чем больше n, тем ближе полученные пределы к нулю.

Дополнительно установлено, что 
$$\lim_{k\to 0} R^2 = \frac{\left(\overline{x\ln x} - \overline{x} \cdot \overline{\ln x}\right)^2}{D_x \left(\overline{\ln^2 x} - \left(\overline{\ln x}\right)^2\right)}$$
.

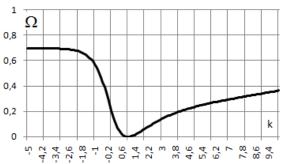
Таким образом, можно предположить, что функция  $R^2$  для любой положительной переменной x монотонно возрастает на промежутке  $(-\infty,0)\cup(0,1)$ , преодолевая в точке k=0 устранимый разрыв, и убывает на промежутке  $(1,\infty)$ . Безусловно, это предположение требует строгих математических доказательств. Однако многочисленные эксперименты подтверждают выдвинутую гипотезу.

На основе функции  $R^2$  введем следующий критерий оценки нелинейности модели (1):  $\Omega = 1 - R^2$ .

Очевидно, что область значений критерия (6) будет от 0 до 1. При k=1 он достигает своего минимального значения  $\Omega=0$ , что соответствует линейной модели. Предположительно, на промежутке  $(-\infty,0)\cup(0,1)$  функция  $\Omega$  монотонно убывает, а на промежутке  $(1,\infty)$  – возрастает. При этом

$$\lim_{k \to -\infty} \Omega = 1 - \frac{\left(x_{\min} - \overline{x}\right)^2}{D_x(n-1)}, \qquad \lim_{k \to \infty} \Omega = 1 - \frac{\left(x_{\max} - \overline{x}\right)^2}{D_x(n-1)}. \tag{7}$$

 График зависимости критерия нелинейности  $\Omega$  от k для нашего примера представлен на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость  $\Omega$  от k

График на рис. 2 согласуется с предположением о поведении функции  $\Omega$ . Так, на промежутке  $(-\infty,1)$  функция монотонно убывает, а на промежутке  $(1,\infty)$  возрастает, принимая своё минимальное значение при k=1. Нельзя не отметить схожесть полученной зависимости с зависимостью NC от k, изображенной на рис. 1, но всё же есть существенная разница. Найденные для нашего примера по формулам (7) пределы  $\lim_{k\to\infty}\Omega=0,693$ ,  $\lim_{k\to\infty}\Omega=0,756$ . Из этого следует, что, например, при k=-100000, т.е. когда аддитивная регрессия значительно нелинейная, критерий  $\Omega$  не покажет значение больше, чем 0,693. Тем самым, мы имеем усеченную «воронку нелинейности» на рис. 2. В этом плане критерий  $\Omega$  выглядит несколько ограниченным, по сравнению с NC. Тем не менее, при больших объемах n выборки пределы (7) будут примерно равны 1, поэтому график зависимости  $\Omega$  от k будет представлять собой полноценную «воронку нелинейности», которую также можно использовать для контроля степени нелинейности аддитивных степенных регрессий.

**3. Моделирование**. Для демонстрации работы предложенного математического аппарата решалась задача моделирования пассажирских железнодорожных перевозок в Иркут-

ской области. Для этого были использованы статистические данные за 2000–2020 гг. по следующим переменным:

y — отправление пассажиров железнодорожным транспортом общего пользования (тыс. человек);

 $x_1$  – число собственных легковых автомобилей на 1000 человек населения (штук);

 $x_2$  — средние потребительские цены на полет в салоне экономического класса самолета (в расчете на 1000 км пути) за декабрь (рублей).

Оцененное по этим данным уравнение множественной линейной регрессии имеет вид:

$$\tilde{y} = 42497, 5 - 134, 432 x_1 + 1,152 x_2.$$
 (8)

В выражении (8) в скобках под коэффициентами указаны значения t-критерия Стьюдента. Как видно, коэффициент при переменной  $x_1$  значим для уровня значимости  $\alpha = 0.01$ , а коэффициент при переменной  $x_2$  значим для  $\alpha = 0.05$ .

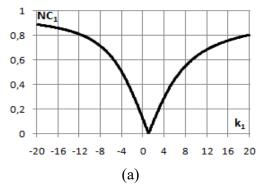
Коэффициент детерминации модели (8)  $R^2 = 0.8257$ , что позволяет сделать вывод об её хорошем качестве.

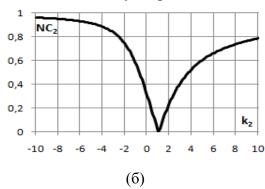
Модель (8) интерпретируется следующим образом: с увеличением числа собственных легковых автомобилей на 1000 человек населения  $x_1$  на 1 штуку (при неизменном значении переменной  $x_2$ ) отправление пассажиров железнодорожным транспортом y уменьшается примерно на 134432 человек; увеличение цены на полет в самолете  $x_2$  на 1000 рублей (при неизменном значении переменной  $x_1$ ) приводит к увеличению отправления пассажиров железнодорожным транспортом y примерно на 1152 человека.

Для оценивания неизвестных параметров аддитивной степенной регрессии

$$y_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_{i1}^{k_1} + \alpha_2 x_{i2}^{k_2} + \varepsilon_i, \qquad i = \overline{1, n},$$
 (9)

сначала были построены «воронки нелинейности» для переменных  $x_1$  и  $x_2$  (рис. 3 (a), (б)).





**Рис. 3.** «Воронки нелинейности» для переменных  $x_1$  и  $x_2$ 

Поскольку оцененная нелинейная регрессия (9) должна быть вполне интерпретируемой, то степень нелинейности для каждой переменной была выбрана на уровне между слабой и умеренной, т.е. когда критерий нелинейности NC не превосходит значения 0,3. Для этого по «воронкам нелинейности» (рис. 3 (а), (б)) были найдены области изменения степеней  $k_1$  и  $k_2$ :

$$-1,76 \le k_1 \le 4,008$$
,  $-0,01 \le k_2 \le 2,278$ . (10)

Для численного оценивания параметров аддитивной степенной регрессии (9) на языке программирования hansl эконометрического пакета Gretl была разработана специализированная программа. В её основе лежит следующий алгоритм.

- 1. Отрезки (10) разбиваются равномерно s точками. В результате получается сеть, состоящая, с учётом точек на концах отрезков, из  $(s+2)^2$  узлов.
- 2. В каждом узле сети с помощью МНК находятся оценки параметров  $\alpha_{\scriptscriptstyle 0}$  ,  $\alpha_{\scriptscriptstyle 1}$  и  $\alpha_{\scriptscriptstyle 2}$  модели (9).
  - 3. Выбирается лучшая по величине коэффициента детерминации  $R^2$  модель.

Результаты работы программы для различного числа разбиений s представлены в таблице 2.

					аолица 2.	г сзультагь	i paoorbi ii	porpammer
Реа- лиза- ция	S	Число моделей	$ ilde{k_1}$	$ ilde{k_2}$	$ ilde{lpha}_{\scriptscriptstyle 0}$	$ ilde{lpha}_{_1}$	$ ilde{lpha}_2$	$R^2$
1	10	144	-0,1869	-0,01	394385	435351	-582521	0,848023
2	50	2704	-0,1766	-0,01	383863	436116	-581243	0,848028
3	100	10404	-0,1609	-0,01	365522	440211	-579296	0,848032
4	200	40804	-0,1530	-0,01	354917	443865	-578309	0,848034
5	500	252004	-0,1367	-0,01	329623	455450	-576284	0,848035
6	1000	1004004	-0,1408	-0,01	336553	451929	-576798	0,848035
7	2000	4008004	-0,1400	-0,01	335229	452583	-576697	0,848035

Таблица 2. Результаты работы программы

452572

-576699

0,848035

Таким образом, наиболее точные оценки аддитивной степенной регрессии получены при s = 5000. При этом её уравнение имеет вид:

-0,1400

-0,01

$$\tilde{y} = 335251 + 452572 x_1^{-0.140016} - 576699 x_2^{-0.01}.$$
(11)

335251

Как видно по таблице 2, коэффициент детерминации  $R^2$  для этой модели равен 0,848035, т.е. её качество лучше, чем у линейной регрессии (8). Причем, в модели (11) значения t-критерия Стьюдента по абсолютной величине стали выше, чем у регрессии (8), т.е. в (11) усилилась значимость переменных – теперь оба коэффициента значимы для уровня значимости  $\alpha = 0.01$ .

В уравнении (11) затруднительно интерпретировать коэффициенты при переменных  $x_1$  и  $x_2$ . Однако значения критериев нелинейности для этих переменных, как и ожидалось, не превосходят величины 0,3 и составляют  $NC_1=0,1267$  и  $NC_2=0,2999$ , поэтому вместо оценок  $\tilde{\alpha}_1$  и  $\tilde{\alpha}_2$  модели (11), как отмечено в [18], можно интерпретировать коэффициенты:

$$\theta_{1} = \tilde{\alpha}_{1} \frac{x_{1,\text{max}}^{k_{1}} - x_{1,\text{min}}^{k_{1}}}{x_{1,\text{max}} - x_{1,\text{min}}}, \quad \theta_{2} = \tilde{\alpha}_{2} \frac{x_{2,\text{max}}^{k_{2}} - x_{2,\text{min}}^{k_{2}}}{x_{2,\text{max}} - x_{2,\text{min}}},$$
(12)

где  $x_{\rm l,min}$  ,  $x_{\rm l,max}$  ,  $x_{\rm 2,min}$  ,  $x_{\rm 2,max}$  — минимальные и максимальные значения переменных  $x_{\rm l}$  и  $x_{\rm 2}$  .

Найденные по формулам (12) коэффициенты  $\theta_1 = -153,166$ ,  $\theta_2 = 1,798$ . По абсолютной величине они оказались больше, чем коэффициенты линейной регрессии (8). Это ещё раз подтверждает факт усиления значимости переменных в нелинейной модели (11) по сравнению с линейной (8). Интерпретируются коэффициенты  $\theta_1$  и  $\theta_2$  таким же образом, как это было сделано выше для линейной регрессии.

Заключение. В статье проведено исследование зависимости критерия нелинейности «по площади» от степени аддитивной степенной регрессии с одной объясняющей переменной. Доказано, что график этой зависимости имеет форму воронки. При этом пределы зависимости на бесконечности равны единице. Введен термин «воронка нелинейности». Показано, каким образом с помощью «воронок нелинейности» можно контролировать при оценива-

8

5000

25020004

нии степень нелинейности аддитивных степенных регрессий. Предложен альтернативный критерий нелинейности, основанный на вычислении коэффициента детерминации модели зависимости между объясняющей переменной и той же переменной, возведенной в степень. Выдвинуто предположение о поведении этого критерия. Установлено, что этот критерий, в отличие от первого, корректно работает только на выборках большого объема. Разработанный математический аппарат может успешно применяться для решения конкретных прикладных задач анализа данных. Перспективным выглядит применение предложенных «воронок нелинейности» при оценивании аддитивных степенных регрессий со степенями в виде дискретных функций времени.

#### Список источников

- 1. Черемушкин А.В. Аддитивный подход к определению степени нелинейности дискретной функции на циклической группе примарного порядка / А.В. Черемушкин // Прикладная дискретная математика, 2013. № 2 (20). С. 26-38.
- 2. Фомичёв В.М. О степени нелинейности координатных полиномов произведения преобразований двоичного векторного пространства / В.М. Фомичёв // Дискретный анализ и исследование операций, 2021. Т. 28. № 2. С. 74-91. DOI:10.33048/daio.2021.28.700.
- 3. Коломеец Н.А. О верхней оценке нелинейности некоторого класса булевых функций с максимальной алгебраической иммунностью / Н.А. Коломеец // Прикладная дискретная математика, 2013. № 1 (19). С. 14-16.
- 4. Селиванов К.А. Анализ нелинейных искажений в радиотракте с применением различных методов оценки нелинейности / К.А. Селиванов, Н.В. Москалец, Т.В. Никитенко // Проблемы телекоммуникаций, 2011. № 2 (4). С. 150-161.
- 5. Петров А.Г. Методика оценивания степени нелинейности отклика грунта при сильных воздействиях / А.Г. Петров // Инженерная сейсморазведка и сейсмология-2020. Георадар-2020. Теперь вместе, 2020. С. 176-180.
- Trujillo-Franco L.G., Silva-Navarro G., Beltran-Carbajal F. Algebraic Parameter Identification of Nonlinear Vibrating Systems and Non Linearity Quantification Using the Hilbert Transformation / L.G. Trujillo-Franco, G. Silva-Navarro, F. Beltran-Carbajal // Mathematical Problems in Engineering, 2021, vol. 2021, DOI: 10.1155/2021/5595453.
- 7. Tan Y., Gong G., Zhu B. Enhanced criteria on differential uniformity and nonlinearity of cryptographically significant functions / Y. Tan, G. Gong, B. Zhu // Cryptography and Communications, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 291-311, DOI: 10.1007/s12095-015-0141-x
- 8. Рябов В.Г. Критерии максимальной нелинейности функции над конечным полем / В.Г. Рябов // Дискретная математика, 2021. T. 33. № 3. C. 79-91. DOI: 10.4213/dm1635
- 9. Черницов А.М. Оценивание нелинейности в задаче построения доверительных областей движения потенциально опасных астероидов, наблюдаемых в одной оппозиции / А.М. Черницов, О.М. Сюсина, В.А. Тамаров // Известия высших учебных заведений. Физика, 2014. Т. 57. № 12.
- 10. Westfall P., Arias A.L. Understanding regression analysis: a conditional distribution approach / P. Westfall, A.L. Arias Chapman and Hall/CRC, 2020, 514 p.
- 11. Arkes J. Regression analysis: a practical introduction / J. Arkes Routledge, 2019, 362 p.
- 12. Носков С.И. Построение производственной функции с постоянными пропорциями методом антиробастного оценивания / С.И. Носков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2022. № 3. С. 383-387.
- 13. Носков С.И. Анализ регрессионной модели грузооборота железнодорожного транспорта / С.И. Носков, И.П. Врублевский // Вестник транспорта Поволжья, 2020. № 1 (79). С. 86-90.
- 14. Глухов Н.И. Математическая модель динамики компьютерных преступлений / Н.И. Глухов, С.И. Носков, П.Ю. Попов // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами, 2020. № 1 (6). С. 1-8.
- 15. Носков С.И. Регрессионные модели оценки влияния экономических показателей на объемы услуг в сфере информационных и коммуникационных технологий / С.И. Носков, А.С. Вергасов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика, 2021. № 4. С. 95-103.
- 16. Базилевский М. П. Критерии нелинейности квазилинейных регрессионных моделей / М.П. Базилевский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2018. Т. 6. № 4. С. 185-195.

- 17. Базилевский М. П. Выбор оптимального соотношения между точностью и нелинейностью при построении квазилинейных регрессионных моделей / М.П. Базилевский, А.В. Караулова // Вестник кибернетики, 2021. № 4 (44). С. 63-70.
- 18. Караулова А.В. Программный комплекс построения квазилинейных регрессий по критериям точности и нелинейности / А.В. Караулова, М.П. Базилевский // Экономика. Информатика, 2022. Т. 49. № 1. С. 121-133.
- 19. Орлов А.И. Вероятностно-статистические модели корреляции и регрессии / А.И. Орлов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2020. № 160. С. 130-162.

**Базилевский Михаил Павлович,** доцент, кандидат технических наук, Иркутский государственный университет путей сообщения, AuthorID: 679277, SPIN-код: 4347-5028, ORCID: 0000-0002-3253-5697, mik2178@yandex.ru, Россия, Иркутск, Чернышевского д. 15.

**Караулова Анна Витальевна,** аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения, AuthorID: 1066413, SPIN-код: 3492-4430, anuta\_kav@mail.ru, Россия, Иркутск, Чернышевского д. 15.

UDC 519.862.6

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.015

# Study of nonlinearity criteria for additive power regressions

### Mikhail P. Bazilevskiy, Anna V. Karaulova

Irkutsk State Transport University, Russia, Irkutsk, mik2178@yandex.ru

**Abstract.** This article is devoted, first of all, to the study of the behavior of the «area» non-linearity criterion for additive power regressions with one explanatory variable depending on the degree. This criteria was examined for monotonicity and it is proved that its limits at infinity are equal to one. Based on the proved theorem, the concept of «funnel of nonlinearity» is introduced. It is shown how with the help of «nonlinearity funnels» it is possible to control the degree of nonlinearity for additive power regressions when estimating. A new criteria of non-linearity is proposed, calculated as the difference between unity and the value of the coefficient of determination in a linear regression of the dependence of the explanatory variable on the same variable raised to a power. It has been established that the proposed criterion is correct to use only on large samples.

**Keywords:** additive power regression, criteria of non-linearity, coefficient of determination, "funnel of non-linearity"

## References

- 1. Cheremushkin A.V. Additivnyy podkhod k opredeleniyu stepeni nelineynosti diskretnoy funktsii na tsiklicheskoy gruppe primarnogo poryadka [An additive approach to nonlinear degree of discrete function]. Prikladnaya diskretnaya matematika [Applied Discrete Mathematics], 2013, no. 2 (20), pp. 26-38.
- 2. Fomichev V.M. O stepeni nelineynosti koordinatnykh polinomov proizvedeniya preob-razovaniy dvoichnogo vektornogo prostranstva [On the degree of nonlinearity of the coordinate polynomials for a product of transformations of a binary vector space]. Diskretnyy analiz i issledovaniye operatsiy [Discrete Analysis and Operations Research], 2021, vol. 28, no. 2, pp. 74-91, DOI: 10.33048/daio.2021.28.700
- 3. Kolomeets N.A. O verkhney otsenke nelineynosti nekotorogo klassa bulevykh funktsiy s maksimal'noy algebraicheskoy immunnost'yu [On an upper estimate for the nonlinearity of a certain class of Boolean functions with maximum algebraic immunity]. Prikladnaya diskretnaya matematika [Applied Discrete Mathematics], 2013, no. 1 (19), pp. 14-16.
- 4. Selivanov K.A., Moskalets N.V., Nikitenko T.V. Analiz nelineynykh iskazheniy v ra-diotrakte s primeneniem razlichnykh metodov otsenki nelineynosti [Analysis of non-linear distortions in the radio path using various methods for assessing non-linearity]. Problemy telekommunikatsiy [Problems of telecommunications], 2011, no. 2 (4), pp. 150-161.
- 5. Petrov A.G. Metodika otsenivaniya stepeni nelineynosti otklika grunta pri sil'nykh vozdeystviyakh [A technique for estimating the degree of nonlinearity of the soil response under strong impacts]. Inzhenernaya seysmorazvedka i seysmologiya-2020. Geora-dar-2020. Teper' vmeste [Engineering seismic exploration and seismology-2020. Georadar-2020. Now together], 2020, pp. 176-180.
- 6. Trujillo-Franco L.G., Silva-Navarro G., Beltran-Carbajal F. Algebraic Parameter Identification of Nonlinear Vibrating Systems and Non Linearity Quantification Using the Hilbert Transformation. Mathematical Problems in Engineering, 2021, vol. 2021, DOI: 10.1155/2021/5595453.

- Tan Y., Gong G., Zhu B. Enhanced criteria on differential uniformity and nonlinearity of cryptographically significant functions. Cryptography and Communications, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 291-311, DOI: 10.1007/s12095-015-0141-x.
- 8. Ryabov V.G. Kriterii maksimal'noy nelineynosti funktsii nad konechnym polem [Criteria for the Maximum Nonlinearity of a function over a Finite Field]. Diskretnaya matematika [Discrete Mathematics], 2021, vol. 33, no. 3, pp. 79-91, DOI: 10.4213/dm1635.
- 9. Chernitsov A.M., Syusina O.M., Tamarov V.A. Otsenivanie nelineynosti v zadache po-stroeniya doveritel'nykh oblastey dvizheniya potentsial'no opasnykh asteroidov, nablyu-daemykh v odnoy oppozitsii [Nonlinearity estimation in the problem of constructing confidence regions of motion of potentially hazardous asteroids observed in one opposition]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika. [News of higher educational institutions. Physics], 2014, vol. 57, no. 12.
- 10. Westfall P., Arias A.L. Understanding regression analysis: a conditional distribution approach. Chapman and Hall/CRC, 2020, 514 p.
- 11. Arkes J. Regression analysis: a practical introduction, Routledge, 2019, 362 p.
- 12. Noskov S.I. Postroenie proizvodstvennoy funktsii s postoyannymi proportsiyami metodom antirobastnogo otsenivaniya [Construction of a production function with constant proportions by antirobast estimation method]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta [Tekhnicheskiye nauki News of the Tula State University. Technical science], 2022, no. 3, pp. 383-387.
- 13. Noskov S.I., Vrublevskiy I.P. Analiz regressionnoy modeli gruzooborota zheleznodo-rozhnogo transporta [Analysis of the regression model of railway freight turnover]. Vestnik transporta Povolzhya [Bulletin of transport of the Volga region], 2020, no. 1 (79), pp. 86-90.
- 14. Glukhov N.I., Noskov S.I., Popov P.Yu. Matematicheskaya model' dinamiki komp'yuter-nykh prestupleniy [Mathematical model of dynamics computer crimes]. Informatsionnyye tekhnologii i matematicheskoye modelirovaniye v upravlenii slozhnymi sistemami [Information technology and mathematical modeling in the management of complex systems], 2020, no. 1 (6), pp. 1-8.
- 15. Noskov S.I., Vergasov A.S. Regressionnye modeli otsenki vliyaniya ekonomicheskikh pokazateley na ob"emy uslug v sfere informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy [Regression models of assessing influence of economic indicators on amount of services in information and communication technologies]. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika [Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer science and Informatics], 2021, no. 4, pp. 95-103.
- 16. Bazilevskiy M. P. Kriterii nelineynosti kvazilineynykh regressionnykh modeley [Nonlinear criteria of quasilinear regression models]. Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii [Modeling, Optimization and Information Technologies], 2018, vol. 6, no. 4, pp. 185-195.
- 17. Bazilevskiy M. P., Karaulova A. V. Vybor optimal'nogo sootnosheniya mezhdu tochnost'yu i nelineynost'yu pri postroenii kvazilineynykh regressionnykh modeley [Selecting the optimum relationship between accuracy and non-linearity in constructing quasi-linear regression models]. Vestnik kibernetiki [Proceedings in Cybernetics], 2021, no. 4 (44), pp. 63-70.
- 18. Karaulova A.V., Bazilevskiy M.P. Programmnyy kompleks postroeniya kvazilineynykh regressiy po kriteriyam tochnosti i nelineynosti [Software complex for constructing quasi-linear regressions according to the criteria of accuracy and non-linearity]. Ekonomika. Informatika [Economics. Information technologies], 2022, vol. 49, no. 1, pp. 121-133.
- 19. Orlov A.I. Veroyatnostno-statisticheskie modeli korrelyatsii i regressii [Probability-statistical models of correlation and regression]. Politematicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University], 2020, no. 160, pp. 130-162.
- Mikhail P. Bazilevskiy, associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Irkutsk State Transport University, AuthorID: 679277, SPIN: 4347-5028, ORCID: 0000-0002-3253-5697, mik2178@yandex.ru, Russia, Irkutsk, 15 Chernyshevskogo St.
- Anna V. Karaulova, postgraduate Student, Irkutsk State Transport University, AuthorID: 1066413, SPIN: 3492-4430, anuta\_kav@mail.ru, Russia, Irkutsk, 15 Chernyshevskogo St.

Статья поступила в редакцию 20.06.2022; одобрена после рецензирования 06.09.2022; принята к публикации 19.09.2022.

The article was submitted 06/20/2022; approved after reviewing 09/06/2022; accepted for publication 09/19/2022.

УЛК 004.942

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.016

# Методика идентификации параметров модели наведения для атмосферных черенковских телескопов IACT

Журов Дмитрий Павлович $^{1,2}$ , Гресс Олег Анатольевич $^2$ , Сидоров Денис Николаевич $^{1,3}$ 

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,

Россия, Иркутск, sidney28@yandex.ru

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт прикладной физики Иркутского государственного университета, Россия, Иркутск

<sup>3</sup>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Россия, Иркутск

Аннотация. В статье рассматривается методика идентификации параметров модели наведения для атмосферных черенковских телескопов IACT по отклонениям положений изображений звезд на фокальной плоскости во время калибровочных измерений. В работе представлена модель для расчета положения телескопа по показаниям датчиков и оценки угла поворота фокальной плоскости. Для идентификации параметров предлагается использовать градиентные методы оптимизации с начальным приближением, полученным из линейной регрессии в предположении малого угла вращения фокальной плоскости, с последующим уточнением параметров модели по апостериорным распределениям вероятностей, полученных методом Монте-Карло с Марковскими цепями. Приводится результаты тестирования методики на модельных данных, подход позволяет надежно получить точные оценки параметров.

**Ключевые слова:** атмосферные черенковские телескопы, IACT, модель наведения, идентификация параметров

**Цитирование:** Журов Д.П. Методика идентификации параметров модели наведения для атмосферных черенковских телескопов ІАСТ / Д.П. Журов, О.А. Гресс, Д.Н. Сидоров // Информационные и математические технологии в науке и управлении. — 2022. — № 3(27). — С. 174-183. — DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.016.

Введение. Атмосферные черенковские телескопы IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope) предназначены в первую очередь для наземной гамма астрономии и физики космических лучей. Они позволяют регистрировать слабые короткие вспышки черенковского света от широких атмосферных ливней (ШАЛ) – вторичных каскадов, образованных гамма квантами и космическими лучами высоких энергий. Телескопы IACT имеют альт-азимутальную монтировку и представляют собой рефлектор с установленной в фокусе чувствительной камерой с быстрой электроникой, способной регистрировать наносекундные вспышки черенковского излучения от ШАЛ[1]. Телескопы ІАСТ активно используются в существующих экспериментах, таких, как MAGIC[2], HESS[3], VERITAS[4]. Также ведется строительство новых экспериментальных комплексов, которые будут покрывать большие эффективные площади и способны регистрировать гамма-излучение выше 100 ТэВ. К таким комплексам относится эксперимент Cherenkov Telescope Array (CTA) [5], который будет включать больше 100 телескопов IACT разного размера, а также эксперимент TAIGA[6], использующий гибридный подход к регистрации ШАЛ. Пилотный комплекс TAIGA располагается в 50 км от озера Байкал в Тункинской долине (республика Бурятия, Россия), и на 2022 год включает в себя 3 телескопа TAIGA-IACT, работающих совместно с установкой TAIGA-HiSCORE и TAIGA-Muon [7].

Механические неточности в конструкции и ее деформация под действием силы тяжести вызывают неточности в наведении телескопа и приводят к ошибкам в определении положения источников на камере. Наиболее значимыми причинами неточностей являются смещения нуля датчиков положения, небольшие наклоны телескопа, отклонения от перпендикулярности оси высоты относительно оптической оси телескопа, отклонения от перпендикулярности оси высоты относительно азимутальной оси и деформации конструкции телескопа

под действием гравитации. Для достижения более высокой точности определения направления телескопа по датчикам положения и исправления этих эффектов для телескопов используется модель наведения (анг. pointing model). Распространенным подходом для моделирования наведения является введение функций поправок, которые добавляются к показаниям датчиков, что позволяет получить более точные оценки:

$$\phi_t^* = \phi_e + \Delta \phi(\phi_e, \theta_e, \vec{p}_{pm}), 
\theta_t^* = \theta_e + \Delta \theta(\phi_e, \theta_e, \vec{p}_{pm}),$$
(1)

где  $\phi_t^*, \theta_t^*$  оценка направления телескопа,  $\phi_e, \theta_e$  показания датчиков положения,  $\Delta \phi, \Delta \theta$  — функции поправок,  $\vec{p}_{pm}$  вектор параметров модели наведения. Для простой 7 параметрической модели наведения функции поправок выглядят следующим образом:

$$\Delta\phi(\phi_e, \theta_e) = \phi_{offset} - \tau_{north} sin(\phi_e) tg(\theta_e) - \tau_{east} cos(\phi_e) tg(\theta_e) + \\ + \psi_{noe} sec(\theta_e) - \psi_{nae} tg(\theta_e),$$
 (2)

$$\Delta\theta(\phi_e, \theta_e) = \theta_{offset} - \tau_{north}cos(\phi_e) + \tau_{east}sin(\phi_e) - \beta cos(\theta_e), \tag{3}$$

где  $\phi_{offset}$  и  $\theta_{offset}$ — смещения нуля датчиков положения, $\tau_{north}$ и  $\tau_{east}$ — наклоны телескопа на север и восток,  $\psi_{noe}$  — отклонение от перпендикулярности оси высоты относительно оптической оси телескопа,  $\psi_{nae}$  — отклонения от перпендикулярности оси высоты относительно азимутальной оси,  $\beta$  — деформации конструкции под действием гравитации. Вывод функций поправок может быть найден, например, в [8]. Вектор  $\vec{p}_{pm}$  может быть расширен дополнительными параметрами, как, например, в [9,10]. Этот подход достаточно прост и легко расширяем, что позволяет подобрать оптимальную модель для различных телескопов.

Однако метод имеет ряд недостатков [11], среди которых то, что он плохо работает на углах, близких к зениту и не позволяет рассчитать угол вращения фокальной плоскости, который может быть существенным на больших высотах в случае значительных наклонов телескопа и отклонений от перпендикулярности осей. Например, при небольшом наклоне телескопа на  $\tau = 0.2^o$  при зенитном угле  $10^o$  значение угла поворота будет меняться в диапазоне от  $0^o$  до  $1.4^o$ . Компьютерная модель [11] или [12] лишена этих недостатков.

Определение параметров модели наведения проводится по отклонениям положения изображения известных ярких звезд от центра камеры телескопа. Зависимостью угла поворота фокальной плоскости от положения телескопа можно пренебречь, если параметры  $\tau_{north}$ ,  $\tau_{east}$ ,  $\psi_{noe}$  и  $\psi_{nae}$  достаточно малы (что справедливо для многих телескопов) и положения звезд во время измерений не сильно отклоняются от центра камеры. Используя эти предположения, по отклонению звезды можно оценить направление телескопа и получить параметры модели наведения. Перспективным методом определения параметров является метод Монте-Карло с Марковскими цепями (МСМС), представленный для модели наведения (1) в работе [13].

В данной работе предлагается использовать компьютерную модель телескопа, учитывающую эффект вращения фокальной плоскости, а для идентификации параметров использовать МСМС. Это позволяет получить точные оценки параметров модели для телескопов с большими значениями параметров наклона и отклонения от перпендикулярности осей, даже по данным с большим отклонением изображений звезд от центра камеры во время измерений.

Математические модели, использованные в данной работе, опубликованы авторами статьи в [12], также кратко представлены в первом разделе для ясности изложения. Во втором разделе рассмотрена процедура проведения калибровочных измерений. В третьем разделе описана предлагаемая методика идентификации модели наведения. В четвертом разделе описано исследование эффективности предложенного метода на основе модельных данных.

- **1. Модель телескопа.** Модель телескопа состоит из математической модели камеры и модели наведения. Введем систему координат, где ось x в пространстве направлена на север, ось y на восток, z в зенит, угол  $\phi$  отсчитывается по часовой стрелке, т.е. от севера на восток, угол  $\theta$  отсчитывается от горизонта.
- **1.1. Математическая модель камеры телескопа.** При наблюдении удаленных источников, переходя к сферической системе координат, математическую модель камеры можно записать как [12]:

$$z \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ 1 \end{bmatrix} = KR_{\vec{v}_z} (\alpha_c) R_{\vec{v}_y} \left( \theta_t - \frac{\pi}{2} \right) R_{\vec{v}_z} (-\phi_t) \begin{bmatrix} \cos(\phi_s) \cos(\theta_s) \\ \sin(\phi_s) \cos(\theta_s) \\ \sin(\phi_s) \end{bmatrix}, \tag{4}$$

где  $x_s, y_s$ — положение проекции объекта на фокальной плоскости, z - масштабный коэффициент,  $K \in R^{3\times3}$  — матрица внутренней калибровки камеры,  $R_{\vec{v}_y}(\psi), R_{\vec{v}_z}(\psi)$  — матрицы вращения вокруг соответствующих осей на заданный угол  $\psi$ , углы  $\phi_s$  и  $\theta_s$  — положение источника по азимуту и высоте,  $\phi_t$  и  $\theta_t$  — направление телескопа,  $\alpha_c$  — угол поворота фокальной плоскости. Угол  $\alpha_c$  зависит от положения телескопа из-за возможных неточностей конструкции (небольшие отклонения от перпендикулярности осей, небольшие наклоны телескопа).

**1.2. Модель наведения.** Опишем телескоп в предположении небольших наклонов телескопа ( $au_{north}$  и  $au_{east}$ ), а также отклонения от перпендикулярности оси высоты относительно оптической и азимутальной осей ( $\psi_{noe}$  и  $\psi_{nae}$ ), тогда ось азимута может быть описана как:

$$\vec{a} = R_{\vec{v}_v}(\tau_{north})R_{\vec{v}_x}(\tau_{east})\vec{v}_z, \tag{5}$$

где  $\vec{v}_x$ ,  $\vec{v}_y$ ,  $\vec{v}_z$  — единичные вектора, направленные вдоль осей x, y и z соответственно,  $\vec{a}$  — ось азимута,  $R_{\vec{v}}(\varphi)$  — матрица поворота на угол  $\varphi$  вокруг вектора  $\vec{v}$  против часовой стрелки смотря в направлении вектора  $\vec{v}$  (запись и вывод этой матрицы можно найти в [14, с. 257]). Ось высоты  $\vec{e}$  аналогично может быть описана как:

$$\vec{e} = -R_{\vec{v}_y} \left( \tau_{north} \right) R_{\vec{v}_x} \left( \tau_{east} + \psi_{nae} \right), \tag{6}$$

а направление  $\vec{t}_0$  телескопа при заданных осях:

$$\vec{t}_0 = R_{\vec{v}_y} \left( \tau_{north} \right) R_{\vec{v}_x} \left( \tau_{east} + \psi_{nae} \right) R_{\vec{v}_z} \left( \psi_{noe} \right) \vec{v}_x. \tag{7}$$

Тогда направление телескопа  $\vec{t}$  при повороте по осям для идеально жесткой конструкции можно описать как:

$$\vec{t} = R_{\vec{a}}(\phi_{int})R_{\vec{e}}(\theta_{int})\vec{t}_0, \tag{8}$$

где  $\phi_{int} = \phi_e + \phi_{offset}$  и  $\theta_{int} = \theta_e + \theta_{offset}$  – внутренние координаты телескопа, такие что при  $(\phi_{int}, \theta_{int}) = (0,0)$ ,  $\vec{t} = \vec{t}_0$ . Углы азимута и высоты определяются из вектора  $\vec{t}$  соответственно:

$$\phi_t = arctg2(\vec{t}_y, \vec{t}_x), \quad \theta_{tno\beta} = \frac{\pi}{2} - arccos(\frac{\vec{t}_z}{|\vec{t}|}).$$
 (9)

Для учета эффекта прогиба конструкции введем параметр  $\beta$ , угол высоты телескопа определим как:

$$\theta_t = \theta_{tno\beta} + \beta \cos(\theta_{tno\beta}). \tag{10}$$

**1.3. Расчета угла поворота фокальной плоскости.** Для расчета угла поворота  $\alpha_c$  фокальной плоскости возьмем вектор  $\vec{g}_0$  как проекцию вектора  $-\vec{v}_z$ , на плоскость с нормалью  $\vec{t}_0$ (из (7)):

$$\vec{g}_0 = (\vec{v}_z \cdot \vec{t}_0)\vec{t}_0 - \vec{v}_z,\tag{11}$$

тогда угол  $\alpha_c$  поворота камеры рассчитывается, как угол:

$$\alpha_c = \angle \left( R_{\vec{a}}(\phi_{int}) R_{\vec{e}}(\theta_{int}) \vec{g}_0, (\vec{v}_z \cdot \vec{t}) \vec{t} - \vec{v}_z \right) + \alpha_{c0}, \tag{12}$$

где  $\alpha_{c0}$  — поворот системы координат фокальной плоскости в положении телескопа  $\vec{t}_0$ ,  $\vec{t}$  — направление телескопа из (8).

2. Методика проведения измерений. В отличие от оптических и радио телескопов проведение измерений для калибровки наведения IACT непосредственно с помощью камеры затруднительно. Поэтому современные IACT оснащаются ССD камерами, которые крепятся к конструкции телескопа и отслеживают положение звезд и камеры телескопа, по периметру которой располагаются позиционные светодиоды. На фокальной плоскости располагается белый экран, на который фокусируется свет от звезд, отраженный от рефлектора (примеры изображений можно найти в [15,16]). Однако в области экрана на ССD могут быть видны лишь достаточно яркие звезды, например, для телескопов TAIGA-IACT звезды ярче 3 звездной величины, что накладывает ограничения на выбор источников, а также означает, что крайне редко возможно наблюдать несколько источников одновременно на одном снимке.

Измерения, необходимые для определения параметров модели наведения, проводятся в ясные ночи с развернутым экраном. Телескоп наводится последовательно на ряд известных ярких источников и меняя цели после получения серии снимков ССD камеры, на которых видны калибровочные светодиоды и сфокусированное на экран изображение источника, в момент снимка сохраняются показания датчиков положения. Из снимков извлекаются данные о положении объектов и определяется положение пятна от звезды в координатах на фокальной плоскости  $(x_c, y_c)$ .

**2.1. Алгоритм выбора источников.** Для проведения калибровочных измерений предлагается выбрать множество C из n звезд из звездного каталога K, |C| = n,  $C \subset K$ , таким образом, чтобы они максимально покрыли наблюдаемую телескопом область неба за заданный промежуток времени. Пусть  $T_i$  — траектория движения звезды за заданный промежуток времени. Обозначим область на сфере, которая может быть наблюдаема за O, а область, которая может быть промерена за заданный промежуток времени при наблюдении -ого источника из каталога как  $A_i$ ,  $A_i \subset O$ . Пусть точка  $p \in O$ , будем считать, что  $p \in A_i$ , если  $\exists z \in T_i$ , такая, что  $|p-z| \le d$ , где d — максимальное расстояние от траектории, при которой область считается промеренной. Чтобы найти оптимальное множество C, необходимо решить оптимизационную задачу:

$$S(\bigcup_{i \in C} A_i) \to \max_{C \subset K}$$
 (13)

где S — обозначает функцию расчета площади области. Численно оценить площадь области можно используя решетки Фибоначчи на сфере [17], где сфера разбивается на 2N+1 точек, таких, что:

$$\phi_i = 2\pi i \Phi^{-1},$$

$$\theta_i = \arcsin\left(\frac{2i}{2N+1}\right),$$
(14)

где  $\phi_i$  и  $\theta_i$  – углы азимута и высоты,  $\Phi$  – золотое число, равное  $(\sqrt{5}+1)/2$ , i – номер точки на решетке Фибоначчи. Это разбиение, достаточно близкое к равномерному [17]. Обозначив множество точек решетки за P, площадь области M на сфере можно оценить, как:

$$S(M) = 4\pi \frac{|P \cap M|}{|P|}.\tag{15}$$

При решении задачи (13) гиперпараметр d стоит выбирать достаточно большим, чтобы траектории, лежащие близко друг к другу, вместе давали малый вклад в целевую функцию, и в то же время не сильно большим, чтобы не достигать значения S(0).

Решить задачу (13) можно используя генетический алгоритм [18].

**2.2.** Генетический алгоритм для выбора источников. Авторами статьи использовалась следующая реализация генетического алгоритма для нахождения оптимального множества источников из звездного каталога. На начальном этапе выбирается начальная популяция

из m наборов источников  $C_i^{(0)} \subset K$ ,  $|C_i^{(0)}| = n$ ,  $i \in [1, m]$ , где элементы  $C_i$  выбираются случайным образом, вероятность выбора элементов одинакова. Далее в цикле выполняются следующие шаги, номер итерации обозначим как p, наборы источников на итерации p как  $C_i^{(p)}$ :

- 1. Скрещивание. Случайным образом выбирается  $\lfloor \sqrt{m}m \rfloor$  пар  $(l_j^{(1)}, l_j^{(2)}), \quad l_j^{(1)} \neq l_j^{(2)}, \quad l_j^{(1)} \neq l_j^{(2)}, \quad l_j^{(1)} \in [1, m], \ l_j^{(2)} \in [1, m], \ j \in [1, \lfloor \sqrt{m}m \rfloor],$  и проводится скрещивание  $C_{l_j^{(1)}}^{(p-1)}$  и  $C_{l_j^{(2)}}^{(p-1)}$ . На выходе имеем множества  $C_j^* \subset C_{l_j^{(1)}}^{(p-1)} \cup C_{l_j^{(2)}}^{(p-1)}, \ |C_j^*| = n,$  элементы множества  $C_j^*$  выбираются случайным образом из  $C_{l_j^{(1)}}^{(p-1)} \cup C_{l_j^{(2)}}^{(p-1)},$  причем вероятность выбора элемента из  $C_{l_j^{(1)}}^{(p-1)} \cap C_{l_j^{(2)}}^{(p-1)}$  выше, чем из  $C_{l_j^{(1)}}^{(p-1)} \Delta C_{l_j^{(2)}}^{(p-1)},$  где  $\Delta$  симметрическая разность.
- 2. Мутация. С вероятностью  $\rho_{mut}$  в множестве источников  $C_j^*$  один из элементов заменяется на случайный элемент из множества  $K \setminus C_i^*$ .
- 3. Оценивается целевая функция для каждого полученного набора источников  $\mathbf{C}_{j}^{*}$  по формуле (15).
- 4. Селекция. Из полученных  $\lfloor \sqrt{m}m \rfloor$  множеств  $C_j^*$  методом ранжирования выбирается m, которые составят популяцию итерации p (множества источников  $C_i^{(p)}$ ).

После выполнения заданного количества итераций в качестве оптимального множества источников из всех популяций выбирается такое, у которого максимальное значение целевой функции.

**3 Идентификация параметров модели.** Функция правдоподобия для параметров  $\vec{p}_{pm}$  в предположении, что остатки предсказанных и измеренных положений источников на фокальной плоскости распределены по нормальному закону распределения:

$$L(\vec{p}_{pm}, \sigma \mid \vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n) = \prod_{i=1}^n (2\pi\sigma^2)^{-1} exp\left(-\frac{1}{2} \frac{\left|\vec{x}_i - \vec{x} \left(\vec{t}(\vec{e}_i, \vec{p}_{pm}), \vec{s}_i, \alpha(\vec{e}_i, \vec{p}_{pm})\right)\right|^2}{\sigma^2}\right), \tag{16}$$

где  $\vec{x}_i = (x_{s,i}, y_{s,i})$  — измеренные положения изображения звезды на фокальной плоскости; функцией  $\vec{x}(\phi_t, \theta_t, \phi_s, \theta_s, \alpha)$  обозначен расчет координат  $(x_c, y_c)$  по модели камеры (4),  $\vec{t}(\vec{e}_i, \vec{p}_{pm})$  обозначает функцию расчета направления телескопа  $(\phi_t, \theta_t)$  по показаниям датчиков положения  $\vec{e} = (\phi_e, \theta_e)$ ,  $\vec{s}_i = (\phi_s, \theta_s)$  — направление на источник,  $\alpha(\vec{e}_i, \vec{p}_{pm})$  — расчет угла поворота фокальной плоскости.

Как известно, нахождение максимума функции правдоподобия (28) соответствует решению задачи минимизации:

$$\sum_{i=1}^{n} \left| \vec{x}_i - \vec{x} \left( \vec{t} \left( \vec{e}_i, \vec{p}_{pm} \right), \vec{s}_i, \alpha \left( \vec{e}_i, \vec{p}_{pm} \right) \right) \right|^2 \to \min_{\vec{p}_{pm}} . \tag{17}$$

Для идентификации параметров модели предлагается следующий алгоритм:

- 1. Определить начальное приближение параметров модели  $\vec{p}_{pm}^{(0)}$ , для чего воспользоваться методами линейной регрессии, используя функции поправок (2) и (3). Для этого необходимо оценить направление телескопа, что можно сделать в предположении малой зависимости угла поворота фокальной плоскости  $\alpha$  и принять его равным  $\alpha_0$ .
- 2. Уточнить значения параметров модели  $\vec{p}_{pm}^{(1)}$ , решив оптимизационную задачу (17) градиентными методами минимизации с начальным приближением  $\vec{p}_{pm}^{(0)}$ .

3. Используя МСМС, вычислить апостериорное распределение вероятностей параметров модели с начальным значением  $\vec{p}_{pm}^{(1)}$ , принять медианное значение за оптимальное значение параметров  $\vec{p}_{nm}^{(2)}$ .

В качестве априорного распределения параметров в данной работе использовалось равномерное. Аналогично предложенному Г. Шпенглером и У. Шванке в [13] методу идентификации параметров модели наведения, в качестве априорного распределения параметров может быть выбрано распределение Лапласа, а для уменьшения чувствительности к выбросам в качестве функции правдоподобия может быть использовано распределение Стьюдента с добавлением параметра числа степеней свободы  $\nu$ .

**4. Тестирование метода на модельных данных.** Для тестирования работы методики использовалась программная реализация модели камеры и модели наведения (раздел 1). Случайным образом сгенерированы 1500 моделей телескопов с различными векторами параметров  $\vec{p}_{pm}^{(true)}$ , значения которых распределены нормально со случайно выбранным стандартным отклонением из  $\{0.025^o, 0.05^o, 0.1^o, 0.2^o, 0.4^o, 0.6^o\}$ . Таким образом в набор включены модели, в которых присутствуют сильная зависимость параметра угла поворота  $\alpha$  от положения телескопа (до  $15^o$  по абсолютной величине на высоте  $\theta = 80^o$ ).

Для получения плана измерений использовался алгоритм, описанный в разделе  $2.1\ c$  параметрами  $d=5^o,\ n=17,\$ звездная величина для выбора источников не превышала  $3,\$ время набора данных для наведения 8 часов. Получены 12 планов наблюдения для некоторого дня каждого месяца.

Для каждой модели имитировался процесс измерений с начальной калибровкой  $\vec{p}_{pm}^{(init)}$ , в которой все параметры равны 0, кроме параметров  $\phi_{offset}$  и  $\theta_{offset}$ , распределенных нормально со смещением  $\phi_{offset}^{(init)}$  и  $\theta_{offset}^{(init)}$  соответственно и стандартным отклонением 0,4. Телескоп наводился последовательно, перенаводясь между источниками каждые 2 минуты, таким образом, за 8 часов получалось 240 точек. Показания датчиков ( $\phi_e, \theta_e$ ) рассчитывались используя обратное преобразование и параметры  $\vec{p}_{pm}^{(init)}$ . Для имитации ошибок измерений к показаниям датчиков добавлялась случайная величина с  $\sigma_e = 0.003^o$ . Истинные направления ( $\phi_t^{(true)}, \theta_t^{(true)}$ ) рассчитывались, исходя из параметров  $\vec{p}_{pm}^{(true)}$ . Используя модель камеры, рассчитывалось положение источника ( $x_s^{(true)}, y_s^{(true)}$ ), к которому прибавлялась случайная ошибка со стандартным отклонением  $\sigma_s$ , выбранным из  $\{0.006^o, 0.012^o, 0.024^o, 0.036^o\}$ . В результате получены выборки для проверки метода, которые включают показания датчиков  $\vec{e}_i = (\phi_{e,i}, \theta_{e,i})$ , направление на источник  $\vec{s}_i = (\phi_{s,i}, \theta_{s,i})$  и положение источника на фокальной плоскости  $\vec{x}_i = (x_{s,i}, y_{s,i})$ .

По полученным данным определены параметры модели согласно алгоритму, описанному в разделе 3, и получены параметры  $\vec{p}_{pm}^{(0)}, \vec{p}_{pm}^{(1)}, \vec{p}_{pm}^{(2)}$ . Для нахождения параметров градиентными методами и вычисления апостериорного распределения вероятностей параметров модели мы используем библиотеку lmfit и emcee, которая реализует аффинный инвариантный семплер[19]. В качестве алгоритма оптимизации для задачи (17) использовался 'L-BFGS-B'. Нахождение параметров модели и построение апостериорного распределения вероятностей в нашей реализации на процессоре Intel Core i5 занимали около 3 минут.

Для оценки качества полученных моделей  $\vec{p}_{pm}^{(1)}$  и  $\vec{p}_{pm}^{(2)}$  проводилось сравнение их предсказаний с исходной моделью  $\vec{p}_{pm}^{(true)}$ , для чего генерировались равномерная сетка T из N точек  $(\phi_{t,i},\theta_{t,i})$ , для нее по модели  $\vec{p}_{pm}^{(true)}$  определялись показания датчиков  $(\phi_{e,i},\theta_{e,i})$ , по ко-

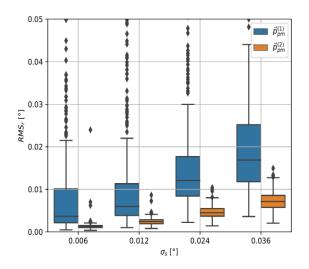
торым оценивалось направление телескопа  $(\phi_{t,i}^{(j)}, \theta_{t,i}^{(j)})$  по -ой модели  $\vec{p}_{pm}^{(j)}, j \in \{1,2\}$ . Отклонение предсказанного значения от исходной модели выражается как:

$$r_{i}^{(j)} = \arccos\left(\cos\left(\theta_{t,i}\right)\cos\left(\theta_{t,i}^{(j)}\right)\cos\left(\phi_{t,i} - \phi_{t,i}^{(j)}\right) + \sin\left(\theta_{t,i}\right)\sin\left(\theta_{t,i}^{(j)}\right)\right). \tag{18}$$

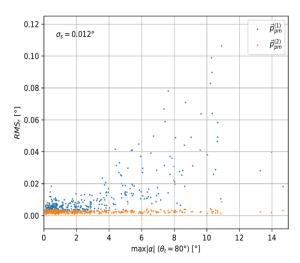
Оценку качества -ой модели выразим как среднеквадратичное значение  $r_i$ :

$$RMS_r^{(j)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n r_i^{(j)}}{N}}. (19)$$

На рисунке 1 представлена диаграмма размаха значений  $RMS_r$  для модели  $\vec{p}_{pm}^{(1)}$ , полученной методом градиентного спуска, и модели  $\vec{p}_{pm}^{(2)}$ , значение параметров которой уточнено по апостериорному распределению вероятностей, полученному методом МСМС. Из графиков видно, что модели, полученные последним методом, оценивают направление телескопа значительно точнее. Большое количество моделей с параметрами  $\vec{p}_{pm}^{(1)}$  определены неточно, что происходит в основном для грубых монтировок, для которых наблюдается значительная зависимость угла поворота фокальной плоскости. На рисунке 2 представлена диаграмма рассеивания для моделирования с  $\sigma_s = 0.012^o$ , из которой видно, что основная часть не успешно определенных градиентным методом моделей были получены для телескопов, у которых максимальное абсолютное значение угла поворота  $\alpha$  на высоте  $80^o$  выше  $4^o$ . Однако модели с уточненными с помощью МСМС параметрами отлично работают даже для таких монтировок.



**Рис. 1.** Диаграмма размаха значений  $RMS_r$  для моделей, полученных на 2 и 3 шаге идентификации параметров



**Рис. 2.** Диаграмма рассеивания значений  $RMS_r$  в зависимости от максимального абсолютного значения угла поворота  $\alpha$  на высоте  $80^o$  при  $\sigma_s = 0.012^o$ 

Заключение. В работе кратко представлена математическая модель телескопа (раздел 1), состоящая из модели камеры и модели наведения, которая позволяет учесть неточности конструкции. Описана процедура проведения калибровочных измерений, необходимых для набора данных, по которым проводится идентификация параметров модели наведения (раздел 2). Предложен алгоритм нахождения оптимального набора источников для калибровки. Представлен алгоритм идентификации параметров модели наведения (раздел 3), авторами предложено комбинировать применение МСМС и использование модели наведения с расчетом угла поворота вращения фокальной плоскости, что позволяет получить хорошие оценки параметров, даже при проведении калибровочных измерений с грубым начальным прибли-

жением и сильной зависимостью угла поворота фокальной плоскости от положения телескопа. Эффективность работы предложенной методики протестирована на модельных данных (раздел 4).

Оценка параметров градиентным методом оптимизации для монтировок с сильной зависимостью значение угла поворота  $\alpha$  от положения телескопа работает ненадежно, что может быть связана с неудачно выбранным начальным приближением и наличием локальных минимумов в окрестности решения и/или сильной корреляцией между параметрами. Однако последующее вычисление апостериорное распределение вероятностей параметров модели метод Монте-Карло с Марковскими цепями позволяет уточнить модель и получить надежные оценки параметров. Для применения на реальных данных может потребоваться учесть дополнительные эффекты, что может быть выполнено добавлением функции коррекции вида (1) с дополнительными параметрами после вычисления направления телескопа по алгоритму из раздела 1.2.

**Благодарности.** Работа выполнена на УНУ «Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ», поддержана Минобрнауки России (соглашение 13.УНУ.21.0007, гос. задание FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024), РНФ (проект 19-72-20067, раздел 3), РФФИ (проект № 19-52-44002).

#### Список источников

- Holder J. Atmospheric cherenkov gamma-ray telescopes. The WSPC handbook of astronomical instrumentation, Volume 5, Gamma-Ray and Multimessenger Astronomical Instrumentation. World Scientific, 2021, pp. 117– 136. DOI: 10.1142/9789811203817\_0006
- 2. Cortina J. Status and first Results of the magic telescope. Astrophysics and Space Science, 2005, June, vol. 297, no. 1, pp. 245–255, DOI: 10.1007/s10509-005-7627-5.
- 3. Hinton J. The status of the HESS project. New Astronomy Reviews, 2004, vol. 48, no. 5, pp. 331–337, DOI: 10.1016/j.newar.2003.12.004
- 4. Holder J., Atkins R.W., Badran H.M. et al. The first VERITAS telescope. Astroparticle Physics, 2006, vol. 25, no. 6, pp. 391–401, DOI: 10.1016/j.astropartphys.2006.04.002
- 5. Acharya B., Actis M., Aghajani T. et al. Introducing the CTA concept. Astroparticle Physics, 2013, vol. 43, pp. 3–18. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2013.01.007
- 6. Budnev N., Astapov I., Bezyazeekov P. et al. TAIGA an advanced hybrid detector complex for astroparticle physics and high energy gamma-ray astronomy in the Tunka. Journal of instrumentation, 2020, Sept., vol. 15, no. 9, DOI: 10.1088/1748-0221/15/09/C09031.
- 7. Budnev N., Astapov I., Bezyazeekov P. et al. TAIGA—an innovative hybrid array for high energy gamma astronomy, cosmic ray physics and astroparticle physics. Physics of Atomic Nuclei, 2021, vol. 84, no. 3, pp. 362–367, DOI: 10.1134/S1063778821030078.
- 8. Condon J. GBT pointing equations. GBT tech. Memo. 75, NRAO, 1992, available at https://library.nrao.edu/public/memos/gbt/GBT\_075.pdf.
- 9. Wallace P. TPOINT-Telescope pointing analysis system. Starlink User Note. 1994, vol. 100, available at: https://sites.astro.caltech.edu/~srk/TP/Literature/Tpoint\_SunWorks.pdf.
- 10. Lew B. Improving pointing of Toruń 32-m radio telescope: effects of rail surface irregularities. Experimental Astronomy, 2018, vol. 45, no. 1, pp. 81–105, DOI: 10.1007/s10686-018-9573-6.
- 11. Wallace P. Rigorous algorithm for telescope pointing. Advanced telescope and instrumentation control software II, vol. 4848, International Society for Optics, Photonics, 2002, pp. 125–136, DOI: 10.1117/12.460914.
- 12. Журов Д. П. Моделирование для наведения атмосферных черенковских телескопов в эксперименте ТАІ-GA / Д.П. Журов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Математическое моделирование и программирование», 2021. Т. 14. № 4. С. 106–111. DOI: 10.14529/mmp210409
- 13. Spengler G., Schwanke U., Zhurov D. CTbend: A Bayesian open-source framework to model pointing corrections of Cherenkov telescope. Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference, PoS(ICRC2021), vol. 395, 2021, pp. 699, DOI: 10.22323/1.395.0699.
- 14. Cole Ian R. Modelling CPV. Loughborough University. Thesis, 2015, available at: https://hdl.handle.net/2134/18050.
- 15. Bretz T., Dorner D., Wagner R.M. et al. The drive system of the major atmospheric gamma-ray imaging Cherenkov telescope. Astroparticle Physics. 2009, vol. 31, no. 2, pp. 92–101, DOI: 10.1016/j.astropartphys.2008.12.

- 16. Zhurov D., Gress O.A, Lukyantsev D.S. et al. TAIGA-IACT pointing control and monitoring software status. Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference, PoS(ICRC2021), vol. 395, 2021, pp. 690, DOI: 10.22323/1.395.0690.
- 17. González Á. Measurement of areas on a sphere using Fibonacci and latitude–longitude lattices. Mathematical Geosciences 2010, vol. 42, no. 1, pp. 49-64, DOI: 10.1007/s11004-009-9257-x.
- 18. Katoch S., Chauhan S.S., Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future. Multimedia Tools and Applications, vol.80, no.5, 2021, pp. 8091-8126, DOI: 10.1007/s11042-020-10139-6.
- 19. Goodman J., Weare J. Ensemble samplers with affine invariance. Communications in applied mathematics and computational science, 2010, vol. 5, no. 1, pp. 65-80, DOI: 10.2140/camcos.2010.5.65.

**Журов Дмитрий Павлович,** аспирант ИРНИТУ, м.н.с. НИИПФ ИГУ, SPIN-код: 6071-7716, AuthorID: 1078130, ORCID: 0000-0002-1596-8829, sidney28@yandex.ru, Россия, Иркутск, бульвар Гагарина, 20.

**Гресс Олег Анатольевич,** с.н.с. НИИПФ ИГУ, SPIN-код: 5709-7523, AuthorID: 23235, ORCID: 0000-0002-5070-0836, grol08@rambler.ru, Россия, Иркутск, бульвар Гагарина, 20.

Сидоров Денис Николаевич, доктор ф.-м. н., проф. РАН, зав. лаб. промышленной математики ИРНИ-ТУ, г.н.с. отдела прикладной математики Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, SPIN-код: 6049-9314, AuthorID: 14218, ORCID: 0000-0002-3131-1325, contact.dns@gmail.com, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

UDC 004.942

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.016

# Technique for pointing model parameters estimation for imaging atmospheric Cherenkov telescopes

Dmitriy P. Zhurov<sup>1,2</sup>, Oleg A. Gress<sup>2</sup>, Denis N. Sidorov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University, Russia, Irkutsk, sidney28@yandex.ru

**Abstract.** The article discusses a technique to estimate parameters of a pointing model for atmospheric Cherenkov telescopes (IACT) by deviations of image positions of stars on the focal plane during calibration measurements. The model for calculation of the telescope position and estimation of the focal plane rotation angle using shaft encoders readouts are presented. To estimate the parameters, it is proposed to use gradient optimization methods with an initial approximation obtained from linear regression under the assumption of a small focal plane rotation angle, followed by a posterior probability distributions calculation using Markov chain Monte Carlo method to precise the parameters. Results of technique tests on simulated data are presented, the approach allows to obtain robust estimates of the parameters.

Keywords: imaging atmospheric Cherenkov telescopes, IACT, pointing model, parameters estimation

**Acknowledgements:** The work was performed at the UNU "Astrophysical Complex of MSU-ISU» (agreement 13.UNU.21.0007), supported by the Russian Federation Ministry of Science and High Education (projects FZZE-2020-0017, FZZE-2020-0024), the Russian Science Foundation (grant 19-72-20067, section 3), Russian Foundation for Basic Research (grants no. 19-52-44002).

### References

- Holder J. Atmospheric cherenkov gamma-ray telescopes. The WSPC handbook of astronomical instrumentation, Volume 5, Gamma-Ray and Multimessenger Astronomical Instrumentation. World Scientific, 2021, pp. 117– 136. DOI: 10.1142/9789811203817\_0006
- 2. Cortina J. Status and first Results of the magic telescope. Astrophysics and Space Science, 2005, June, vol. 297, no. 1, pp. 245–255, DOI: 10.1007/s10509-005-7627-5.
- 3. Hinton J. The status of the HESS project. New Astronomy Reviews, 2004, vol. 48, no. 5, pp. 331–337, DOI: 10.1016/j.newar.2003.12.004
- 4. Holder J., Atkins R.W., Badran H.M. et al. The first VERITAS telescope. Astroparticle Physics, 2006, vol. 25, no. 6, pp. 391–401, DOI: 10.1016/j.astropartphys.2006.04.002

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Applied Physics Institute of Irkutsk State University, Russia, Irkutsk

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Russia, Irkutsk

- 5. Acharya B., Actis M., Aghajani T. et al. Introducing the CTA concept. Astroparticle Physics, 2013, vol. 43, pp. 3–18. DOI: 10.1016/j.astropartphys.2013.01.007
- 6. Budnev N., Astapov I., Bezyazeekov P. et al. TAIGA an advanced hybrid detector complex for astroparticle physics and high energy gamma-ray astronomy in the Tunka. Journal of instrumentation, 2020, Sept., vol. 15, no. 9, DOI: 10.1088/1748-0221/15/09/C09031.
- 7. Budnev N., Astapov I., Bezyazeekov P. et al. TAIGA—an innovative hybrid array for high energy gamma astronomy, cosmic ray physics and astroparticle physics. Physics of Atomic Nuclei, 2021, vol. 84, no. 3, pp. 362–367, DOI: 10.1134/S1063778821030078.
- 8. Condon J. GBT pointing equations. GBT tech. Memo. 75, NRAO, 1992, available at https://library.nrao.edu/public/memos/gbt/GBT\_075.pdf.
- 9. Wallace P. TPOINT-Telescope pointing analysis system. Starlink User Note. 1994, vol. 100, available at: https://sites.astro.caltech.edu/~srk/TP/Literature/Tpoint SunWorks.pdf.
- 10. Lew B. Improving pointing of Toruń 32-m radio telescope: effects of rail surface irregularities. Experimental Astronomy, 2018, vol. 45, no. 1, pp. 81–105, DOI: 10.1007/s10686-018-9573-6.
- 11. Wallace P. Rigorous algorithm for telescope pointing. Advanced telescope and instrumentation control software II, vol. 4848, International Society for Optics, Photonics, 2002, pp. 125–136, DOI: 10.1117/12.460914.
- 12. Zhurov D. P. Modelirovaniye dlya navedeniya atmosfernykh cherenkovskikh teleskopov v eksperimente TAIGA [Simulation for pointing atmospheric Cherenkov telescopes in the TAIGA experiment]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo uni-versiteta. Seriya «Matematicheskoye modelirovaniye i programmirovaniye» [Bulletin of the South Ural State University. Series "Mathematical Modeling and Programming"], 2021, vol. 14, no. 4, pp. 106–111. DOI: 10.14529/mmp210409
- 13. Spengler G., Schwanke U., Zhurov D. CTbend: A Bayesian open-source framework to model pointing corrections of Cherenkov telescope. Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference, PoS(ICRC2021), vol. 395, 2021, pp. 699, DOI: 10.22323/1.395.0699.
- 14. Cole Ian R. Modelling CPV. Loughborough University. Thesis, 2015, available at: https://hdl.handle.net/2134/18050.
- 15. Bretz T., Dorner D., Wagner R.M. et al. The drive system of the major atmospheric gamma-ray imaging Cherenkov telescope. Astroparticle Physics. 2009, vol. 31, no. 2, pp. 92–101, DOI: 10.1016/j.astropartphys.2008.12.
- 16. Zhurov D., Gress O.A, Lukyantsev D.S. et al. TAIGA-IACT pointing control and monitoring software status. Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference, PoS(ICRC2021), vol. 395, 2021, pp. 690, DOI: 10.22323/1.395.0690.
- 17. González Á. Measurement of areas on a sphere using Fibonacci and latitude–longitude lattices. Mathematical Geosciences 2010, vol. 42, no. 1, pp. 49-64, DOI: 10.1007/s11004-009-9257-x.
- 18. Katoch S., Chauhan S.S., Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future. Multimedia Tools and Applications, vol.80, no.5, 2021, pp. 8091-8126, DOI: 10.1007/s11042-020-10139-6.
- 19. Goodman J., Weare J. Ensemble samplers with affine invariance. Communications in applied mathematics and computational science, 2010, vol. 5, no. 1, pp. 65-80, DOI: 10.2140/camcos.2010.5.65.
- **Dmitry P. Zhurov,** post-graduate student of INRTU, junior researcher NIIPP ISU, SPIN: 6071-7716, AuthorID: 1078130, ORCID: 0000-0002-1596-8829, sidney28@yandex.ru, Russia, Irkutsk, Gagarin boulevard, 20.
- Oleg A. Gress, Senior Researcher NIIPPF IGU, SPIN: 5709-7523, AuthorID: 23235, ORCID: 0000-0002-5070-0836, grol08@rambler.ru, Russia, Irkutsk, Gagarina boulevard, 20.
- **Denis N. Sidorov,** Dr of Ph. and Mathematics s., prof. RAS, head of industrial mathematics laboratory of INRTU, Senior Researcher Department of Applied Mathematics, Institute of Energy Systems named after L.A. Melentiev SB RAS, SPIN: 6049-9314, AuthorID: 14218, ORCID: 0000-0002-3131-1325, contact.dns@gmail.com, Russia, Irkutsk, st. Lermontov, 130.

Статья поступила в редакцию 01.06.2022; одобрена после рецензирования 05.08.2022; принята к публикации 06.09.2022.

The article was submitted 06/01/2022; approved after reviewing 08/05/2022; accepted for publication 09/06/2022.

УЛК 004.932.2

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.017

## Улучшение качества поиска штриховых кодов с помощью слабо-размеченных данных

### Звонарев Дмитрий Анатольевич

Московский физико-технический институт (национальный университет), Россия, Москва, dmitry.zvonorev@phystech.edu

Аннотация. Подходы к обучению нейросетевых моделей поиска со слабо-размеченными данными используются, когда большое количество размеченных данных недоступно. Результаты экспериментов в различных исследованиях показывают, что качество моделей, обученных подобным способом, не превосходит качество моделей, обученных с использованием полной разметки. Представленный в данной работе подход позволяет улучшить качество поиска штриховых кодов и сократить затраты на получение разметки при использовании небольшого количества размеченных данных. Качество модели, обученной только на небольшой части (169 примеров) полностью размеченных данных: Precision = 0.627, Recall = 0.869, F1 = 0.728, качество классификации объектов независимо от их типа: Ассигасу = 0.624. Качество улучшенной модели, обученной на искусственной разметке (2531 примеров) и настроенной на полностью размеченных данных (169 примеров): Precision = 0.856, Recall = 0.892, F1 = 0.874, качество классификации объектов независимо от их типа: Ассигасу = 0.924.

**Ключевые слова:** сверточная нейронная сеть, штриховой код, штрихкод, баркод, слабо-размеченные данные, глубокое обучение, детектирование, поиск объектов, самообучение

**Цитирование:** Звонарев Д.А. Применение слабо-размеченных данных для улучшения качества поиска штриховых кодов / Д.А. Звонарев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. -2022. -№ 3(27). - C. 184-191. - DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.017.

**Введение.** Современные методы поиска объектов на изображениях не обходятся без использования нейронных сетей. Такие подходы требуют большого количества размеченных данных для получения модели высокой точности. Разметка состоит из регионов объектов, с указанием класса объекта. Обычно такая разметка обладает высокой стоимостью, более того, если появляется новый класс объекта, то приходится пересмотреть все размеченные изображения, чтобы найти регионы для нового класса. Часто разметка бывает не точной. Поэтому задача обучения модели поиска объектов без разметки (или с ограниченным количеством размеченных примеров) является актуальной.

В последнее время становятся востребованными методы обучения с помощью слаборазмеченных данных [1-8] и методы самостоятельного обучения [9-11]. В статье будут рассмотрены методы из первой категории. Они не требуют наличия в разметке регионов объектов, необходимы только метки на уровне изображения. Если объект определенного класса присутствует на изображении, то добавляется соответствующая метка. Такую разметку получить просто: достаточно найти все изображения, содержащие объект, и поместить в один каталог.

Рассмотрим несколько наиболее распространенных публичных наборов данных. Обратимся к данным PASCAL VOC 2012 [11]. Работа [12] являлась последним достижением в задаче поиска объектов. Исследователи получали высокое качество mAP = 80%. В работе [13] со слабо-размеченными данными достигалось качество mAP = 53.6%. На наборе данных СОСО [14] авторы работы [15] обучили модель, достигающую качества AP50 = 74.4%. В работе [16], которая также являлась последним достижением, при использовании слаборазмеченных данных исследователи получили качество AP50 = 24.8%. Можно заметить, что модели, полученные при обучении с использованием слабо-размеченных данных, не превосходят по качеству модели, обученные на полностью размеченных данных.

Выдвинем гипотезу о том, что методы, обученные на большом количестве слаборазмеченных данных, смогут помочь методам, обученным на небольшом количестве полно-

стью размеченных данных, достичь высокого качества поиска объектов. Данная гипотеза будет проверена в контексте задачи поиска штриховых кодов (штрихкодов) на изображениях.

Объект «штрихкод» широко используется в документах. Важно точно находить границы штриховых кодов для корректного распознавания и извлечения из них полезной информации. Получить большое количество размеченных изображений документов со штрихкодами сложно, так как количество различных типов штрихкодов велико и процесс разметки всех объектов является дорогостоящим.

**1.** Современные методы поиска объектов. Рассмотрим две категории подходов: обучение со слабо-размеченными данными и обучение с полностью размеченными данными.

В первой категории можно выделить работы [1-4]. Авторы работ используют механизмы выдвижения гипотез объектов на изображении. После этого нейросетевая модель обучается как классификатор с меткой на уровне изображения. Качество каждой гипотезы оценивается на промежуточном этапе метода. В итоге, гипотеза с наибольшей вероятностью становится искомым объектом. Другое множество работ [6-7] основывается на работе [5]. В исследованиях используется карта активации классов, которая получается линейной комбинацией карт признаков (с последнего сверточного слоя) с соответствующими классу весами в полносвязном слое. На этой карте будут подсвечены наиболее отличительные части объекта. Полученную карту можно бинаризовать, и выделить на ней связные компоненты. Так формируются искомые объекты на изображении.

Во второй категории находятся все нейросетевые механизмы поиска, широко используемые в исследованиях, например [12], [15], [17].

Если рассматривать штриховые коды, то последним достижением являлась работа с нейронной сетью семантической сегментации [17]. Данная модель способна находить сразу несколько типов штриховых кодов на изображениях и классифицировать их. В работе [18] представлена модель, которая обучалась при помощи слабо-размеченных данных. Подход основан на методе построения карты активации классов. Полученная модель способна находить штриховые коды разных типов. Работа [18] обозначает первый результат в контексте поиска штриховых кодов со слабо-размеченными данными.

В текущем исследовании будет рассмотрена комбинация подходов [17] и [18] для увеличения качества поиска штрихкодов на небольшом количестве полностью размеченных данных.

## 2. Улучшение качества поиска штрихкодов.

2.1. Модель поиска на размеченных данных. В качестве модели поиска штриховых кодов, которая будет обучаться на размеченных данных, рассмотрим семантическую сегментацию [17]. Перед запуском нейросети изображение масштабировалось таким образом, чтобы наибольшая сторона не превосходила 1024 пикселей, и размеры сторон были кратны 64 пикселям. Работа производится с полутоновым изображением в градациях серого, сигнал которого нормируется в диапазон [-1, +1]. Архитектура модели совпадает с архитектурой нейросети DilatedModel из работы [19]. Последний слой состоит из свертки размером 1х1 и 8 каналов: 1 канал для получения карты сегментации с двумя классами: штрихкод, все остальное, 7 каналов для получения карты сегментации по каждому классу штрихкода: одномерные штриховые коды, почтовые, DataMatrix, Aztec, Maxicode, PDF417, QR. Каждый из 7 каналов сегментирует на два класса: штрихкод, все остальное.

Чтобы получить координаты штрихкода, нужно получить результат работы нейросети, и бинаризовать его. После этого нужно найти связные компоненты и построить вокруг них повернутые прямоугольники минимальной площади. Для получения класса объекта — нужно наложить эти прямоугольники на карты классификации и рассчитать среднее значение веро-

ятности. Класс, для карты которого получится наибольшее среднее значение вероятности будет искомым.

**2.2.** Описание эксперимента. Введем обозначения. Реальная разметка — разметка, полученная экспертом, в виде координат вершин четырехугольника. Также реальная разметка должна содержать класс объекта. Искусственная разметка — разметка, полученная методом WSBD-S [18]. Она также содержит координаты четырехугольников и класс каждого объекта.

Обозначим модель, которая обучена на реальной разметке, как Supervised. Модель, которая обучена на искусственной разметке, обозначим как Pretrained. Параметры данной модели будут настроены на реальной разметке. Стоит отметить, что получить модель, обученную с использованием искусственной разметки, можно несколькими способами. Первый способ — смешать искусственную и реальную выборку и обучить на получившимся множестве модель. Второй способ — модель Pretrained обучить на реальной разметке с низким темпом обучения. Схема эксперимента изображена на рисунке 1.

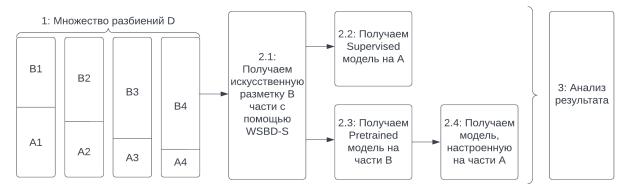


Рис. 1. Схема эксперимента по выявлению экономического эффекта

На первом этапе задаем количество разбиений D рабочего набора данных на 2 части: В – не размеченная часть изображений, А – полностью размеченная часть изображений. Затем, производим разбиения данных. Часть В будет размечена подходом WSBD-S [18], часть А останется с полной разметкой. На втором этапе для каждого разбиения получаем качество поиска нейронной сетью при обучении на наборе данных А. Далее, обучаем модели на данных В, после чего настраиваем на данных А. Получаем качество поиска настроенной модели. Третий этап является этапом анализа. Необходимо сравнить качество модели из пункта 4 и качество модели из пункта 2 и выяснить, подтверждается ли гипотеза экспериментом.

**2.3. Обучение нейросетевой модели.** Обучение происходит на протяжении 50 эпох. Размер пакета изображений - 8. При обучении Pretrained, Supervised моделей темп обучения устанавливается 0.001. В качестве функции потерь во всех моделях используется линейная комбинация функций потерь L из работы [17]:

$$L = \frac{w_{det}(w_{p}L_{p} + w_{n}L_{n} + w_{h}L_{h})/(w_{p} + w_{n} + w_{h}) + w_{cls}L_{cls}}{w_{det} + w_{cls}}$$

 $L_p$  — значение BinaryCrossEntropy на пикселях, которые были классифицированы верно,  $L_n$  — значение BinaryCrossEntropy на пикселях, которые были классифицированы неверно.  $L_h$  — значение BinaryCrossEntropy на хуже всех классифицированных положительных пикселях.  $L_{cls}$  — значение CrossEntropy, посчитанной по всем каналам кроме канала детектирования. Значение этой функции рассчитывается только на тех пикселях, что принадлежат объектам в разметке. Параметры из функции потерь используемые в эксперименте:  $w_{det} = 20$ ,  $w_{cls} = 1$ ,  $w_p = 15$ ,  $w_n = 1$ ,  $w_h = 3$ . В качестве алгоритма оптимизации используется Adam.

Для проведения экспериментов использовалась искусственная часть набора данных ZVZ [19]. Было замечено, что для получения высокого качества поиска с помощью ней-

ронной сети семантической сегментации достаточно использовать небольшую часть данных ZVZ [19] размером N=2700 примеров. Добавление дополнительных данных к этой части не улучшает качество поиска. Поэтому далее эксперимент будет проводиться только с использованием N примеров. Это множество будет разбито на 2 части различными способами:  $D=\{A_i,B_i\}, |D|=4$ . Пусть выбраны подмножества меньшего размера  $\{A_1,A_2,A_3,A_4\}$ . Размер каждого следующего множества вдвое меньше предыдущего:  $|A_1|=1352, |A_2|=676, |A_3|=338, |A_4|=169$ . На этих частях будет обучена нейросетевая модель Supervised. Модель Pretrained будет обучена на данных B.

## 2.4. Результаты эксперимента.

**2.4.1.** Эксперименты с FineTuned моделью. Все метрики качества в экспериментах были получены при пороге IoU = 0.5. Сначала были проведены эксперименты по настройке весов модели с помощью подхода fine-tuning [20]: Pretrained модель была обучена на множестве A с низким темпом обучения: lr = 0.0001 на протяжении 50 эпох. Назовем такую модель FineTuned, чтобы отличать модели, обученные разными способами.

Результат настройки весов на множестве А показан в таблице 1. В первых экспериментах по метрике F1 модель FineTuned практически не отличается от модели Supervised. Несмотря на это, FineTuned обладает более высокой точностью (Precision) за счет низкой полноты (Recall). В последних экспериментах появляется положительный эффект от обучения на множестве В и дополнительной настройке на А.

Модель	Precision	Recall	F1
Supervised (A <sub>1</sub> )	0.902	0.923	0.912
FineTuned (A <sub>1</sub> )	0.931	0.895	0.913
Supervised (A <sub>2</sub> )	0.865	0.918	0.891
FineTuned (A <sub>2</sub> )	0.915	0.879	0.897
Supervised (A <sub>3</sub> )	0.729	0.897	0.804
FineTuned (A <sub>3</sub> )	0.859	0.825	0.842
Supervised (A <sub>4</sub> )	0.512	0.850	0.639
FineTuned (A <sub>4</sub> )	0.705	0.660	0.682

Таблица 1. Результат с использованием размеченного множества А

Цель поиска штриховых кодов в промышленных системах – распознавание, извлечение полезной информации. Ложные гипотезы можно фильтровать путем распознавания. Потерянные гипотезы могут привести к потери важной информации. Поэтому значение Recall FineTuned модели не должно быть хуже, чем значение Recall Supervised модели. Подобный вывод приводит к необходимости использования альтернативного метода настройки весов модели Pretrained.

**2.4.2.** Эксперименты с Tuned моделью. Были проведены эксперименты по настройке весов модели Pretrained с помощью дообучения: сначала была обучена модель Pretrained на множестве В с темпом обучения lr=0.001, затем процесс продолжился с прежним темпом обучения на множестве А на протяжении 50 эпох. Если качество на валидационном множестве перестает изменяться в течение 10 эпох, то темп обучения уменьшается в 2 раза. Обозначим такую модель – Tuned.

Результат настройки на множестве А показан в таблице 2. Для наглядности, в таблицу были добавлены результаты FineTuned модели. В первом эксперименте Tuned модель по метрикам качества сравнима с Supervised. В последних экспериментах модель Tuned по всем метрикам качества сильно превосходит Supervised модель, то есть удалось сильно увеличить качество поиска штриховых кодов.

Таблица	2	Результаты (	с использованием 1	пазмеченного	множества А
т аолица		I COMMINICIPI V	- HCHOMBSOBallinem	Dasme temmere	MIIIOMCCIDa 11

Модель	Precision	Recall	F1
Supervised (A <sub>1</sub> )	0.902	0.923	0.912
FineTuned (A <sub>1</sub> )	0.931	0.895	0.913
Tuned (A <sub>1</sub> )	0.906	0.914	0.910
Supervised (A <sub>2</sub> )	0.865	0.918	0.891
FineTuned (A <sub>2</sub> )	0.915	0.879	0.897
Tuned (A <sub>2</sub> )	0.887	0.915	0.901
Supervised (A <sub>3</sub> )	0.729	0.897	0.804
FineTuned (A <sub>3</sub> )	0.859	0.825	0.842
Tuned (A <sub>3</sub> )	0.914	0.910	0.912
Supervised (A <sub>4</sub> )	0.512	0.850	0.639
FineTuned (A <sub>4</sub> )	0.705	0.660	0.682
Tuned (A <sub>4</sub> )	0.856	0.892	0.874

**2.4.3. Качество классификации.** Оценим, как повлияла дополнительная настройка параметров нейронной сети на качество классификации. Стоит отметить, что текущие результаты поиска получены с помощью модели, содержащей в архитектуре слои сегментации для каждого класса. При этом искусственная выборка содержала не только регионы, найденные с помощью подхода WSBD-S [18], но и классы объектов.

Сравнение по метрике качества Ассигасу между моделями Tuned и Supervised по каждому типу, соответствующему каждому из разбиений набора данных, показано в таблице 3. Замеры на строке "Независимо от типа" означают получение Ассигасу для объектов всех классов сразу, при этом считаем, что объект классифицирован верно, если он найден при заданном пороге IoU и его класс совпал с классом из разметки.

Таблица 3. Результаты классификации

Типы штрихкодов	Supervised	Tuned	Supervised	Tuned	Supervised	Tuned	Supervised	Tuned
	$(A_1)$	$(A_1)$	$(A_2)$	$(A_2)$	$(A_3)$	$(A_3)$	$(A_4)$	$(A_4)$
Linear	0.984	0.979	0.985	0.977	0.993	0.973	0.983	0.978
QRCode	0.298	0.534	0.083	0.745	0.000	0.701	0.000	0.565
Aztec	0.725	0.889	0.568	0.938	0.000	0.913	0.000	0.907
DataMatrix	0.957	0.956	0.799	0.962	0.758	0.976	0.611	0.970
MaxiCode	0.924	0.932	0.851	0.927	0.592	0.926	0.000	0.882
PDF417	0.000	0.144	0.000	0.681	0.000	0.724	0.000	0.609
Postcodes	0.841	0.879	0.808	0.910	0.566	0.887	0.000	0.928
Независимо	0.882	0.910	0.832	0.941	0.752	0.936	0.624	0.924
от типа								

Если смотреть на результат работы Supervised модели, то можно заметить, что некоторые типы она классифицировать не умеет и имеет на них нулевое значение Accuracy. Чем меньше становится обучающий набор данных, тем хуже качество классификации. Если смотреть на результат работы Tuned модели, то нет ни одного типа с нулевым значением Accuracy. Более того, если сравнивать модели независимо от типа, то Tuned модель всегда превосходит Supervised.

2.5. Схема создания метода поиска штрихкодов с использованием неразмеченных данных. Полная схема создания метода поиска штрихкодов с использованием большого количества не размеченных данных и небольшого количества размеченных данных показана на рисунке 2. Сначала нужно создать модель поиска, обучаемую только на слабо-размеченных данных. Затем получаем искусственную разметку с помощью этой модели. Далее обучаем семантическую сегментацию на полученной разметке и настраиваем на реальной разметке. В итоге будет получена модель, превосходящая по качеству поиска и классификации модель, обученную только на небольшом количестве полностью размеченных данных.



Рис. 2. Общая схема создания модели поиска штриховых кодов

**Заключение.** По результатам экспериментов можно сделать вывод, что достаточно получить малое количество полностью размеченных данных. Остальные данные можно разметить грубо, с помощью модели, обученной на слабо-размеченных данных. Качество модели, обученной на небольшой части (169 примеров) полностью размеченных данных: Precision = 0.627, Recall = 0.869, F1 = 0.728, качество классификации объектов независимо от их типа: Ассигасу = 0.624. Качество модели, обученной на искусственной разметке (2531 примеров) и настроенной на полностью размеченных данных (169 примеров): Precision = 0.856, Recall = 0.892, F1 = 0.874, качество классификации объектов независимо от их типа: Accuracy = 0.924.

Стоит отметить, что размер множества с реальной разметкой, при котором будет подтверждаться гипотеза, зависит от многих факторов: от используемой нейросетевой модели, от данных для обучения и от модели, применяемой для создания искусственной разметки. В данной работе не проводилось исследование, насколько сильно влияют эти факторы. Подобный эксперимент можно провести в будущих исследованиях и выяснить влияние.

#### Список источников

- 1. Jie Z. Deep self-taught learning for weakly supervised object localization. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017, pp. 1377-1385.
- 2. Teh E.W., Rochan M.Y. Wang Attention Networks for Weakly Supervised Object Localization. BMVC, 2016, pp. 1-11
- 3. Bilen H., Vedaldi A. Weakly supervised deep detection networks. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016, pp. 2846-2854.
- 4. Kantorov V. Contextlocnet: Context-aware deep network models for weakly supervised localization. European conference on computer vision, Springer, 2016, pp. 350-365.
- 5. Zhou B. Learning deep features for discriminative localization. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016, pp. 2921-2929.
- 6. Yao Q., Gong X. Saliency guided self-attention network for weakly and semi-supervised semantic segmentation. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 14413-14423.
- 7. Zhang X. Self-produced guidance for weakly-supervised object localization. Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV), 2018, pp. 597-613.
- 8. Dwibedi D. With a little help from my friends: Nearest-neighbor contrastive learning of visual representations. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2021, pp. 9588-9597.

- 9. Gril 1 J. B. Bootstrap your own latent-a new approach to self-supervised learning // Advances in neural information processing systems, 2020, vol. 33, pp. 21271-21284.
- 10. Chen T.A simple framework for contrastive learning of visual representations. International conference on machine learning, PMLR, 2020, pp. 1597-1607.
- 11. Everingham M. The pascal visual object classes (voc) challenge. International journal of computer vision, 2010, vol. 88, no. 2, pp. 303--338.
- 12. Liu W. Ssd: Single shot multibox detector. European conference on computer vision, Springer, Cham, 2016, pp. 21-37.
- 13. Huang Z. Comprehensive attention self-distillation for weakly-supervised object detection. Advances in neural information processing systems, 2020, vol. 33, pp. 16797-16807.
- 14. Lin T. Y. Microsoft coco: Common ob jects in context. European conference on computer vision, Springer, Cham, 2014, pp. 740-755.
- 15. Wang C.Y., Bochkovskiy A., Liao H.Y.M. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors. arXiv preprint arXiv:2207.02696, 2022.
- 16. Ren Z. Instance-aware, context-focused, and memory-efficient weakly supervised object detection. Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, 2020, pp. 10598-10607.
- 17. Zharkov A., Zagaynov I. Universal barcode detector via semantic segmentation. International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR), 2019, pp. 837-843.
- 18. Звонарев Д. Поиск штриховых кодов на изображениях с использованием слабо-размеченных данных. / Д. Звонарев. Труды Московского физико-технического института, 2022, vol. 14, no. 3.
- 19. Zharkov A., Vavilin A., Zagaynov I. New benchmarks for barcode detection using both synthetic and real data. // International workshop on document analysis systems, 2020, pp. 481-493.
- 20. Girshick R. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2014, pp. 580-587.

**Звонарев Дмитрий Анатольевич.** Аспирант Московского физико-технического института (национальный университет). Место работы: ООО «Аби Продакин», руководитель группы анализа документов и синтеза. ORCID: 0000-0001-8299-2733, dmitry.zvonorev@phystech.edu, Россия, Москва, Московский физико-технический институт (национальный университет).

UDC 004.932.2

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.017

## Barcodes detection improvement via weakly labeled data

#### **Dmitry A. Zvonarev**

Moscow Institute of Physics and Technology, Russia, Moscow, dmitry.zvonorev@phystech.edu

**Abstract.** Weakly-supervised neural network object detection is used when a large amount of labeled data is not available. The results of experiments in various studies show that the quality of weakly-supervised models does not exceed the quality of fully-supervised models. Proposed approach improves the quality of barcodes detector and reduces the cost of obtaining markup, using a small amount of labeled data and a large amount of unlabeled data. The quality of the model trained on a small part (169 examples) of labeled data: Precision = 0.627, Recall = 0.869, F1 = 0.728, the quality of object classification regardless of objects type: Accuracy = 0.624. The quality of the improved model trained on artificially labeled data (2531 examples) and tuned on labeled data (169 examples): Precision = 0.856, Recall = 0.892, F1 = 0.874, quality of object classification regardless of objects type: Accuracy = 0.924.

**Keywords:** convolutional neural network, barcode, weakly-supervised object localization, deep learning, object detection, self-supervised learning

#### References

- 1. Jie Z. Deep self-taught learning for weakly supervised object localization. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017, pp. 1377-1385.
- 2. Teh E.W., Rochan M.Y. Wang Attention Networks for Weakly Supervised Object Localization. BMVC, 2016, pp. 1—11
- 3. Bilen H., Vedaldi A. Weakly supervised deep detection networks. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016, pp. 2846-2854.

- 4. Kantorov V. Contextlocnet: Context-aware deep network models for weakly supervised localization. European conference on computer vision, Springer, 2016, pp. 350-365.
- 5. Zhou B. Learning deep features for discriminative localization. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016, pp. 2921-2929.
- 6. Yao Q., Gong X. Saliency guided self-attention network for weakly and semi-supervised semantic segmentation. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 14413-14423.
- 7. Zhang X. Self-produced guidance for weakly-supervised object localization. Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV), 2018, pp. 597-613.
- 8. Dwibedi D. With a little help from my friends: Nearest-neighbor contrastive learning of visual representations. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2021, pp. 9588-9597.
- 9. Gril 1 J. B. Bootstrap your own latent-a new approach to self-supervised learning // Advances in neural information processing systems, 2020, vol. 33, pp. 21271-21284.
- 10. Chen T.A simple framework for contrastive learning of visual representations. International conference on machine learning, PMLR, 2020, pp. 1597-1607.
- 11. Everingham M. The pascal visual object classes (voc) challenge. International journal of computer vision, 2010, vol. 88, no. 2, pp. 303--338.
- 12. Liu W. Ssd: Single shot multibox detector. European conference on computer vision, Springer, Cham, 2016, pp. 21-37.
- 13. Huang Z. Comprehensive attention self-distillation for weakly-supervised object detection. Advances in neural information processing systems, 2020, vol. 33, pp. 16797-16807.
- 14. Lin T. Y. Microsoft coco: Common ob jects in context. European conference on computer vision, Springer, Cham, 2014, pp. 740-755.
- 15. Wang C.Y., Bochkovskiy A., Liao H.Y.M. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors. arXiv preprint arXiv:2207.02696, 2022.
- 16. Ren Z. Instance-aware, context-focused, and memory-efficient weakly supervised object detection. Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, 2020, pp. 10598-10607.
- 17. Zharkov A., Zagaynov I. Universal barcode detector via semantic segmentation. International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR), 2019, pp. 837-843.
- 18. Zvonarev D. Poisk shtrikhovykh kodov na izobrazheniyakh s ispol'zovaniyem slabo-razmechennykh dannykh. [Weakly supervised barcodes detection]. Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta [Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology], 2022, vol. 14, no.3.
- 19. Zharkov A., Vavilin A., Zagaynov I. New benchmarks for barcode detection using both synthetic and real data. // International workshop on document analysis systems, 2020, pp. 481-493.
- 20. Girshick R. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2014, pp. 580-587.

**Dmitry Anatolievich Zvonarev.** Postgraduate student, Moscow Institute of Physics and Technology, ABBYY, Head of Document Analysis and Synthesis group. ORCID: 0000-0001-8299-2733, dmitry.zvonorev@phystech.edu, Russia, Moscow, Moscow Institute of Physics and Technology (National University).

Статья поступила в редакцию 14.08.2022; одобрена после рецензирования 07.09.2022; принята к публикации 19.09 2022.

The article was submitted 08/04/2022; approved after reviewing 09/07/2022; accepted for publication 09/19/2022.

УЛК 004.942

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.018

## Линеаризация избыточных механических структур сложных технических систем

## Божко Аркадий Николаевич, Черняев Роман Валерьевич

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва, kayl.sander@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается проблема синтеза неизбыточных механических структур сложных технических систем. В качестве математической модели механической структуры используется гиперграф. Эта модель адекватно описывает процессы сборки, разборки и декомпозиции изделия на сборочные единицы. С ее помощью можно идентифицировать структурную избыточность изделия. В терминах гиперграфовой модели преодоление избыточности называется линеаризацией. Показано, что эта операция способна привести к образованию запрещенных фигур, то есть таких подграфов, которые описывают несобираемые конструктивные фрагменты. Предложены алгоритмы, позволяющие выполнить линеаризацию с последующей проверкой на наличие запрещенных фигур. Разработанные алгоритмы могут быть использованы при проектировании сложных технических систем в современных интегрированных САD/САM/САЕ-системах.

**Ключевые слова:** механическая структура, гиперграф, структурная избыточность, базирование, стягивание, сборка, последовательность сборки, автоматизированное проектирование

**Цитирование:** Божко А.Н. Линеаризация избыточных механических структур сложных технических систем / А.Н. Божко, Р.В. Черняев // Информационные и математические технологии в науке и управлении.  $-2022.- \mathbb{N} \ 3(27).- \mathrm{C}.\ 192-203.- \mathrm{DOI}:\ 10.38028/\mathrm{ESI}.2022.273.018.$ 

Введение. Любой технический объект состоит из совокупности элементов и связей между ними, которые образуют его структуру: механическую, электрическую, гидравлическую и пр. Механическая структура — это важная часть описания технической системы. Она закладывается на самых ранних этапах проектирования технического объекта и оказывает заметное влияние на все последующие стадии жизненного цикла. Механическая структура (МС) изделия представляет собой множество деталей и комплектующих, которые образуют системную целостность при помощи механических связей: соединений и сопряжений. От механической структуры во многом зависит поведение изделия в процессе сборки, эксплуатации, ремонта и утилизации.

Для моделирования механических структур технических объектов в автоматизированных системах проектирования применялись различные средства дискретной математики: матрицы, графы, семантические сети, И – ИЛИ-деревья, нечеткие множества, онтологии и др. [1-11]. Основной носитель информации о структурных свойствах изделия – граф связей и его многочисленные модификации: Liaison diagram [12], Liaison graph [13], Parts liaison graph [14], Attributed liaison graph [15], Product liaison graph [16], Connection graph [17], Assembly mating graph [18], Part mating graph [19], Connective relation graph [20], Hierarchical relation graph [21], Adjacency graph [22] и др.

Приведем точное определение графа связей. Пусть  $X = \{x_i\}_{i=1}^n$  — множество деталей изделия. Графом связей изделия называется неориентированный граф G = (X, V), в котором множество вершин X представляют детали, а множество ребер V описывают механические связи между деталями. Ребро v = (x, y) соединяет две вершины  $v \in V$ ;  $x, y \in X$  тогда и только тогда, когда между деталями x и y существует соединение или сопряжение.

Во всех упомянутых работах предполагается, что геометрическая координация изделия достигается при помощи механических связей между парами деталями, а все связи являются независимыми друг от друга. Иными словами, МС представляет собой бинарное отношение на множестве деталей.

Это предположение является корректным не во всех случаях. Во многих проектных ситуациях координация деталей при сборке (базировании) достигается при помощи нескольких механических связей одновременно. Это превращает данные связи в некоторую целостность и делает их зависимыми. Так, в классическом примере базирования призматической детали по трем плоскостям используются три связи, а во фланцевом соединении двух труб их число на единицу больше количества используемых крепежных болтов или шпилек, то есть 5, 6 и более. Можно привести и другие примеры группового базирования.

**1.** Гиперграфовая модель механической структуры сложного изделия. Базирование детали по конструкторским базам является отношением переменной местности и, в общем случае, не может быть корректно описано языком бинарных математических моделей. В [1] предложена гиперграфовая модель механической структуры сложного изделия, которая преодлевает данный недостаток. Введем необходимые формальные определения.

Изделию  $X = \{x_i\}_{i=1}^n$  поставим в соответствие гиперграф H = (X,R), в котором множество вершин  $X = \{x_i\}_{i=1}^n$  описывает детали изделия, а множество гиперребер  $R = \{r_j\}_{j=1}^m$  — минимальные геометрически определенные группировки деталей, полученные базированием по полным комплектам конструкторских баз.

На рисунке 1, а приведена конструкция, на рисунке 1, б показан граф связей конструкции, а на рисунке 1, в – ее гиперграфовая модель.

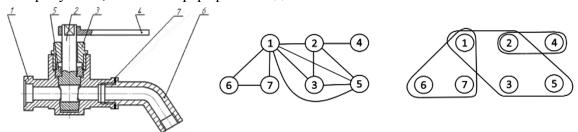


Рис. 1. Конструкция (а), граф связей конструкции (б), гиперграфовая модель (в)

Гиперграфовая модель механической структуры оказалась весьма содержательной. С ее помощью удалось получить эффективное решение многих важных проектных задач, например: синтез последовательности сборки и разборки, разбиение изделия на сборочные единицы, структурный анализ сложных технических систем и др. [1, 24].

В современном дискретном производстве сборка изделий в подавляющем большинстве случаев выполняется при помощи секвенциальных и когерентных сборочных операций [25]. Это операции, которые реализуют механическую связь между двумя элементами производства: деталями, деталью и сборочной единицей или двумя сборочными единицами. В [1] показано, что секвенциальные когерентные сборочные операции можно корректно описать при помощи стягиваний гиперребер гиперграфовой модели. Далее гиперребра будем называть просто ребрами. Приведем основные определения и результаты.

*Определение* 1. Стягиванием ребра  $r \in R$  гиперграфа H = (X, R) называется операция отождествления всех вершин, инцидентных r, и удаления этого ребра.

Определение 2. Стягивание ребра второй степени называется нормальным.

*Определение* 3. Гиперграф H = (X, R), для которого существует последовательность нормальных стягиваний, преобразующая его в одновершинный гиперграф без петель, называется *s*-гиперграфом.

S-гиперграф корректно описывает структурные свойства собираемой технической системы. В самом деле:

1. S-гипергаф представляет состояние изделия до сборки;

- 2. Нормальное стягивание ребра описывает когерентную и секвенциальную сборочную операцию;
- 3. Одновершинный гиперграф без петель это образ собранного изделия, в котором реализованы все связи.

В [24] доказана простая теорема о необходимых условиях стягиваемости гиперграфов *Теорема*. Пусть гиперграф H = (X, R) преобразуется в точку при помощи последовательности нормальных стягиваний. Тогда:

- 1. Гиперграф является связным.
- 2. Во множестве R есть хотя бы одно ребро второй степени.
- 3. Выполняется равенство |X| = |R| + 1.

Приведем рациональные аргументы в пользу этих утверждений. Сама процедура преобразования гиперграфа в точку является обоснованием его связности (1). В гиперграфе без ребер второй степени невозможно начать стягивания (2).

Более подробно о третьем условии. В гиперграфе H = (X,R) каждое гиперребро описывает полный комплект конструкторских баз. При сборке изделия первая деталь устанавливается в сборочное приспособление или на монтажный стол, поэтому она не нуждается во внутренних базах изделия. Для координации и установки каждой последующей детали нужен только один комплект баз. Отсюда с необходимостью следует линейное соотношение |X| = |R| + 1 между числом вершин и ребер гиперграфа.

При |X| > |R| + 1 детали теряют взаимную геометрическую координацию, которая заложена в проект изделия. Пусть равенство нарушается в обратную сторону, то есть |X| < |R| + 1. Легко видеть, что в результате нормальных стягиваний такого гиперграфа получится одновершинный гиперграф с петлями. Это противоречит исходному допущению, что изделие собрано, когда все связи реализованы.

Неравенство |X| < |R| + 1 описывает ситуацию структурной избыточности изделия. На этапе конструирования структурная избыточность влечет за собой появление неразрешимых размерных цепей. На этапе технологической подготовки производства она приводит к перебазированию. Перебазирование (overbasing [25]) — это необходимость установки детали с ориентацией сразу по нескольким полным комплектам конструкторских баз. В качестве примера можно привести ситуацию, когда выполняется монтаж призматической шпонки в шпоночный паз с нулевым зазором по всем контактным поверхностям. Перебазирование — это тяжелая проектная ошибка, которая влечет за собой радикальные изменения процесса технологической подготовки производства.

Современные системы автоматизированного проектирования не имеют программных инструментов для идентификации и удаления перебазирования, поэтому проекты сложных технических систем часто оказываются структурно избыточными.

**2. Постановка задачи.** Пусть механическая структура некоторого изделия представлена в виде гиперграфа H = (X, R), у которого выполняются первые два условия теоремы 1 и |X| < |R| + 1. Требуется удалить из R ребра так, чтобы выполнялось равенство |X| = |R| + 1 и гиперграф H = (X, R) стал s-гиперграфом.

Определение 4. Удаление избыточных ребер из H = (X, R), |X| < |R| + 1, называется линеаризацией. Гиперграф  $H^* = (X, R^*), |X| = |R^*| + 1$ , полученный в результате этой операции, – линеаризованным.

Процедура линеаризации не сводится к простому удалению избыточных ребер высокой степени, как может показаться. Простое удаление ребер может породить нестягиваемые

гиперграфы, для которых выполняются все условие теоремы. Приведем простой пример. На рисунке 2, а изображен избыточный гиперграф, у которого четыре вершины и четыре ребра. Легко проверить, что удаление любого ребра, кроме {1,2}, превращает гиперграф в *s*-гиперграф. На рисунке 2, б показан гиперграф, полученный удалением ребра {1,4}. Последовательность стягиваний 1,2,3,4 преобразует этот линеаризованный гиперграф в точку. Удаление ребра {1,2} дает пример, показанный на рисунке 2, в. Стягивание единственного ребра второй степени {1,4} приводит к двойному треугольнику (рис. 2, г), который не допускает дальнейшего преобразования.

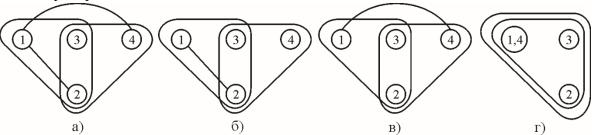


Рис. 2. Избыточный гиперграф (а), варианты линеаризации (б, в), результат стягивания (г)

Пусть гиперграф удовлетворяет всем условиям теоремы 1. Выполним все возможные нормальные стягивания его ребер. Это преобразование может завершиться только двумя исходами:

- 1. Гиперграф стянут в точку и тогда он является *s*-гиперграфом.
- 2. Последовательность нормальных стягиваний завершается гиперграфом, у которого нет ребер второй степени.

Каждая операция нормального стягивания уменьшает число ребер и вершин на единицу, поэтому такие гиперграфы являются связными и для них выполняется линейное соотношение между числом вершин и ребер.

*Определение* 5. Связные гиперграфы без ребер второй степени, для которых выполняется равенство |X| = |R| + 1, будем называть запрещенными фигурами.

Оказалось, что запрещенная фигура, показанная на рисунке 2, г не единственная. Их число быстро растет в зависимости от порядка (числа вершин) гиперграфа. На рисунке 3 изображена единственная запрещенная фигура третьего порядка и две — четвертого порядка.

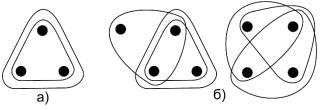


Рис. 3. Запрещенные фигуры: третьего порядка(а), четвертого порядка(б).

На рисунке 4 изображены все запрещенные фигуры шестого порядка.



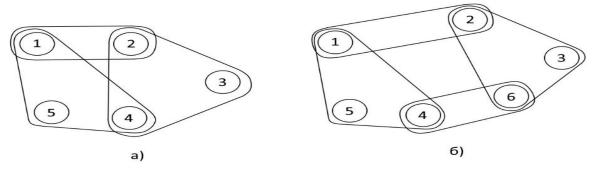
Рис. 4. Запрещенные фигуры пятого порядка

В практике современного дискретного производства редко встречаются конструктивные фрагменты, у которых полные комплекты образуют четыре и более деталей [25]. По этой причине в работе рассматриваются гиперграфы с ребрами не выше третьей степени.

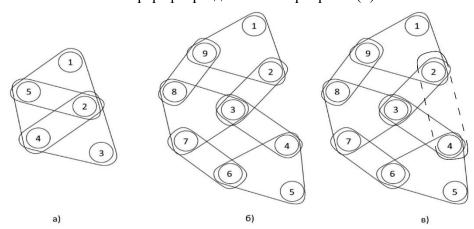
Линеаризация избыточного гиперграфа представляет собой итерационный процесс, в котором после удаления очередного ребра необходимо выполнить верификацию полученной

структуры. Эта процедура заключается в проверке первых двух условий теоремы 1. Кроме того, необходимо убедиться в том, что в гиперграфе отсутствуют запрещенные фигуры. Поскольку достаточные условия стягиваемости гиперграфов пока неизвестны, то для решения этой задачи разработан специальный алгоритм. Сначала он преобразует гиперграф к специальной разделенной форме, потом ее исследует на предмет наличия или отсутствия запрещенных фигур.

**3. Алгоритм анализа запрещенных фигур.** Алгоритм требует преобразования гиперграфа в форму с разделенными ребрами. Это достигается дублированием общих вершин, которые соединяются искусственными ребрами второй степени. Простой пример такого разделения приведен на рисунке 5. Если существует несколько рёбер третьей степени, имеющих общую вершину (рис. 6, а), то необходимо исключить их зацикливание (рис. 6, в).



**Рис. 5.** Разделение ребер третьей степени: гиперграф (а), гиперграф с разделенными ребрами (б)



**Рис. 6.** Сложное разделение ребер: гиперграф (а), корректное разделение (б), некорректное разделение (выделено пунктиром) (в)

Следующий шаг – представление гиперграфа с разделенными ребрами третьей степени в виде мультиграфа. Во избежание путаницы будем называть вершины этого вспомогательного мультиграфа узлами. Он формируется по следующим правилам. Узлы мультиграфа соответствуют ребрам третьей степени гиперграфа («треугольникам»). Ребра мультиграфа представляют ребра второй степени гиперграфа, которые соединяют вершины, инцидентные разным «треугольникам». Причем, отображаются только такие ребра, которые не имеют общих вершин в «треугольниках». На рисунке 7 приведены два примера представления гиперграфов в форме мультиграфов.

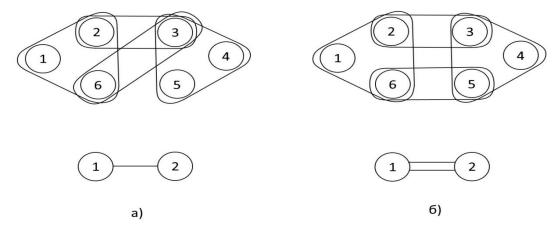


Рис. 7. Примеры представления гиперграфов в виде мультиграфов

Узлы мультиграфа, представляющие минимальные *s*-подграфы, будем помечать специальным значком (галочкой). На рисунке 8 изображены два минимальных стягиваемых подграфа. Простая проверка показывает, что не существует других минимальных *s*-подграфов.

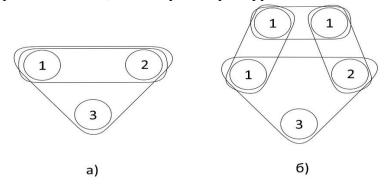


Рис. 8. Примеры минимальных стягиваемых подграфов

После получения мультиграфа и пометки его узлов делается попытка стянуть его в точку. Легко видеть, что в принятых соглашениях можно стягивать только узлы, которые соединены двумя ребрами. Необходимо слить воедино все непомеченные узлы, соединенные только двумя связями друг с другом (рис. 9). На последнем этапе следует анализ полученного состояния. Стягивание мультиграфа означает стягиваемость соответствующего гиперграфа, и, наоборот, неудача при стягивании мультиграфа означает наличие в гиперграфе запрещенных фигур.

Для того, чтобы мультиграф стягивался, необходимо и достаточно выполнения следующих условия:

- 1. В мультиграфе существует хотя бы один помеченный узел.
- 2. Узлы не связаны ребрами кратности три и выше.
- 3. В мультиграфе не существует циклов между помеченными узлами, в том числе двойных связей.
- 4. Каждый непомеченный узел связан только с одним помеченным узлом ребром кратности два.

Некоторые примеры гиперграфов и результаты их обработки алгоритмом приведены на рисунке 10. Более подробные результаты анализа представлены в таблице 1.

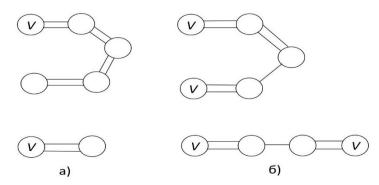


Рис. 9. Примеры слияний непомеченных узлов

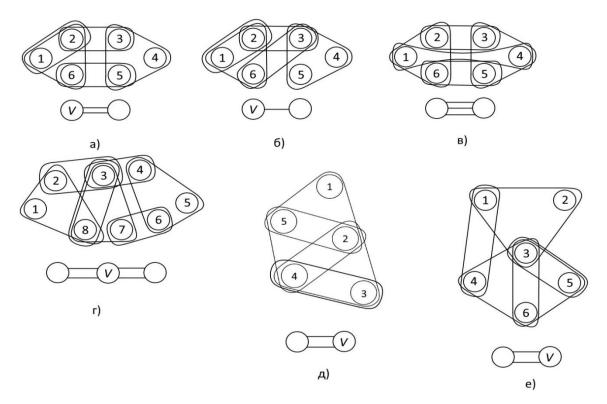


Рис. 10. Примеры гиперграфов после их обработки алгоритмом

Таблица 1. Результаты обработки гиперграфов

			, ,	1 1 1
Гиперграф на	Количество	Количество рёбер	Количество рёбер	Запрещенная
рисунке	вершин	третьей степени	второй степени	фигура
a	6	2	3	Нет
б	6	2	3	Есть
В	6	2	3	Есть
Γ	8	3	4	Нет
Д	5	3	1	Нет
e	6	2	3	Нет

В общем виде алгоритм определения запрещенных фигур представлен в виде блоксхемы на рисунке 11, а. На этом рисунке номера 1 и 2 обозначают следующие операторы:

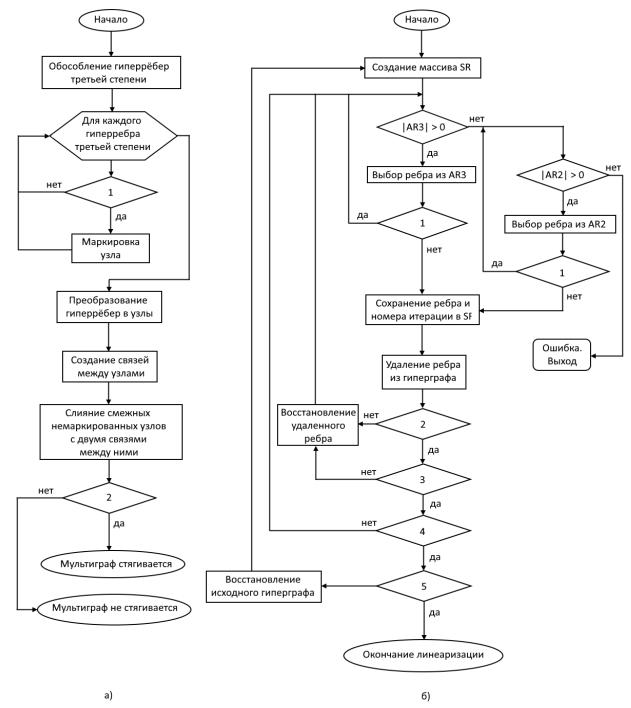
- 1. Гиперребро является минимальным стягиваемым подграфом.
- 2. Выполняются условия стягиваемости мультиграфа 1 4, описанные ранее.

### 4. Алгоритм линеаризации гиперграфов.

Блок-схема алгоритма линеаризации представлена на рисунке 11, б. Для описания работы алгоритма приняты следующие обозначения: AR2 - массив рёбер гипергра-

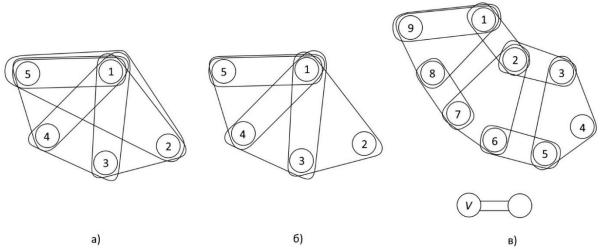
фа второй степени, AR3 - массив рёбер гиперграфа третьей степени, |AR2| и |AR3| - количество элементов в массивах AR2 и AR3 соответственно, SR — массив сохраненных рёбер, также содержащий номер итерации при сохранении. Номерами 1-5 обозначены следующие операторы:

- 1. Условный оператор, который проверяет содержится ли ребро в списке сохраненных ребер и совпадает ли сохраненный номер итерации с текущим?
- 2. Проверка гиперграфа на связность.
- 3. Проверка на наличие ребер второй степени.
- 4. Проверка соотношения |X| = |R| + 1.
- 5. Проверка гиперграфа на стягиваемость.



**Рис. 11.** Блок-схема алгоритма анализа запрещенных фигур (а), блок-схема алгоритма линеаризации гиперграфов (б)

Продемонстрируем работу алгоритма (рис.11, б) на примере избыточного гиперграфа, показанного на рис. 12, а. Для линеаризации этого примера необходимо выбрать и удалить гиперребро третьей степени. Пусть это ребро {5,1,2}. Гиперграф без выбранного ребра является связным и содержит ребро второй степени. Далее проверяется стягивание линеаризованного гиперграфа. Для этого выполняются все операции, описанные в алгоритме анализа запрещенных фигур. Гиперграф в форме с разделенными ребрами и его мультиграф показаны на рис 12, в.



**Рис. 12.** Этапы линеаризации гиперграфа: а –гиперграф; б – гиперграф с удаленным ребром; в – представление гиперграфа в форме с разделенными ребрами и соответствующий ему мультиграф

Заключение. Статья посвящена генерации неизбыточных механических структур сложных технических систем. Механическая структура изделия формируется на самых ранних этапах жизненного цикла, сразу после синтеза трехмерной геометрической модели изделия. Это важное проектное решение оказывает значительное влияние на поведение системы в процессе сборки, разборки, ремонта и утилизации. Современные САД-системы не имеют программных средств для синтеза и верификации механических структур. Во многих проектных ситуациях эти структуры оказываются избыточными. Это тяжелая проектная ошибка, которая при изготовлении изделия приводит к появлению неразрешимых размерных цепей и перебазированию. Для описания механической структуры изделия используется гиперграфовая модель. Она формализует базирование деталей при сборке изделия как отношение переменной местности и позволяет идентифицировать структурную избыточность. Структурная избыточность преодолевается удалением лишних механических связей. В гиперграфовых терминах эта процедура называется линеаризацией модели. Показано, что линеаризация может привести к появлению запрещенных фигур. Таковыми являются подграфы гиперграфа, которые описывают структуры несобираемых конструктивных фрагментов. Предложены алгоритмы, линеаризации гиперграфов и проверки их на запрещенные фигуры. Разработанные алгоритмы могут быть использованы при проектировании сложных технических систем в современных интегрированных CAD/CAM/CAE-системах.

#### Список источников

- 1. De Fazio T.L., Whitney D.E. Simplified generation of all mechanical assembly sequences. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, vol. 3, no. 6, pp. 640-658.
- 2. Antonsson E.K., Cagan J. Formal engineering design synthesis. Cambridge University Press, 2005, 500 p.
- 3. Homem De Mello L.S., Sanderson A.C. A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, vol. 7, iss. 2, pp. 228-240.
- 4. Lee Y.Q., Kumara S.R.T. Individual and group disassembly sequence generation through freedom and interference spaces. Journal of Design and Manufacturing, 1992, vol. 2, pp. 143-154.

- 5. Homem de Mello L.S., Lee S. Computer-Aided mechanical assembly planning. The springer international series in engineering and computer science, 1991, vol. 148, 464 p.
- 6. Lopes L. S., Camarinha-Matos L. M. Learning failure recovery knowledge for mechanical assembly. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1996, vol. 2, pp. 712-719.
- 7. De Fazio T., Whitney D. Simplified generation of all mechanical assembly sequences. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, vol. 3, no. 6, pp. 640-658.
- 8. Grewal S. et al. Assembly planning software. CIRP annals, 1995, vol. 44, np. 1, pp. 1-6.
- 9. Zha X.F., Lim S.Y.E., Fok S.C. Development of expert system for concurrent product design and planning for assembly. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999, vol. 15, no. 3, pp. 153-162.
- 10. Karjalainen I. et al. Assembly sequence planning of automobile body components based on liaison graph. Assembly automation, 2007, pp. 21-36.
- 11. Park H.S. et al. Development of automatic assembly sequence generating system based on the New type of parts liaison graph. IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 540-549.
- 12. Bourjault A. Methodology of assembly automation: A new approach. Robotics and Factories of the Future, 1988, pp. 37-45.
- 13. Karjalainen I. et al. Assembly sequence planning of automobile body components based on, assembly automation, 2007, pp.178-192.
- 14. Park H.S. et al. Development of automatic assembly sequence generating system based on the new type. IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 540-549.
- 15. Vigano R., Gómez G.O. Assembly planning with automated retrieval of assembly sequences from CAD model information. Assembly Automation, 2012, pp.112-114.
- 16. Erdos G., Kis T., Xirouchakis P. Modelling and evaluating product end-of-life options. International Journal of Production Research, 2001, vol. 39, no. 6, pp. 1203-1220.
- 17. De Mello L.S.H., Sanderson A.C. Representations of mechanical assembly sequences. IEEE transactions on Robotics and Automation, 1991, vol. 7, no. 2, pp. 211-227.
- 18. Sambhoos K., Koc B., Nagi R. Extracting assembly mating graphs for assembly variant design. Journal of computing and information science in engineering, 2009, vol. 9, no. 3, pp. 17-21.
- 19. Ko H., Lee K. Automatic assembling procedure generation from mating conditions. Computer-Aided Design, 1987, vol. 19, no. 1, pp. 3-10.
- 20. Gu P., Yan X. CAD-directed automatic assembly sequence planning. International Journal of Production Research, 1995, vol. 33, no. 11, pp. 3069-3100.
- 21. Su Q. A hierarchical approach on assembly sequence planning and optimal sequences analyzing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, vol. 25, no. 1, pp. 224-234.
- 22. Zhang J. et al. Generic face adjacency graph for automatic common design structure discovery in assembly models. Computer-Aided Design, 2013, vol. 45, no. 8, pp. 1138-1151.
- 23. Божко А.Н. Анализ стягиваемости гиперграфов / А.Н. Божко, Е.А. Бетин // Информационные технологии. Москва: Издательство «Новые Технологии», 2005. № 5. С. 6-8.
- 24. Божко А.Н. Математические модели базирования и избыточности в механических системах / А.Н. Божко, Б.С. Сюсюкалов // Информационные технологии. Москва: Издательство «Новые Технологии», 2014. N 3. С. 11-18.
- 25. Whitney D.E. Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development. Oxford University Press, 2004, 518 p.
- 26. Божко А.Н., Криволапова А.С. Удаление избыточности в механических структурах по критерию расчленяемости / А.Н. Божко, А.С. Криволапова // Наука и образование. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 11. С. 267-280.
- 27. Божко А.Н. Математическое моделирование механических конструкций и процессов сборки сложных технических систем / А.Н. Божко // Международная российская конференция по автоматизации. 2021. C. 80-91.

**Божко Аркадий Николаевич,** д.т.н., профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана, bozhkoan@bmstu.ru, Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5.

**Черняев Роман Валерьевич,** магистр 2 курса, МГТУ им. Н.Э. Баумана, AuthorID: 1165256, SPIN-код: 7043-4482, kayl.sander@gmail.com, Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5.

UDC 004.942

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.018

## Linearization of redundant mechanical structures of complex technical systems

### Arkadij N. Bozhko, Roman V. Chernjaev

N.E. Bauman MSTU, Russia, Moscow, kayl.sander@gmail.com

**Abstract.** The paper deals with the problem of synthesis of non-redundant mechanical structures of complex technical systems. A hypergraph is used as a mathematical model of the mechanical structure. This model adequately describes the processes of assembly, disassembly and decomposition of the product into assembly units. It can be used to identify the structural redundancy of the product. In terms of the hypergraph model, overcoming redundancy is called linearization. It is shown that this operation can lead to the appearance of forbidden figures, that is, such subgraphs that describe unassembled constructive fragments. Algorithms are proposed that make it possible to perform linearization followed by a check for the presence of forbidden figures. The developed algorithms can be used in the design of complex technical systems in modern integrated CAD/CAM/CAE systems.

**Keywords:** mechanical structure, hypergraph, structural redundancy, basing, contraction, assembly, assembly sequence, computer-aided design

#### References

- 1. De Fazio T.L., Whitney D.E. Simplified generation of all mechanical assembly sequences. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, vol. 3, no. 6, pp. 640–658.
- 2. Antonsson E.K., Cagan J. Formal engineering design synthesis. Cambridge University Press, 2005, 500 p.
- 3. Homem De Mello L.S., Sanderson A.C. A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, vol. 7, iss. 2, pp. 228-240.
- 4. Lee Y.Q., Kumara S.R.T. Individual and group disassembly sequence generation through freedom and interference spaces. Journal of Design and Manufacturing, 1992, vol. 2, pp. 143-154.
- 5. Homem de Mello L.S., Lee S. Computer-Aided mechanical assembly planning. The springer international series in engineering and computer science, 1991, vol. 148, 464 p.
- 6. Lopes L. S., Camarinha-Matos L. M. Learning failure recovery knowledge for mechanical assembly. Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1996, vol. 2, pp. 712-719.
- 7. De Fazio T., Whitney D. Simplified generation of all mechanical assembly sequences. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1987, vol. 3, no. 6, pp. 640-658.
- 8. Grewal S. et al. Assembly planning software. CIRP annals, 1995, vol. 44, np. 1, pp. 1-6.
- 9. Zha X.F., Lim S.Y.E., Fok S.C. Development of expert system for concurrent product design and planning for assembly. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999, vol. 15, no. 3, pp. 153-162.
- 10. Karjalainen I. et al. Assembly sequence planning of automobile body components based on liaison graph. Assembly automation, 2007, pp. 21-36.
- 11. Park H.S. et al. Development of automatic assembly sequence generating system based on the New type of parts liaison graph. IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 540-549.
- 12. Bourjault A. Methodology of assembly automation: A new approach. Robotics and Factories of the Future, 1988, pp. 37-45.
- 13. Karjalainen I. et al. Assembly sequence planning of automobile body components based on, assembly automation, 2007, pp.178-192.
- 14. Park H.S. et al. Development of automatic assembly sequence generating system based on the new type. IFIP International Conference on Product Lifecycle Management, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 540-549.
- 15. Vigano R., Gómez G.O. Assembly planning with automated retrieval of assembly sequences from CAD model information. Assembly Automation, 2012, pp.112-114.
- 16. Erdos G., Kis T., Xirouchakis P. Modelling and evaluating product end-of-life options. International Journal of Production Research, 2001, vol. 39, no. 6, pp. 1203-1220.
- 17. De Mello L.S.H., Sanderson A.C. Representations of mechanical assembly sequences. IEEE transactions on Robotics and Automation, 1991, vol. 7, no. 2, pp. 211-227.
- 18. Sambhoos K., Koc B., Nagi R. Extracting assembly mating graphs for assembly variant design. Journal of computing and information science in engineering, 2009, vol. 9, no. 3, pp. 17-21.
- 19. Ko H., Lee K. Automatic assembling procedure generation from mating conditions. Computer-Aided Design, 1987, vol. 19, no. 1, pp. 3-10.

- 20. Gu P., Yan X. CAD-directed automatic assembly sequence planning. International Journal of Production Research, 1995, vol. 33, no. 11, pp. 3069-3100.
- 21. Su Q. A hierarchical approach on assembly sequence planning and optimal sequences analyzing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, vol. 25, no. 1, pp. 224-234.
- 22. Zhang J. et al. Generic face adjacency graph for automatic common design structure discovery in assembly models. Computer-Aided Design, 2013, vol. 45, no. 8, pp. 1138-1151.
- 23. Bozhko A.N., Betin E.A. Analiz stjagivaemosti gipergrafov [Analysis of contractibility of hypergraphs]. Informacionnye tehnologii [Information Technology], Moscow, Publ. New technologies, 2005, no. 5, pp. 6-8.
- 24. Bozhko A.N., Sjusjukalov B.S. Matematicheskie modeli bazirovanija i izbytochnosti v mehanicheskih sistemah [Mathematical models of basing and redundancy in mechanical systems]. Informacionnye tehnologii [Information Technology], Moscow, Publ. New technologies, 2014, no.3, pp. 11-18.
- 25. Whitney D.E. Mechanical assemblies: Their design, Manufacture, and role in product development. Oxford University Press, 2004, 518 p.
- 26. Bozhko A.N., Krivolapova A.S. Udalenie izbytochnosti v mehanicheskih strukturah po kriteriju raschlenjaemosti [Removal of redundancy in mechanical structures according to the criterion of dismemberment]. Nauka i obrazovanie [Science and education], Moscow, Publ. N.E. Bauman MSTU, 2014, no.11, pp. 267-280.
- 27. Bozhko A.N. Matematicheskoe modelirovanie mehanicheskih konstrukcij i processov sborki slozhnyh tehnicheskih system [Mathematical modeling of mechanical structures and assembly processes of complex technical systems]. International Russian Conference on Automation, 2021, pp. 80-91.

Bozhko Arkadij Nikolaevich. Professor, MSTU, bozhkoan@bmstu.ru, 105005, Russia, Moscow, Baumanskaya 2-ya., 5/1.

Chernjaev Roman Valerevich. Second course master, MSTU, AuthorID: 1165256, SPIN: 7043-4482, kayl.sander@gmail.com, 105005, Russia, Moscow, Baumanskaya 2-ya., 5/1.

Статья поступила в редакцию 08.06.2022; одобрена после рецензирования 23.09.2022; принята к публикации 23.09.2022.

The article was submitted 06/08/2022; approved after reviewing 09/23/2022; accepted for publication 09/23/2022.

УДК 519-7

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.019

## Прогнозирование и оптимизация усталостной долговечности осевого облопаченного диска с преднамеренной расстройкой

## Нгуен Ван Винь, Репецкий Олег Владимирович

Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, Россия, Иркутск, *vinh.july177@ gmail.com* 

Аннотация. Исследование долговечности рабочих колес современных турбомашин с учетом преднамеренной расстройки параметров с помощью анализа чувствительности, отличающихся геометрической сложностью конструкций, требует больших вычислительных ресурсов. В связи с этим необходимо разработать и развить методы уменьшения требуемых компьютерных затрат (память, быстродействие), тем самым снизить трудоемкость моделирования, ускорить процесс проектирования. В данной работе представлена математическая модель для оптимизации введения преднамеренной расстройки с целью получения конструкций с повышенной долговечностью. Статья посвящена применению математических моделей для прогнозирования и оптимизации усталостной долговечности осевого облопаченного диска с преднамеренной расстройкой на основе метода конечных элементов (МКЭ). Выполнено численное исследование введения преднамеренной расстройки на основе созданных математических моделей динамической нагрузки лопаток турбомашин и оценки ресурсных характеристик. Для исследования влияния преднамеренной расстройки рабочих колес турбомашин применены программный комплекс ANSYS WORKBENCH и оригинальные авторские программы. Объект исследования – академическое рабочее колесо с 10-ю лопатками, изготовленное в Бранденбургском техническом университете. Использование результатов в данной работе позволяет повысить эффективность и надежность на стадии проектирования деталей рабочих колес турбомашин. На основе полученных результатов возможно обеспечить необходимую точность расчетов и провести вычислительные эксперименты для исследования влияния преднамеренной расстройки параметров на долговечность осевых реальных рабочих колес.

**Ключевые слова:** академическое рабочее колесо, геометрическое изменение, долговечность, метод конечных элементов, оптимизация, преднамеренная расстройка

**Цитирование:** Нгуен В.В. Прогнозирование и оптимизация усталостной долговечности осевого облопаченного диска с преднамеренной расстройкой / В.В. Нгуен, О.В. Репецкий // Информационные и математические технологии в науке и управлении. − 2022. − № 3(27). − С. 204-212. − DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.019.

Введение. Большинство механических конструкций и деталей турбомашин при работе в реальных условиях эксплуатации подвержены воздействию изменяющихся во времени нагрузок, приводящим к напряжениям и деформациям в конструкции, которые также изменяются во времени. Если величина изменения напряжения превышает определенный предел, то в материале конструкции будет происходить процесс накопления повреждений, приводящий к образованию трещин, эти трещины будут разрастаться и в конечном итоге разрушат материал детали. Элементы рабочих колес турбомашин (лопатки и диски) работают в условиях огромных статических нагрузок, вызванных воздействием центробежных сил, давления и неравномерного нагрева, а также испытывают переменные циклические нагрузки при вынужденных колебаниях, обусловленных воздействием газовых сил [1]. При сборке и изготовлении рабочих колес часто бывают небольшие отклонения между лопатками, называемые расстройкой параметров. Это также приводит к значительным изменениям их колебательных параметров (форма, частота), а также к увеличению динамических напряжений и снижению ресурса лопаток рабочих колес.

Причины расстройки бывают разные: небольшие отклонения в пределах допусков, отличия геометрии секторов колеса или лопаток, неоднородность материала и др. [2-4]. Разработка математических моделей для исследования динамики, долговечности и прочности ра-

бочих колес, а также для увеличения надежности энергетических установок с расстройкой параметров является актуальной задачей.

Для анализа динамики и долговечности деталей и конструкций в целом необходимо создание специализированных программных комплексов на основе метода конечных элементов (МКЭ). От уровня достоверности математических моделей, затрат времени на подготовку исходных данных, расчет и обработку результатов зависит эффективность конструкторских САПР машиностроительных изделий. Таким образом, при автоматизации расчетов динамики и долговечности необходимо решить связанные задачи:

- создание математического и программного обеспечения, обладающего достаточной точностью;
- снижение трудоемкости расчетов за счет применения наиболее эффективных методов линейной алгебры и математического моделирования;
- создание предпроцессора и постпроцессора для ускорения подготовки входной информации и обработки результатов вычислений.

В данной статье рассмотрен разработанный комплекс программ для определения значения расстройки параметров лопаток рабочих колес турбомашин и исследования влияния расстройки параметров на статическое напряженно-деформированное состояние, динамические характеристики и долговечность рабочих колес турбомашин с учетом анализа чувствительности.

Общая схема разработанного комплекса программ показана на рисунке 1.

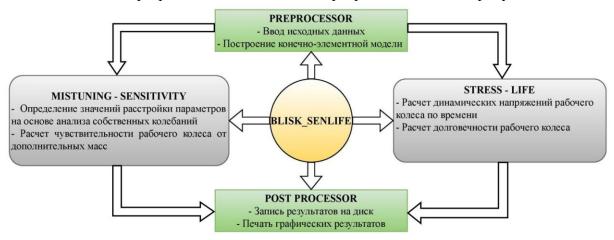


Рис. 1. Общая схема разработанного комплекса программ

В комплексе программ представлены и реализованы основные уравнения, в которых моделируется расстройка при расчете на основе программного языка пакета МАТLAВ по блок-схеме алгоритма расчета. Расчет в программе построен с помощью МКЭ. Разработанный комплекс программ позволяет решать задачи широкого класса для разных отраслей машиностроения. Приведенное ниже описание характеризует комплекс с позиций анализа турбомашин, однако при необходимости программы могут быть применены и для других конструкций. Данный комплекс программ содержит несколько подсистем, описание которых приведено ниже:

- PREPROCESSOR Выполнение функции предпроцессора, ввод исходных данных и построение конечноэлементной модели.
- MISTUNING-SENSITIVITY Определение значений расстройки параметров на основе анализа собственных колебаний и расчет чувствительности собственных частот колебаний от дополнительных масс.
- STRESS-LIFE Расчет динамических напряжений по времени и прогнозирование долговечности исследуемой модели в циклах.

- POSTPROCESSOR Выполнение функции постпроцессора. Информация о рассчитанных динамических характеристиках и напряжениях, долговечности и др. графически визуализируется на дисплее и (или) печатающем устройстве.
- 1. Математические модели для оптимизации введения преднамеренной расстройки рабочих колес турбомашин. В настоящее время имеется достаточно большое количество вариантов преднамеренной расстройки [5-10], каждый из которых может быть либо использован на реальных конструкциях, либо служит некой моделью, позволяющей определить закономерности влияния тех или иных изменений на статические и динамические характеристики промышленных турбомашин. К числу последних можно отнести, например, внесение некоторых сосредоточенных масс в определенные точки поверхности пера лопаток. Другие параметры можно использовать для преднамеренной расстройки реальных рабочих колес, так как они не оказывают существенного влияния на аэродинамику рабочих ступеней турбомашин. К таким параметрам можно отнести: изменение толщины и степени закрутки лопаток, скругление или обрезание углов лопатки на ее периферии, шлифование отдельных частей лопатки или неоднородность материала пера. Значение максимального вынужденного отклика лопаток роторов турбомашин с расстройкой параметров обычно намного больше, чем у настроенных роторов. Увеличение уровня расстройки до критического значения фактически приводит к уменьшению коэффициента увеличения амплитуды. Кроме этого, преднамеренная расстройка рабочего колеса турбомашины увеличивает его долговечность за счет гашения резонансных колебаний. Таким образом, актуальной задачей является введение некоторой степени преднамеренной расстройки в конструкцию системы, для улучшения ее прочностных параметров. В данной работе была разработана математическая модель для оптимизации введения преднамеренной расстройки с целью получения конструкций с повышенной долговечностью. Максимальное перемещение в случае оптимизации преднамеренной расстройки определяется по формуле [11, 12]:

$$\delta_{\text{max}} = \max\{\delta_i(E)\}, i = 1, 2, ..., N,$$
 (1)

где N — количество лопаток. В зависимости от количества лопаток  $E = \{\Delta E_1, \Delta E_2, ..., \Delta E_{10}\}$  обозначает, в данном случае, изменение модуля Юнга (механических характеристик материала) от лопатки к лопатке. Вариации расстройки лопатки моделируются с помощью изменений жесткости  $\Delta E_i$  на основе МКЭ. Метод конечных элементов позволяет выполнить расчеты различных вариантов конструкций в короткое время. Некоторыми из преимуществ МКЭ при проектировании и изготовлении турбомашин являются легкость задания различных граничных условий, простота учета нескольких материалов (изменение модуля Юнга) в одной конструкции и др. Отношение между отклонением частоты собственных колебаний  $\Delta f_i$  i-й лопатки и модуля Юнга  $\Delta E_i$  при оптимизации введения расстройки определяется по формуле:

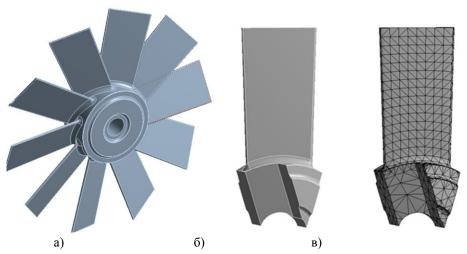
$$\Delta E_i = E_0 \cdot \left(\frac{f_0 + \Delta f_i}{f_0}\right)^2 \approx 2\Delta f_i, \tag{2}$$

где  $E_0$  и  $f_0$  – номинальное значение модуля Юнга и частоты собственных колебаний в идеальной конструкции. Значение преднамеренной расстройки  $\Delta f_{_{np}}^{^{on}}$  при оптимизации прочностных параметров получается из экспериментальных отклонений частот собственных колебаний и определяется по формуле:

$$\Delta f_{np}^{on} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \Delta f_{i}^{skc}}{N}, \tag{3}$$

где  $\Delta f_i^{\infty}$  — экспериментальное отклонение частот собственных колебаний лопатки академического рабочего колеса.

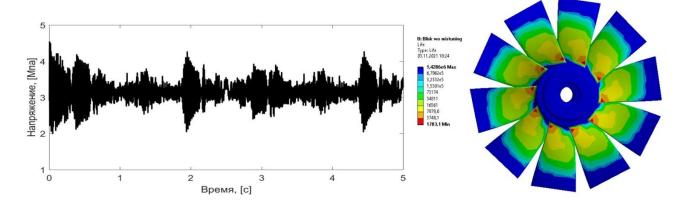
2. Численные результаты усталостной долговечности осевого облопаченного диска с преднамеренной расстройкой. В качестве объекта исследования рассмотрено академическое рабочее колесо с 10-ю лопатками. Основные механические характеристики исследуемого объекта имеют вид: материал рабочего колеса − сталь, модуль Юнга − 2,1·10<sup>5</sup> *H* / *мм*<sup>2</sup>, плотность − 7850 кг / м³, коэффициент Пуассона − 0,3. Общий вид академического колеса представлен на рисунке 2. Численные исследования в данной работе выполнены на модельных конструкциях и также подкреплены экспериментальными данными. Конструкция была жестко закреплена по ободу диска. В качестве конечноэлементной модели в данной работе применяется тетраэдральный конечный элемент TET10 коммерческой программы ANSYS WORKBENCH с 3-мя степенями свободы в узле и с общим количеством конечных элементов одного сектора − 2925 и 5741 узловыми точками. Количество степеней свободы составляет − 17233.



**Рис. 2.** Академическое рабочее колесо с 10-ю лопатками (а) общий вид; б) вид одного сектора; в) конечноэлементная модель сектора)

Для численной оценки долговечности данной конструкции применена математическая модель на основе численного метода систематизации динамических напряжений Rain-Flow (метод «дождя») и линейной гипотезы суммирования напряжений Palmgren-Miner [13]. Результаты расчета динамического напряжения и многоцикловой долговечности лопатки академического колеса в диапазоне 0 - 5 (с) показаны на рисунке 3.

На следующем этапе исследования проведена оптимизация введения расстройки параметров. На основании требования о стабилизации рабочего колеса в условиях динамической нагрузки для второй формы колебаний и максимальной скорости вращения 100 (1/c) выполнена оптимизация схемы преднамеренной расстройки путем изменения жесткости лопаток. Оптимизация преднамеренной расстройки состоит в переборе заранее заданных вариантов такой расстройки, выполненных в работе [14]. Результат оптимизации преднамеренной расстройки получен на основе численно-экспериментальных исследований частот колебаний академического рабочего колеса, путем определения отклонения частот собственных колебаний лопаток на основе анализа среднего отклонения экспериментальных частот колебаний и корректировки исходного варианта расстройки.



**Рис. 3.** Расчет динамического напряжения (слева) и долговечности академического колеса (справа) без преднамеренной расстройки в диапазоне 0-5 (c)

Рисунок 4 показывает значение расстройки лопаток колеса для второй формы колебаний при оптимизации преднамеренной расстройки. Результат долговечности академического колеса с учетом преднамеренной расстройки параметров, вносимой в систему путем изменения модуля упругости лопаток, показан в работе [14].

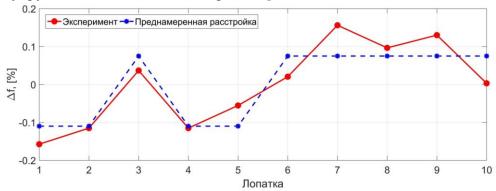


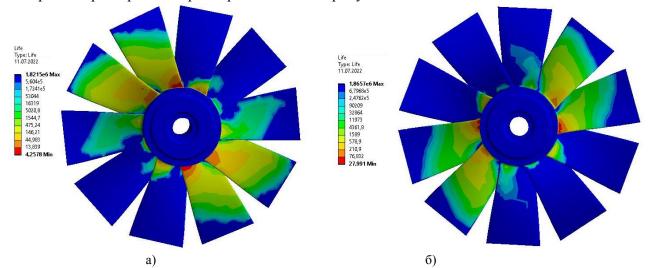
Рис. 4. Оптимизация введения преднамеренной расстройки

В данной работе были предприняты усилия по технической реализации преднамеренной расстройки. Согласно теории, собственная частота может быть увеличена или уменьшена за счет регулировки жесткости конструкции или геометрического изменения лопатки в конструкции. Однако изменение жесткости конструкции очень сложно применить на практике. Поэтому самый простой способ для регулировки собственной частоты лопатки облопаченного диска является изменением геометрии лопатки для обеспечения эффекта преднамеренной расстройки. Согласно результатам численного исследования преднамеренной расстройки при разных изменениях геометрии лопатки академического рабочего колеса, приведенным в работах [15, 16], варианты изменения радиуса закругления или изменения толщины лопатки можно использовать для анализа оптимизации по значениям расстройки параметров, так как изменение геометрии лопатки для этих вариантов можно легко, быстро и точно выполнять с помощью обычного станка с ЧПУ без каких-либо затруднений. Например, по расчету собственных частот колебаний без учета и с учетом вращения по изменению толщины лопатки на  $\pm 10\%$  [15], собственная частота для второй формы колебаний была увеличена на 10,6% при утолщении лопатки и уменьшена на 10,56% при утончении лопатки в сравнении с результатом исходного варианта. Поэтому для исследования оптимизации преднамеренной расстройки по изменению геометрии лопатки академического рабочего колеса, показанного на рисунке 4, был исследован первый вариант – уменьшение толщины лопатки

(1, 2, 4, 5) на 0,1% (для получения  $\Delta f_{np}^{on} = -0,11\%$  по формуле (3)) и увеличение толщины лопатки (3, 6-10) на 0,07% (для получения  $\Delta f_{np}^{on} = 0,075\%$  по формуле (3)).

По результатам изменения частоты собственных колебаний лопаток от величины радиуса перехода пера лопатки в обод диска [16] при уменьшении радиуса перехода на 2 мм (с R=5 мм до R=3 мм), собственная частота для второй формы колебаний уменьшается на 1,23%. Наоборот, при увеличении радиуса перехода на 2 мм (с R=5 мм до R=7 мм), собственная частота колебаний увеличивается на 0,91%. Таким образом, в этом случае второй вариант оптимизации преднамеренной расстройки выполняется путем уменьшения радиуса закругления лопатки (1, 2, 4, 5) на 0,18 мм (для получения  $\Delta f_{np}^{on} = -0,11\%$  по формуле (3)) и увеличения радиуса закругления лопатки (3, 6-10) на 0,16 мм (для получения  $\Delta f_{np}^{on} = 0,075\%$  по формуле (3)).

Далее приведен результат численного исследования долговечности академического рабочего колеса в случае оптимизации преднамеренной расстройки путем геометрических изменений лопатки. Расчет долговечности академического колеса с учетом оптимизации преднамеренной расстройки параметров показан на рисунке 5.



**Рис. 5.** Оптимизация долговечности рабочего колеса с преднамеренной расстройкой (а) первый вариант; б) второй вариант)

В таблице 1 представлен численный анализ введения преднамеренной расстройки и влияние ее на долговечность данной конструкции с учетом оптимизации по геометрическим изменениям лопатки.

**Таблица 1.** Результаты оптимизации долговечности по геометрическим изменениям лопатки

Вариант	Случай геометрического изменения	Долговечность (в циклах)	$\Delta ar{N}$ (%)
0	Без изменения	$1,4286 \cdot 10^6$	0
1	Радиус перехода пера лопатки в обод диска	1,8215·10 <sup>6</sup>	+27,5
2	Толщина лопатки	$1,8657 \cdot 10^6$	+30,6

Анализ таблицы 1 показывает, что долговечность академического колеса увеличивается на 27,5 % при оптимизации преднамеренной расстройки с учетом изменения радиуса перехода лопатки в обод диска. Второй вариант оптимизации преднамеренной расстройки по изменению толщины лопатки дает увеличение долговечности академического колеса в сравне-

нии с исходным колесом на 30,6%. Использование данных численных результатов позволяет повысить эффективность и надежность новых конструкций на стадии проектирования и доводки элементов рабочих колес турбомашин с минимальными временными затратами.

Заключение. В статье рассмотрено применение разработанного комплекса программ для проведения анализа эффективности применения математических моделей при моделировании преднамеренной расстройки параметров на основе геометрических изменений лопатки рабочего колеса. Выполнено исследование влияния преднамеренной расстройки на усталостную долговечность лопаточных структур. Представлены результаты численного исследования долговечности академического рабочего колеса при оптимизации введения преднамеренной расстройки. Анализ полученных результатов показывает, что оптимизация преднамеренной расстройки по изменению толщины лопатки приводит к максимальному увеличению долговечности академического рабочего колеса на 30,6% в сравнении с результатом долговечности без введения преднамеренной расстройки.

#### Список источников

- 1. Нгуен Т.К. Математические модели и программный комплекс для оценки влияния расстройки параметров рабочих колес энергетических турбомашин на их долговечность: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук /Нгуен Тьен Кует: Иркутский национальный исследовательский технический университет. Иркутск, 2018. 18 с.
- 2. Yang M.T., Griffin J.H. A Reduced-Order model of Mistuning Using a Subset of Nominal System Modes. J Eng Gas Turb Power, 2001, vol. 123, pp. 893-900.
- 3. Giersch T., Hönisch P., Beirow B., Kühhorn A. Forced Response Analysis of Mistuned Radial Inflow Turbines. J Turbomach, 2013, 135 (3), paper 031034, pp. 1-9.
- 4. Petrov E.P., Ewins D.J. Analysis of the Worst Mistuning Patterns in Bladed Disk Assemblies. J Turbomach, 2003, 125, pp. 623-631.
- 5. Han Y., Murthy R., Mignolet M.P., Lentz J. Optimization of intentional mistuning patterns for the mitigation of effects of random mistuning. J Eng Gas Turb Power, 2014, vol. 136, no. 6, paper 062505, pp. 1-9.
- 6. Figaschewsky F., Kühhorn A., Beirow B., Nipkau J., Giersch T., Power B. Design and analysis of an intentional mistuning experiment reducing flutter susceptibility and minimizing forced response of a jet engine fan. ASME Paper, 2017, no. GT2017–64621.
- 7. Martel C., Sánchez-Álvarez J.J. Intentional mistuning effect in the forced response of rotors with aerodynamic damping. Journal of Sound and Vibration, 2018, vol. 433, pp. 212-229.
- 8. Castanier M.P., Pierre C. Using intentional mistuning in the design of turbomachinery rotors. AIAA Journal, 2002, vol. 40, no. 10.
- 9. Lim S.H., Castanier M.P., Pierre C. Intentional mistuning design space reduction based on vibration energy flow in bladed disks. ASME–Paper, 2004, GT2004–53873.
- 10. Martel C., Corral R., Llorens J.M. Stability increase of aerodynamically unstable rotors using intentional mistuning. J Turbomach, January 2008, 130(1):011006.
- 11. Beirow B., Kühhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetckii O. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning. Proceedings of ASME, 2018, GT2018–76584.
- 12. Beirow B., Figaschewsky F., Kühhorn A., Bornhorn A. Vibration analysis of an axial turbine blisk with optimized intentional mistuning pattern. Journal of sound and vibration, 2019, vol. 442, pp. 11-27.
- 13. Репецкий О.В. Компьютерный анализ динамики и прочности турбомашин / О.В. Репецкий Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. 301 с.
- 14. Нгуен В.В., Математическое моделирование и его применение в преднамеренной расстройке параметров и оптимизации ресурсных характеристик турбомашин/ В.В. Нгуен, О.В. Репецкий // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2022. № 2(26). С. 24-30.
- 15. Репецкий О.В. Численное исследование преднамеренной расстройки при вариациях толщины лопаток энергетических турбомашин / О.В. Репецкий, В.В. Нгуен // Вестник НГИЭИ, 2021. № 8 (123). С. 44-56.
- 16. Репецкий О.В., Нгуен В.В. Анализ вынужденного отклика облопаченных дисков турбомашин с учетом преднамеренной расстройки // О.В. Репецкий, В.В. Нгуен // Байкальский Вестник DAAD, 2021. № 1. С. 47-80.

**Нгуен Ван Винь.** Аспирант кафедры «Электрооборудование и физика», Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского, AuthorID: 1081813, SPIN-код: 2759-6554, ORCID: 0000-0002-0030-1503, vinh.july177@gmail.com, 664038, Россия, г. Иркутск, пос. Молодежный.

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

UDC 519-7

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.019

# Prediction and optimization of fatigue life of an axial bladed disk with intentional mistuning

Van Vinh Nguyen, Oleg V. Repetckii

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, Russia, Irkutsk, vinh.july177@gmail.com

Abstract. Studying the durability of impellers of the turbomachine taking into account the intentional mistuning parameters using sensitivity analysis, which differ in the geometric complexity of structures, requires large computing resources. In this regard, it is necessary to develop methods in order to reduce the required computer costs (memory, speed), thereby reducing the complexity of simulation and speeding up the design process. This paper presents a mathematical model for optimizing the introduction of intentional mistuning in order to obtain structures with increased durability. The article is devoted to the application of mathematical models for predicting and optimizing the fatigue life of an axial bladed disk with intentional mistuning based on the finite element method (FEM). A numerical study of the introduction of intentional mistuning based on the created mathematical models of the dynamic load of turbomachine blades and estimation of resource characteristics has been carried out. The ANSYS WORKBENCH software package and original author's programs were used to study the effect of intentional mistuning of the bladed disk. The object of this research is an academic bladed disk with 10 blades, manufactured at the Brandenburg University of Technology. Using the obtained results in this work makes it possible to increase the efficiency and reliability at the design stage of turbomachine bladed disk parts. On the basis of such results, it is possible to provide the necessary accuracy of calculations and conduct computational experiments to study the effect of intentional mistuning parameters on the durability of axial impellers.

**Keywords:** academic impeller, geometric change, durability, finite element method, optimization, intentional mistuning

#### References

- 1. Nguen T.K. Matematicheskie modeli i programmnyj kompleks dlja ocenki vlijanija rasstrojki parametrov rabochih koles jenergeticheskih turbomashin na ih dolgovechnost' [Mathematical models and a software package for assessing the effect of mistuning parameters of the impellers of power turbomachines on their durability]. Ph.D. thesis, Irkutsk, 2018, 18 p.
- 2. Yang M. T., Griffin J. H. A Reduced-Order model of Mistuning Using a Subset of Nominal System Modes. J Eng Gas Turb Power, 2001, vol. 123, pp. 893-900.
- 3. Giersch T., Hönisch P., Beirow B., Kühhorn A. Forced Response Analysis of Mistuned Radial Inflow Turbines. J Turbomach, 2013, 135 (3), paper 031034, pp. 1-9.
- 4. Petrov E. P., Ewins D. J. Analysis of the Worst Mistuning Patterns in Bladed Disk Assemblies. J Turbomach, 2003, 125, pp. 623-631.
- 5. Han Y., Murthy R., Mignolet M.P., Lentz J. Optimization of intentional mistuning patterns for the mitigation of effects of random mistuning. J Eng Gas Turb Power, 2014, vol. 136, no. 6, paper 062505, pp. 1-9.
- 6. Figaschewsky F., Kühhorn A., Beirow B., Nipkau J., Giersch T., Power B. Design and Analysis of an Intentional Mistuning Experiment Reducing Flutter Susceptibility and Minimizing Forced Response of a Jet Engine Fan. ASME Paper, 2017, no. GT2017–64621.
- 7. Martel C., Sánchez-Álvarez J. J. Intentional mistuning effect in the forced response of rotors with aerodynamic damping. Journal of Sound and Vibration, 2018, vol. 433, pp. 212-229.

- 8. Castanier M.P., Pierre C. Using intentional mistuning in the design of turbomachinery rotors. AIAA Journal, 2002, vol. 40, no. 10.
- 9. Lim S. H., Castanier M. P., Pierre C. Intentional Mistuning Design Space Reduction Based on Vibration Energy Flow in Bladed Disks. ASME–Paper, 2004, GT2004–53873.
- 10. Martel C., Corral R., Llorens J. M. Stability Increase of Aerodynamically Unstable Rotors Using Intentional Mistuning. J Turbomach, January 2008, 130(1):011006.
- 11. Beirow B., Kühhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetckii O. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning. Proceedings of ASME, 2018, GT2018–76584.
- 12. Beirow B., Figaschewsky F., Kühhorn A., Bornhorn A. Vibration Analysis of an Axial Turbine Blisk with Optimized Intentional Mistuning Pattern. Journal of Sound and Vibration, 2019, vol. 442, pp. 11-27.
- 13. Repeckij O. V. Komp'juternyj analiz dinamiki i prochnosti turbomashin [Computer analysis of the dynamics and strength of turbomachines]. Irkutsk, Izd-vo IrGTU, 1999, 301 p.
- 14. Nguen V. V., Repeckij O. V. Matematicheskoe modelirovanie i ego primenenie v prednamerennoj rasstrojke parametrov i optimizacii resursnyh harakteristik turbomashin [Mathematical modeling and its application in intentional mistuning of parameters and optimization of life characteristics of turbomachines]. Information and mathematical technologies in science and management, 2022, no. 2 (26). pp. 24-30.
- 15. Repeckij O. V., Nguen V. V. Chislennoe issledovanie prednamerennoj rasstrojki pri variacijah tolshhiny lopatok jenergeticheskih turbomashin [Numerical study of intentional mistuning with variations in the thickness of the blades of power turbomachines]. Bulletin of the NGIEI, 2021, no. 8 (123), pp. 44-56.
- 16. Repeckij O. V., Nguen V. V. Analiz vynuzhdennogo otklika oblopachennyh diskov turbomashin s uchetom prednamerennoj rasstrojki [Forced response analysis of bladed disk turbomachine based on intentional mistuning]. Baikal Vestnik DAAD, 2021, no. 1, pp. 47-80.
- Van Vinh Nguyen. Postgraduate student of the Department «Electrical power and physics», Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky, AuthorID: 1081813, SPIN: 2759–6554, ORCID: 0000–0002–0030–1503, vinh.july177@gmail.com, 664038, Russia, Irkutsk, Molodezhny.
- 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.

Статья поступила в редакцию 23.08.2022; одобрена после рецензирования 23.09.2022; принята к публикации 23.09.2022.

The article was submitted 08/23/2022; approved after reviewing 09/23/2022; accepted for publication 09/23/2022.

