

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

Журнал издается с 2010 года

№ 4 (151)

Нижний Новгород 2025

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2025. № 4 (151). – 136 с.

Выходит 4 раза в год

Журнал включен ВАК при Минобрнауки России

в «Перечень рецензируемых научных изданий», в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по специальностям: 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки, физико-математические науки); 2.3.8 – Информатика и информационные процессы (технические науки); 2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность (технические науки); 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)

Главный редактор А.А. Куркин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Члены редколлегии: Н.Ю. Бабанов, В.В. Беляков, В.А. Горбунов, С.М. Дмитриев, Н.Ю. Золотых, М.А. Легчанов, В.С. Макаров, В.Р. Милов, Ю.И. Молев, В.Н. Наумов, П.В. Пакшин, Н.А. Прибатурина, Н.В. Старостин, А.С. Суркова, В.П. Ханилов, А.Е. Хробостов

В.П. Ханилов – ответственный секретарь рубрики
«Информатика, управление и системный анализ»

М.А. Легчанов – ответственный секретарь рубрики «Ядерная энергетика и атомное машиностроение»
Ю.И. Молев – ответственный секретарь рубрики
«Машиностроение и транспорт: теория, технологии, производство»

В.И. Казакова (ответственный редактор)
А.В. Крылова (ответственный секретарь)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

Сергей Михайлович Дмитриев
(д.т.н., проф., ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

Пелиновский Дмитрий Ефимович

PhD, проф. математики, Университет Мак Мастер, Гамильтон, Онтарио, Канада

Палкович Ласло

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

Варлаки Петер

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

Виджай Кумар Чакка

PhD, проф., Университет Шив Надар, Индия

Ялчинер Ахмет

д., проф., METU, директор OERC, Турция

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
(603155, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

Электронная версия журнала:
<https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ntgu-im-r-e-alekseeva>

Средство массовой информации
зарегистрировано Роскомнадзором:
ПИ № ФС 77-56417 от 11.12.2013

УДК 050(06)
ББК 9я54

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2025

MINISTRY OF SCIENCE EDUCATION AND OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER EDUCATION
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEKSEEV

TRANSACTIONS
of NNSTU n.a. R.E. ALEKSEEV

Published since 2010

№ 4 (151)

Nizhny Novgorod 2025

The journal is issued 4 times a year

The journal is included in HAC Ministry of Education and Science

in the «List of peer-reviewed scientific publications where must be published basic scientific results of dissertations on competition of a scientific degree of Candidate of Science, on competition of a scientific degree of Doctor of Science» in specialties: 2.3.1 – System analysis, management and information processing; 2.3.8 – Informatics and informational processes; 2.4.9 – Nuclear installations, fuel cycle, radiation safety; 2.5.11 – Ground transportation and technological facilities and complexes

Editor-in-Chief A.A. Kurkin

EDITORIAL BOARD

Members of Editorial Board: N.Yu. Babanov, V.V. Belyakov, V.A. Gorbunov, S.M. Dmitriev, V.P. Khranilov, A.Ye. Khrabostov, M.A. Legchanov, V.S. Makarov, V.R. Milov, Yu.I. Molev, V.N. Naumov, P.V. Pakshin, N.A. Pribaturin, N.V. Starostin, A.S. Surkova, N.Yu. Zolotykh

V.P. Khranilov – Executive Secretary of the Section « Computer science, management and system analysis »

M.A. Legchanov – Executive Secretary of the Section « Nuclear power and atomic power engineering »

Yu.I. Molev – Executive Secretary of the Section «Mechanical Engineering and Transport»

V.I. Kazakova (Executive Editor)
A.V. Krylova (Executive Secretary)

EDITORIAL COUNCIL

Chairman

S.M. Dmitriev
NNSTU Rector (Nizhny Novgorod, Russia)

Members of Editorial Council

Pelinovski Dmitri

PhD, Doctor of Mathematical Science, Professor
McMaster University (Ontario, Canada)

László Palkovics

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Péter Várlaki

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Vijay Kumar Chakka

PhD, Doctor of Philosophical Science, Professor

Shiv Nadar University (India)

Yalciner Akhmet

Professor, Head of Ocean Engineering Research Center
of Middle East Technical University (Turkey)

EDITOR AND PUBLISHER:

federal state budgetary educational institution of higher education
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

*The certificate on registration of periodic printed editions:
III № ФС 77-56417 11.12.2013*

Electronic version of the journal:

<https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva>

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ	7
Катаева Л.Ю., Вольников Р.М. Оптимизация профиля крыла БПЛА на основе метода вязко-невязкого взаимодействия и генетического алгоритма	7
Куликов В.Б., Куликов А.Б., Хранилов В.П. Двумерный стохастический и R/S-анализ топологии фрактальных микро- и наноструктур. Верификация фрактального подхода	21
Чернобаев И.Д. Техническая диагностика на основе нейросетевого моделирования при неполных данных	31
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ	42
Аркадов Г.В., Колотушкин Д.С., Слепов М.Т. Использование ксеноновых колебаний для минимизации управляющих воздействий на активную зону при манёвренных режимах АЭС	42
Дедов Д.А., Логинов А.В., Семашко В.А., Крепков В.П., Будников А.В. Измерение гидродинамических характеристик в тройниковых соединениях с тупиковыми ответвлениями методами PIV и LDV	57
Курицын Д.Д., Добров А.А., Доронков Д.В., Маринин А.А., Николаев Д.С., Рязанов А.В., Легчанов М.А. Расчетно-экспериментальные исследования струйного смешения в упрощенной геометрии нижнего собирающего коллектора ВТГР	68
Сумин Р.В., Погорелов М.Д., Зырянова Т.К., Колосов С.В., Шалина Д.С. Варианты системы отвода тепла реакторных установок с тяжелым жидкокометаллическим теплоносителем	79
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	93
Жителев Д.А., Рожков А.И., Солопов Д.Ю. Моделирование калибровочного испытания шеи манекена WORLDSID	93
Марковнина А.И. Методика оценки эффективности по подвижности колесных транспортно-технологических средств при движении по бездорожью с применением карт подвижности	109
Сухов А.А., Кузьмин В.А., Пресняков Д.В., Кикеев В.А. Определение механических свойств материалов и параметров моделей деформирования некоторых резин, используемых в транспортно-технологических комплексах	121
НАШИ АВТОРЫ	131

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE, MANAGEMENT AND SYSTEM ANALYSIS	7
Kataeva L.Yu., Volnikov R.M. UAV wing profile optimization based on viscous-inviscid interaction method and genetic algorithm	7
Kulikov V.B., Kulikov A.B., Khranilov V.P. Two-dimensional stochastic and R/S-analysis of fractal micro- and nanostructure topologies. fractal approach verification	21
Chernobaev I.D. Technical diagnostics based on neural network modeling with incomplete data	31
NUCLEAR POWER AND ATOMIC POWER ENGINEERING	42
Arkadov G.V., Kolotushkin D.S., Slepov M.T. Xenon oscillations usage to minimize control actions on the core in load-following modes of nuclear power plants	42
Dedov D.A., Loginov A.V., Semashko V.A., Krepkov V.P., Budnikov A.V. PIV & LDV hydrodynamic measurements in dead leg t-junctions	57
Kuritsin D.D., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Marinin A.A., Nikolaev D.S., Ryazanov A.V., Legchanov M.A. Numerical and experimental investigation of jet mixing in simplified geometry of high-temperature gas-cooled reactor	68
Sumin R.V., Pogorelov M.D., Zyryanova T.K., Kolosov S.V.. Shalina D.S. Heat removal system options for heavy liquid metal coolant reactor plants	79
MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION	93
Zhitelev D.A., Rozhkov A.I., Solopov D.Yu. Simulation of WORLDSID dummy neck calibration test	93
Markovnina A.I. Methodology for efficiency assessment of wheeled transport and technological vehicles in off-road moving based on mobility using mobility maps	109
Sukhov A.A., Kuzmin V.A., Presnyakov D.V., Kikeev V.A. Determination of material mechanical properties and deformation models parameters of some rubbers used in transport and technological complexes	121
AUTHORS	131

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

УДК 004.94

DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_7
EDN LAVLUJ

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ КРЫЛА БПЛА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВЯЗКО-НЕВЯЗКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Л.Ю. Катаева

ORCID: 0000-0001-9217-9324 e-mail: kataeval2010@mail.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

Р.М. Вольников

ORCID: 0009-0000-1446-420X e-mail: volnikovramil@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

Предлагается комплексный подход к оптимизации аэродинамических профилей крыльев беспилотных летательных аппаратов самолетного типа. Разработан интегрированный метод, сочетающий преимущества вязко-невязкого взаимодействия для эффективной оценки аэродинамических характеристик с возможностями генетического алгоритма для многокритериальной оптимизации. Принципиальной отличительной чертой предложенного подхода является одновременное рассмотрение трех различных семейств параметрических профилей (NACA4, CST и PARSEC), что значительно обогащает пространство поиска оптимальных конфигураций. Разработанная математическая модель базируется на панельном методе для моделирования невязкого обтекания и системе интегральных уравнений для расчета характеристик пограничного слоя, что обеспечивает баланс между вычислительной эффективностью и точностью. Реализованный генетический алгоритм позволяет проводить оптимизацию с учетом различных эксплуатационных режимов БПЛА, включая барражирование на разных высотах и крейсерский полет. Вычислительные эксперименты демонстрируют повышение аэродинамической эффективности: для семейства NACA производительность возрастает на 4,6 %, для CST – на 10,7 %, для PARSEC – на 3,1 %. Наилучшие результаты показал оптимизированный профиль семейства CST, обеспечивающий оптимальное соотношение подъемной силы и аэродинамического сопротивления для рассматриваемых режимов полета БПЛА.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты; аэродинамическое профилирование; вычислительное моделирование; генетические алгоритмы; вязко-невязкое взаимодействие; многокритериальная оптимизация; параметрическая геометрия аэродинамических профилей.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Катаева, Л.Ю. Оптимизация профиля крыла БПЛА на основе метода вязко-невязкого взаимодействия и генетического алгоритма / Л.Ю. Катаева, Р.М. Вольников // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 7-20. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_7 EDN: LAVLUJ

UAV WING PROFILE OPTIMIZATION BASED ON VISCOUS-INVISCID INTERACTION METHOD AND GENETIC ALGORITHM

L.Yu. Kataeva

ORCID: 0000-0001-9217-9324 e-mail: kataeval2010@mail.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

R.M. VolnikovORCID: 0009-0000-1446-420X e-mail: volnikovramil@gmail.com

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This paper presents a comprehensive approach to optimizing the aerodynamic profiles of fixed-wing unmanned aerial vehicles (UAVs). An integrated method that combines the advantages of viscous-inviscid interaction for efficient evaluation of aerodynamic characteristics with the capabilities of genetic algorithms for multi-criteria optimization has been developed. A fundamental distinctive feature of the proposed approach is the simultaneous consideration of three different families of parametric profiles (NACA4, CST and PARSEC), which significantly enriches the search space for optimal configurations. The developed mathematical model is based on the panel method for modeling inviscid flow and a system of integral equations for calculating boundary layer characteristics, ensuring a balance between computational efficiency and accuracy. The implemented genetic algorithm enables optimization considering various UAV operational modes, including loitering at different altitudes and cruise flight. Computational experiments demonstrate improved aerodynamic efficiency: performance increased by 4.6 % for the NACA family, 10.7 % for CST and 3.1 % for PARSEC. The optimized CST family profile showed the most significant improvement, providing an optimal ratio of lift to aerodynamic drag for the considered UAV flight modes.

Key words: unmanned aerial vehicles; aerodynamic profiling; computational modeling; genetic algorithms; viscous-inviscid interaction; multi-criteria optimization; parametric geometry of aerodynamic profiles.

FOR CITATION: L.Yu. Kataeva, R.M. Volnikov. UAV wing profile optimization based on viscous-inviscid interaction method and genetic algorithm. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 7-20.
DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_7 EDN: LAVLUJ

Введение

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) самолетного типа активно применяются для решения разнообразных задач благодаря высоким летным характеристикам, маневренности и энергоэффективности. Улучшение аэродинамического профиля крыла напрямую влияет на подъемную силу, снижение аэродинамического сопротивления и уменьшение потребляемой энергии, что расширяет область применения таких аппаратов – от аэрофотосъемки до спасательных операций и транспортировки грузов [1]. Традиционные методы расчета аэродинамических характеристик, основанные на уравнениях Навье-Стокса, обладают высокой вычислительной сложностью [2]. Ведется поиск более эффективных подходов, одним из которых является совмещенный вязко-невязкий метод. Он позволяет учитывать как вязкие, так и невязкие эффекты в потоке, что обеспечивает снижение времени расчетов без потери точности при оценке аэродинамических характеристик сложных конструкций крыла [3]. При этом градиентные методы, используемые для оптимизации профиля с помощью аналитического и численного вычисления производных, часто сходятся к локальным минимумам и требуют точного задания начального приближения [4].

В условиях сложных нелинейных зависимостей современные задачи оптимизации решаются методами популяционной оптимизации (генетические алгоритмы, методы роя частиц и дифференциальная эволюция), которые успешно осуществляют глобальный поиск по многомерному пространству параметров [5]. Генетические алгоритмы позволяют обходить локальные экстремумы и находить множество Парето-оптимальных решений, что критически важно при учете аэродинамических, конструктивных и эксплуатационных ограничений БПЛА. Дополнительное использование гибридных методов, объединяющих преимущества глобального поиска и высокой точности локальной оптимизации, способствуют повышению эффективности проектирования и сокращению временных затрат [6, 7]. Современные исследования [1, 8-13] демонстрируют, что интеграция численных методов с эволюционными алгоритмами является перспективной стратегией для оптимизации аэродинамического профиля крыла БПЛА. Такой подход позволяет не только улучшить базовые летные характеристики аппарата, но и обеспечить снижение шума, повышение устойчивости к внешним воздействиям

и экономию энергии. В ряде работ [14] описаны эффективные методики оценки аэродинамических характеристик, основанные на взаимодействии вязкого и невязкого течений, где невязкое течение анализируется с использованием конформного отображения, а вязкие эффекты определяются посредством решения интегральных уравнений пограничного слоя. Последовательное чередование решений для невязкого и вязкого течений позволяет добавлять толщину вытеснения к контуру аэродинамического профиля и разрабатывать методы изменения формы для его оптимизации. Оригинальный алгоритм для решения обратной задачи поиска угла атаки и скорости движения тела для таких режимов как барражирование, полет на крейсерской скорости и планирование предложен в работе [15].

Цель данного исследования – решение задачи многокритериальной оптимизации аэродинамических характеристик крыла БПЛА с минимальными затратами вычислительного времени. Для этого разработан интегрированный алгоритм, объединяющий возможности совмещенного вязко-невязкого метода и генетического алгоритма, что представляет значительный шаг вперед в области оптимизации профилей БПЛА самолетного типа и способствует расширению их практического применения.

Формулировка задачи оптимизации крылового профиля и методика ее решения

Целевой задачей является получение оптимального сочетания геометрических параметров, позволяющего минимизировать аэродинамическое сопротивление при одновременном обеспечении необходимого уровня подъемной силы, что достигается посредством интеграции метода вязко-невязкого взаимодействия с генетическим алгоритмом. Пусть вектор проектных переменных имеет вид $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, здесь параметры x_i – описывают координаты ключевых точек профиля, задаваемых с помощью различных семейств параметрических моделей, таких как NACA4, CST и PARSEC, открывая возможность задания исходной геометрии крыла с учетом специфических особенностей каждого семейства.

Рассмотрим невязкую часть потока, описываемую уравнением Лапласа:

$$\nabla^2 \varphi(r) = 0, r \in \Omega, \varphi(r) = \varphi_\infty(r) + \sum_{j=1}^N \mu_j G(r, r_j),$$

где $\varphi(r)$ – потенциал течения, представленный как сумма внешнего равномерного потока $\varphi_\infty(r)$ и вклада распределенных двойников. Выражение, где $G(r, r_j)$ представляет собой фундаментальное решение уравнения Лапласа, т.е. функцию Грина, которая описывает потенциал, создаваемый точечным источником, расположенным в точке r_j . В двумерном случае эта функция имеет вид $G(r, r_j) = \frac{1}{2\pi} \ln|r - r_j|$, а для трехмерного случая $G(r, r_j) = \frac{1}{4\pi} \ln|r - r_j|$. Она позволяет учесть вклад элементарного источника или двойника в распределение потенциала по пространству, что является базой для расчета невязких аэродинамических характеристик в панельном методе [16]. На поверхности профиля S налагается граничное условие отсутствия нормального притока, гарантирующее, что скорость потока, нормальная к поверхности крыла, равна нулю, т.е. поток не проникает в твердую поверхность (условие непроницаемой границы крылового профиля), для более точного определения распределения давления по поверхности крыла:

$$\frac{\partial \varphi(r)}{\partial n} = \frac{\partial \varphi_\infty(r)}{\partial n} + \sum_{j=1}^N \mu_j \frac{\partial G(r, r_j)}{\partial n} = 0.$$

При дискретизации поверхности S на множество контрольных точек в каждой из них формируется уравнение, в котором вклад каждого источника (двойника) выражается через умножение на соответствующий неизвестный коэффициент μ_j , определяющий вклад каждого отдельного источника (или двойника) в модель распределенного потенциала. Значения μ_j подбираются так, чтобы обеспечить выполнение граничного условия отсутствия нормального

притока на поверхности профиля, т.е. чтобы суммарное воздействие всех двойников компенсировало нормальную составляющую внешнего потока. На каждой контрольной точке возникает линейное соотношение, где известная величина представлена нормальной производной внешнего потенциала, а суммарный эффект источников определяется как линейная комбинация μ_j , умноженная на найденные значения нормальных производных функции Грина. Это приводит к формированию системы линейных уравнений, решение которой позволяет определить коэффициенты μ_j , удовлетворяющие граничному условию отсутствия нормального притока по всей поверхности профиля. После решения системы определяются распределение скорости и коэффициент давления:

$$V(r) = \nabla \varphi(r) = \nabla \varphi_\infty(r) + \sum_{j=1}^N \mu_j \nabla G(r, r_j), G_p(r) = 1 - \left(\frac{|V(r)|}{V_\infty} \right)^2.$$

Для учета вязких эффектов применяется расчет пограничного слоя, позволяющий скорректировать распределение давления и на этой основе вычислить окончательные значения коэффициентов подъемной силы $C_L(x)$ и аэродинамического сопротивления $C_D(x)$.

Задача решается при $x i_{i,\max} i_{i,\min}$, $i = \overline{1, n}$, а целевая функция оптимизации с ограничением подъемной силы и гладкости профиля (непрерывность по первой и второй производным) представляется в виде:

$$\min_x J(x) = \omega_1 C_D(x) - \omega_2 C_L(x), C_L(x) \geq C_{L0}, \left| \frac{d^2 \varphi(r)}{dx^2} \right| \leq \delta, x \in [a, b],$$

где ω_1, ω_2 – положительные значения, являющиеся весовыми коэффициентами, определяющие относительную важность каждого из критериев, C_{L0} – значение минимальной подъемной силы, δ – предельное значение кривизны.

Учет различных семейств параметрических профилей осуществляется посредством интеграции их характерных параметров в единый вектор переменных. Эти параметры комбинируются для генерации начальных вариантов профиля, что позволяет генетическому алгоритму проводить эволюционный поиск по расширенному пространству решений. Генетический алгоритм реализует глобальный поиск по многомерному пространству проектных параметров, имитируя эволюционные процессы (отбор, кроссовер, мутация) для формирования популяций кандидатов решения, каждому из которых с помощью описанной аэродинамической модели вычисляются целевые функции. Таким образом, интеграция точного количественного моделирования методом вязко-невязкого взаимодействия и эффективного стратегического поиска генетическим алгоритмом позволяет выявить оптимальные профили, которые удовлетворяют заданным аэродинамическим, конструктивным и эксплуатационным требованиям.

Схема интегрированного метода анализа и оценки крылового профиля с использованием метода вязко-невязкого взаимодействия и генетического алгоритма для поиска оптимального результата представлена на рис. 1.

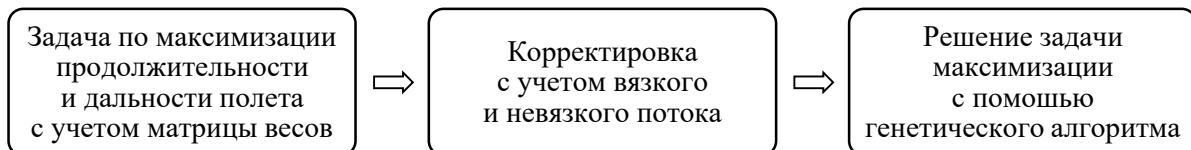


Рис. 1. Укрупненная схема предлагаемого решения

Fig. 1. A scheme of the proposed solution

Интегрированный метод в исследовании оптимизации аэродинамического профиля крыла представляет собой синтез двух мощных подходов, позволяющих добиться более точных и эффективных результатов. С одной стороны, метод вязко-невязкого взаимодействия обеспечивает детальный анализ аэродинамики крыла путем расчета потенциального поля с

использованием панельного метода, что позволяет определить распределение давления по поверхности профиля; дополнительно учитываются вязкие эффекты, такие как расчет пограничного слоя, что в итоге дает реалистичную оценку коэффициентов подъемной силы и сопротивления. С другой стороны, генетический алгоритм применяется для глобального поиска оптимального решения в многомерном пространстве параметров, имитируя эволюционные процессы, включая отбор, скрещивание и мутацию, с целью обнаружения множества Парето-оптимальных вариантов, способных обходить локальные минимумы. Интеграция этих методов позволяет на основе точной аэродинамической модели, полученной посредством метода вязко-невязкого взаимодействия, вычислять значения целевых функций, что затем используется генетическим алгоритмом для оценки пригодности каждого решения и направленного поиска оптимального профиля, отвечающего множеству заданных ограничений и критериев качества. Такой комплексный подход объединяет количественную точность моделирования и эффективный стратегический поиск в параметрическом пространстве, тем самым значительно улучшая качество проектирования крыла БПЛА и сокращая время нахождения оптимального варианта конструкции.

Каждое из семейств профилей, таких как NACA4, CST и PARSEC, обладает своими специфическими особенностями, параметрами и диапазоном возможных форм. Поэтому их одновременное использование при поиске оптимального профиля значительно увеличивает диапазон изменения геометрии крыла, позволяет комбинировать преимущества каждого семейства профилей и расширять пространство поиска оптимальных решений. При этом ограничения, характерные для отдельно взятого семейства (малое разнообразие форм или жесткая зависимость от отдельных параметров), нивелируются за счет наличия альтернативных представлений. Появляется возможность найти варианты профилей, которые недоступны в рамках одного семейства и единственного типа параметризации. Основное преимущество метода, положенного в основу программы XFOIL, состоит в том, что характер течения около профиля не постулируется, а вычисляется. Преимущества предлагаемого алгоритма, учитывающего отказ от постулирования характера течения возле профиля, показаны в табл. 1.

Таблица 1.
Новизна предлагаемого метода

Table 1.
The novelty of the proposed method

Существующие решения	Предлагаемое решение
Оценка аэродинамических характеристик с использованием уравнения Навье-Стокса	Оценка аэродинамических характеристик с использованием совмещенного вязко-невязкого метода
Ограничение числа возможных конфигураций	Поиск оптимального профиля сразу в трех типовых семействах параметрических аэродинамических профилей
Однокритериальные задачи	Соответствие сразу нескольким критериям в рамках одного условия и одного параметра оптимизации

В результате подобная стратегия генерирует широкий спектр вариантов профилей, что способствует более точной настройке и улучшению летных характеристик аппарата в процессе оптимизации. Методика расчета профиля с учетом пограничного слоя может рассматриваться в качестве эталонной при тестировании современных CFD-методов и моделей турбулентности.

Результаты исследования и их обсуждение

Для оценки профиля крыла была создана таблица режимов полета. Каждый режим оценивался по его относительной важности. Любой параметр характеристик профиля затем определяется как средневзвешенное значение этого параметра с учетом весов в табл. 2 и 3.

Таблица 2.
Веса при режиме полета в стационарном состоянии для удержания точки
Table 2.
Weights in the flight mode in a stationary state to hold the point

№	Полетный режим	Высота	Скорость	Число Маха	Число Рейнольдса (106)	Вес
1	Low Alt. Loiter	5	35	0.109	1.93	0.20
2	Medium Alt. Loiter	10	40	0.134	1.38	0.50
3	High Alt. Loiter	15	45	0.153	0.75	0.30

Таблица 3.
Веса при полете с постоянной скоростью
Table 3.
Weights during flight at constant speed

№	Полетный режим	Высота	Скорость	Число Маха	Число Рейнольдса (106)	Вес
1	Medium Alt. Cruise	10	110	0.367	3.81	0.60
2	High Alt. Cruise	15	110	0.373	1.84	0.40

Двумя наиболее важными параметрами являются коэффициенты подъемной силы и сопротивления. Согласно теории тонкого крыла, коэффициенты подъемной силы c_l и сопротивления c_d являются функцией угла атаки α крыла относительно набегающего потока. Необходимо отметить, что эти два параметра не отражают всей картины. На практике имеют место индуктивное сопротивление, а также уменьшение подъемной силы из-за завихрений на концах крыла. Учитывая эллиптическое распределение подъемной силы, можно скорректировать коэффициенты подъемной силы и сопротивления:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho S V^2} = \frac{c_l}{1 + \frac{c_l}{1 + \pi e AR}}, \quad C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho S V^2} = c_d + \frac{c_l^2}{\pi e AR},$$

где L – подъемная сила, ρ – плотность набегающего потока, V – скорость набегающего потока, S – площадь крыла, e – число эффективности Освальда (обычно 0,80-0,95), AR – удлинение крыла или соотношение сторон крыла, определяемое как отношение квадрата размаха крыла к площади формы в плане, D – аэродинамическое сопротивление. Для прямоугольного крыла соотношение сторон представляет собой просто размах крыла, разделенный на длину хорды.

Для оценки продолжительности (E) и дальность полета (R) БПЛА самолетного типа можно на основе формулы Бреге:

$$E = \frac{\eta_p}{c_p} \frac{C_L^{\frac{3}{2}}}{C_D} \sqrt{2 \rho S} \left(\frac{1}{\sqrt{W_f}} - \frac{1}{\sqrt{W_i}} \right), \quad R = \frac{\eta_p}{c_p} \frac{C_L}{C_D} \ln \left(\frac{W_i}{W_f} \right),$$

где c_p – удельный расход топлива, η_p – КПД винта, W_i – начальный вес самолета, W_f – конечный вес самолета, C_L и C_D – коэффициенты подъемной силы и сопротивления соответственно.

От профиля крыла зависят C_L и C_D , поэтому необходимо обратить внимание на $\frac{C_L}{C_D}$ и $\frac{C_L^{\frac{3}{2}}}{C_D}$. При реализации предполагалось, что 80 % времени полета БПЛА будет в режиме удержания, а 20 % времени полета – в крейсерском режиме. Тогда целевая функция принимает вид:

$$\min_x J(x) = \frac{4}{5} \left(\sum_{i=1}^{N_E} \omega_{E,i} \frac{C_L^{\frac{3}{2}}}{C_D} \right)^{-1} + \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^{N_R} \omega_{R,i} \frac{C_L^{\frac{3}{2}}}{C_D} \right)^{-1},$$

где N_E и N_R – количество режимов полета для продолжительности и дальности полета, подлежащих оценке, $\omega_{E,i}$ и $\omega_{R,i}$ – соответствующие веса из табл. 1 и 2, x – вектор параметров, который используется для определения данного параметрического семейства профилей, их толщины для профиля серии NACA4 с учетом валидных границ этого набора параметров.

Для внешних потоков с достаточно большим числом Рейнольдса ($Re > 100,000$) допускается, что поток за пределами небольшой области вблизи поверхности стенки является невязким. Затем определяется потенциальная функция $\varphi(x; y; z)$, которая удовлетворяет требованиям сохранения массы и импульса. Предполагается также, что поток стационарный, невязкий, безвихревой и несжимаемый. Компоненты скорости \vec{V} определяются по формуле:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, w = \frac{\partial \varphi}{\partial z}$$

С учетом предположения о несжимаемости потока, уравнение неразрывности имеет вид $V(r) = \nabla \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$, а с учетом компонентов скорости получаем уравнение Лапласа: $\nabla^2 \varphi(r) = 0$.

Панельный метод

Теория тонкого профиля не работает для толстых, сильно изогнутых, состоящих из нескольких частей или произвольных секций профиля. Чтобы нивелировать эту проблему, используется панельный метод [17], где контур крылового профиля разбивается на отдельные панели (рис. 2).

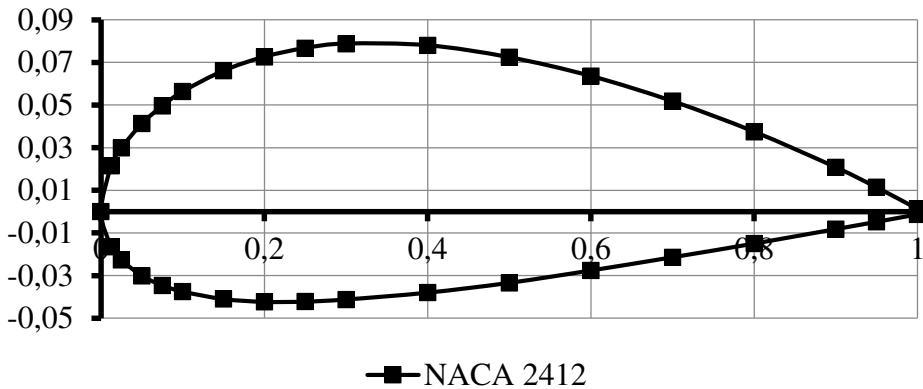


Рис. 2. Разделение профиля крыла на панели

Fig. 2. Division of the wing profile into panels

Геометрия профиля аппроксимируется N отрезками линий, называемыми панелями. Каждой из них присвоены источник (q) и вихрь (γ). Потенциальная функция скорости выражается путем наложения набегающего потока, распределения источников и распределения вихрей:

$$\varphi = V_\infty(x \cos(\alpha) + y \sin(\alpha)) + \sum_{j=1}^N \int_j^N \left(\frac{q_j}{2\pi} \ln(r) - \frac{\gamma}{2\pi} \theta \right) ds.$$

Потенциал скорости, обусловленный источником и вихревым распределением, интегрируется по j -му элементу панели длиной ds , где r – расстояние между элементом и наблюдателем, а θ – угол, образуемый r с осью x . Затем это значение суммируется по всем N элементам панели. О распределении вихрей и источников сделаны следующие предположения.

1. Мощность источника постоянна на каждой панели, каждая панель имеет разную мощность источника, сила вихря постоянна и одинакова на всех панелях.
2. Панель j имеет начальную точку (x_i, y_i) и конечную точку (x_{i+1}, y_{i+1}) .

3. Каждая панель имеет несколько важных параметров, используемых при расчете силы источников и вихря. Этими параметрами являются расположение средней точки панели или контрольный узел $(\bar{x}_j, \bar{y}_j) = \left(\frac{x_i+x_{i+1}}{2}, \frac{y_i+y_{i+1}}{2}\right)$ и предполагается, что именно здесь действуют все источники и вихри. Длина панели $l_j = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$ и угол ее ориентации $\sin(\theta_j) = \frac{y_{i+1} - y_i}{l_j}$ и $\cos(\theta_j) = \frac{x_{i+1} - x_i}{l_j}$.

На следующем этапе определяется сила распределенных источников и вихрей, и на их основе находится значение тангенциальных скоростей в каждой контрольной точке. Исходя из этого, используется уравнение Бернулли для определения распределения давления.

$$p_\infty + \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 = p_i + \frac{1}{2} 2 \rho V_{t,i}^2, C_{p,i} = 1 - \left(\frac{V_{t,i}}{V_\infty} \right)^2.$$

Для областей вблизи поверхности стенки предположение о безвихревом и невязком течении уже не выполняется. Поэтому необходимо решать уравнения вязкого пограничного слоя. Классическая форма уравнения пограничного слоя Прандтля и сокращенная форма уравнения неразрывности для несжимаемого пограничного слоя:

$$u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial u_1}{\partial x_2} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \nu \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2}, \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} = 0,$$

где индексы 1 и 2 обозначают координату, параллельную и нормальную к поверхности стены соответственно, а градиент давления может быть найден из уравнения Бернулли $\frac{\partial p}{\partial x_1} = -p U_\infty \frac{\partial U_\infty}{\partial x_1}$ получаем $\frac{d\theta}{dx_1} + (H + 2) \frac{\theta}{U_\infty} \frac{dU_\infty}{dx_1} = \frac{C_f}{2}$.

Для сжимаемого пограничного слоя имеем уравнения в виде:

$$\frac{d\theta}{dx_1} + (2 + H + M_e^2) \frac{\theta}{U_\infty} \frac{dU_\infty}{dx_1} = \frac{C_f}{2}, \theta \frac{dH^*}{dx_1} + (2H^{**} + H^*(1 - H)), \frac{\theta}{U_\infty} \frac{dU_\infty}{dx_1} = 2C_{D,i} - H^* \frac{C_f}{2},$$

где M_e^2 – число Маха на границе пограничного слоя, $C_{D,i}$ – коэффициент диссипации, θ – угол, образуемый г с осью x, H – отношение толщины вытеснения к импульсной толщине, H^* – отношение энергетической толщины к импульсной толщине пограничного слоя. Коэффициент диссипации, кинетическая энергия и плотность для сжимаемого потока определяются аналогично их несжимаемым аналогам.

Для однопараметрических профилей Фолкнера-Скан и ламинарного закрытия известны эмпирические корреляционные зависимости для расчета параметров пограничного слоя или фрикционных характеристик обтекания:

$$Re_\theta \frac{C_f}{2} = \begin{cases} -0,067 + 0,01977 \frac{(7,4 - H_k)^2}{H_k - 1}, & H_k \leq 7,4 \\ -0,067 + 0,022 \left(1 - \frac{1,4}{H_k - 6}\right)^2, & H_k \geq 7,4 \end{cases}$$

$$Re_\theta \frac{2C_{D,i}}{H^*} = \begin{cases} 0,207 + 0,00205(4 - H_k)^{5,5}, & H_k \leq 4 \\ 0,207 - 0,003 \frac{(H_k - 4)^2}{(1 + 0,02(H_k - 4)^2)}, & H_k \geq 4 \end{cases}$$

$$H^{**} = \left(\frac{0,064}{H_k - 0,8} + 0,251 \right) M_e^2,$$

где H^{**} – диссипативный формпараметр, H_k – кинематический параметр, M_e^2 – число Маха на границе пограничного слоя, r – расстояние между элементом панели и наблюдателем.

Применение генетического алгоритма к решению поставленной задачи

Для решения несложных задач оптимизации профиля с использованием параболического уравнения можно найти корни производной функции. Для более сложных задач можно использовать поиск с помощью множителей Лагранжа. В рассматриваемой задаче такие под-

ходы неприменимы, потому что уравнения, определяющие характеристики профиля в зависимости от геометрии профиля, совместно решить непросто. Поэтому был выбран метод оптимизации на основе генетического алгоритма (ГА). Применительно к задаче оптимизации профиля крыла БПЛА самолетного типа включает в себя следующие семь этапов (рис. 3).

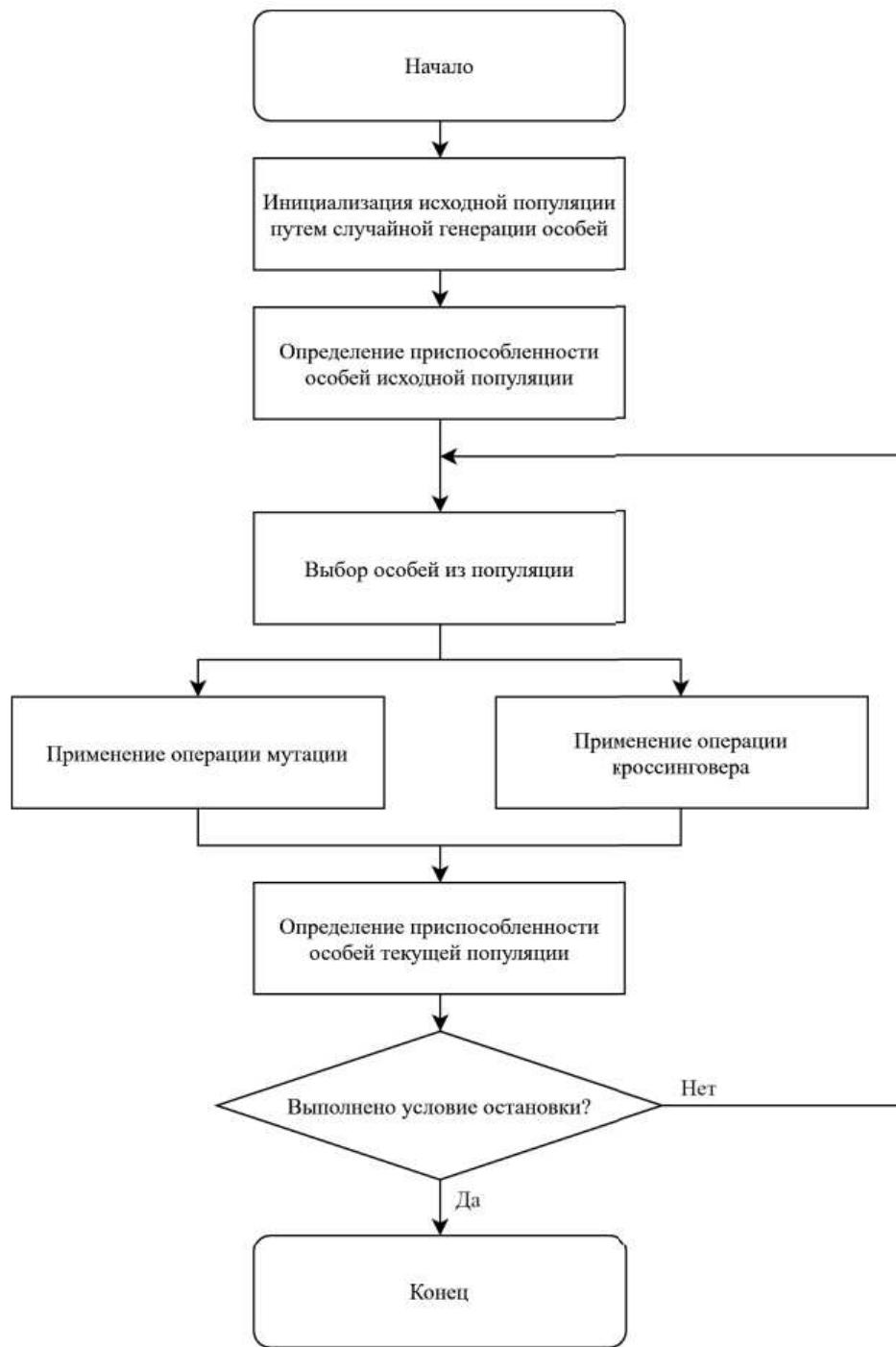


Рис. 3. Этапы работы генетического алгоритма

Fig. 3. Genetic algorithm

1. **Инициализация популяции:** создается начальная популяция возможных решений (воздушных профилей), которые могут быть представлены в виде хромосом (например, набор параметров, определяющих форму крыла).

2. *Оценка приспособленности*: каждое решение оценивается по функции приспособленности, которая может учитывать такие параметры, как подъемная сила, сопротивление, стабильность и другие аэродинамические характеристики.
3. *Селекция*: на основе значений функции приспособленности выбираются лучшие решения для дальнейшего размножения. Это может быть реализовано с помощью различных методов, таких как турнирный отбор или отбор по рулетке.
4. *Скрещивание (кроссовер)*: избранные решения комбинируются для создания новых хромосом. Это может происходить путем обмена генами между родительскими хромосомами, что позволяет создавать новые варианты профилей.
5. *Мутация*: в новых хромосомах могут случайным образом изменяться некоторые параметры, что способствует разнообразию популяции и предотвращает преждевременное сходимость к локальным минимумам.
6. *Замена*: новые хромосомы заменяют часть старой популяции, и процесс повторяется с шагов 2-5, пока не будет достигнуто заданное условие остановки (например, максимальное количество поколений или достижение определенного уровня приспособленности).
7. *Выбор лучшего решения*: после завершения итераций выбирается наилучший воздушный профиль, который соответствует заданным критериям оптимизации.

Подбор входных параметров для генетического алгоритма (ГА) является важным этапом, который может существенно повлиять на эффективность и качество решения. Параметры оптимизации, задаваемые как функции от n количества параметров для данного семейства профилей, были выбраны на основе эмпирических оценок из литературы и представлены в табл. 4. Алгоритм завершает работу, когда создано максимальное количество поколений или достигнут удовлетворительный уровень приспособленности популяции, и он позволяет эффективно исследовать все пространство возможных решений и находить профили, оптимальные или близкие к оптимальным.

Таблица 4.
Входные параметры для генетического алгоритма

Table 4.
Input parameters for the genetic algorithm

Параметр	Значение
Численность популяции	$10n$
Эталонная численность	$0,05n$
Скорость мутации	0,03
Скорость скрещивания	0,75

Подбор числа эталонной численности (размера популяции) для генетического алгоритма (ГА) является важным аспектом, который может существенно повлиять на эффективность алгоритма и качество получаемых решений. Далее изложены семь рекомендаций и подходов для выбора этого параметра.

1. *Опыт и эмпирические данные*: часто размер популяции подбирается на основе предыдущего опыта и эмпирических данных для аналогичных задач. В литературе по ГА можно найти рекомендации по размеру популяции для различных типов задач.
2. *Сложность задачи*: для более сложных задач, где пространство решений велико и разнообразно, может потребоваться большая популяция для обеспечения достаточного разнообразия. В то же время для простых задач может быть достаточно меньшего размера популяции.
3. *Баланс между качеством и вычислительными затратами*: большая популяция может привести к более качественным решениям, но также увеличивает вычислительные затраты и время выполнения. Необходимо найти компромисс между качеством решения и временем, которое вы готовы потратить на вычисления.

4. *Пробные запуски*: рекомендуется проводить несколько пробных запусков с различными размерами популяции, чтобы оценить, как это влияет на результаты. Можно использовать метод проб и ошибок для нахождения оптимального размера.
5. *Адаптивные методы*: некоторые алгоритмы используют адаптивные подходы, где размер популяции меняется в процессе работы алгоритма в зависимости от текущего состояния популяции и качества решений.
6. *Статистические методы*: можно использовать статистические методы для анализа влияния размера популяции на результаты. Например, можно провести серию экспериментов с различными размерами популяции и проанализировать, как это влияет на среднюю приспособленность и разнообразие решений.
7. *Рекомендации по диапазону*: обычно размер популяции выбирается в диапазоне от $0,02n$ до $0,2n$ особей.

Для внешних потоков с достаточно большим числом Рейнольдса допускается, что поток за пределами небольшой области вблизи поверхности стенки является невязким. Оптимизация методом генетического алгоритма оценила тысячи различных возможных параметрических конфигураций профиля для трех основных семейств профилей с целью минимизации целевой функции так, чтобы летно-технические характеристики были максимальными в соответствии с их взвешенной важностью.

В описываемом подходе, в отличие от традиционного, при поиске оптимального решения оценивается каждый профиль-кандидат по ряду взвешенных условий по их важности, и затем осуществляется поиск лучшего кандидата, который соответствует максимальным дальности и выносливости. Для сравнения была посчитана целевая функция для исходных профилей (табл. 5). Все три финальных профиля имеют относительно схожие показатели производительности (табл. 6), несмотря на различия в их геометрии. Из рис. 4 видно, что все три профиля имеют асимметричную конструкцию с сильным изгибом.

Таблица 5.
Показатели производительности исходных профилей

Table 5.
Performance metrics of the original profiles

Профиль	Оценка
NACA	0.034742
CST	0.036004
PARSEC	0.035872

Таблица 6.
Показатели производительности оптимизированных профилей

Table 5.
Performance metrics for optimized profiles

Профиль	Оценка
NACA	0.033193
CST	0.032511
PARSEC	0.034791

Изначально исходный профиль CST (рис. 4) получил наименьшую объективную оценку и не удовлетворил заданным критериям (целевой функции) на основе матрицы весов для каждого режима полета. Однако его полученная на основе предлагаемого алгоритма оптимизированная форма стала лучшей (рис. 5), а оптимизация остальных профилей привела к профилям, имеющим большую подъемную силу. Поэтому индуцированное сопротивление было увеличено, что впоследствии снизило общие характеристики. Таким образом, профиль

геометрии CST имел более низкий коэффициент сопротивления сечения при всех рассматриваемых условиях, что привело к лучшему набору оценок. Это делает профиль CST наиболее оптимальным выбором для проектирования БПЛА типа HALE («Атмосферный спутник»).

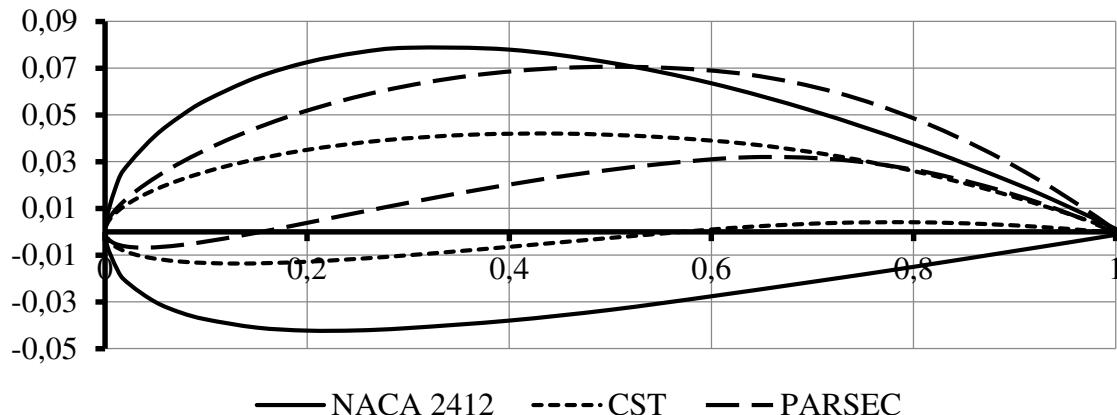


Рис. 4. Рассматриваемые профили

Fig. 4. Considered Profiles

Дальность и продолжительность полета напрямую зависят от коэффициентов подъемной силы и сопротивления. Данные параметры стали ключевыми. Главная идея заключалась в увеличении подъемной силы и снижении сопротивления. Также была введена условная матрица весов для каждого режима полета. Приведенный подход не требует детальной проработки со стороны технической части. Это позволяет быстро и эффективно найти профиль крыла хотя бы на этапе грубой оптимизации.

Полученные в ходе оптимизации образцы профилей крыла обладают лучшими показателями по сравнению с классическими. Для семейства NACA производительность повысилась на 4,6 %, для CST – на 10,7 %, а для PARSEC – на 3,1 %. Это подтверждает эффективность предложенного подхода, а также перспективу дальнейшего совершенствования БПЛА. Предложенный алгоритм упрощает процесс оптимизации и применим для учета более широкого диапазона параметров.

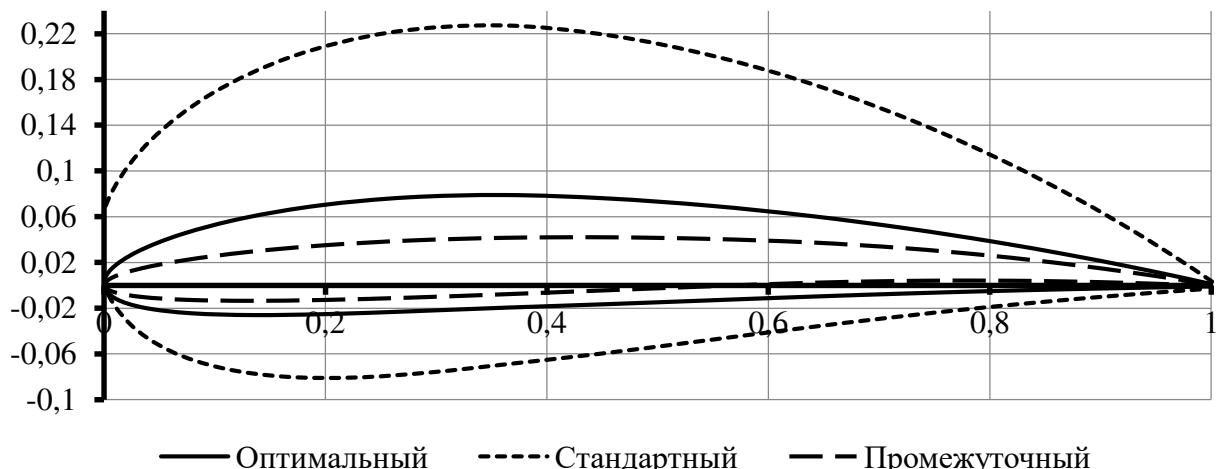


Рис. 5. Оптимизированный профиль семейства CST

Fig. 5. Optimized CST family profile

Библиографический список

1. **Lashari, H.N.** Applications of unmanned aerial vehicles: a review / H.N. Lashari, H.M. Ali, S.-U.-R. Massan // 3C Tecnología – Glosas de innovación aplicadas a la pyme. – 2019. – DOI: 10.17993/3ctecno.2019.specialissue3.85-105
2. **Anderson, J.D.** Fundamentals of Aerodynamics / John D. Anderson, Jr. – 7th ed. – NY.: McGraw-Hill, 2010. – 1131 p.
3. **Hess, D.L.** Comparison of Several Computational Methods for the Determination of Airfoil Characteristics / D.L. Hess, M.A. Smith – NASA Report, 1967. [Электронный ресурс] URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19680016443/downloads/19680016443.pdf> (дата обращения 11.04.2025).
4. **Goldberg, D.E.** Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. – Boston: Addison-Wesley, 1989. – 413 p.
5. **Deb, K.** Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms / K. Deb. – NY.: Wiley, 2001. – [Электронный ресурс] URL: <http://www.iitk.ac.in/kangal/deb.htm> (дата обращения 11.04.2025).
6. **Hoeijmakers H.W.M.** Panel Methods in Aerodynamics; Some Highlights // Ballmann J., Eppler R., Hackbusch W. (eds) Panel Methods in Fluid Mechanics with Emphasis on Aerodynamics. Notes on Numerical Fluid Mechanics. Vol. 21. – Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1988. – DOI: 10.1007/978-3-663-13997-3_1
7. **Ogedengbe, I.I.** Multi-objective Optimization of Subsonic Glider Wing Using Genetic Algorithm / I.I. Ogedengbe, M.A. Akintunde, O.A. Dahunsi et al // Int. J. Intelligent Systems and Applications (IJISA). – 2022. – Vol. 14, No. 2. – C. 14-25. – DOI: 10.5815/ijisa.2022.02.02
8. **Bliamis, C.** Aerodynamic and stability analysis of a VTOL flying wing UAV / C. Bliamis, I. Zacharakis, P. Kaparos, K. Yakinthos // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2021. – Vol. 1024, 012039. – DOI: 10.1088/1757-899X/1024/1/
9. **Amoinalis, E.** Energy Efficiency Optimization in UAVs: A Review / E. Amoinalis, M. Tsili, V. Spathopoulos, A. Hatziefremidis // Mater. Sci. Forum. – 2014. – Vol. 792, Pp. 281–286. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.792.281
10. **Lee, D.** Comparison of Numerical Methods Evaluating Airfoil Aerodynamic Characteristics at Low Reynolds Number / D. Lee, T. Nonomura, A. Oyama, K. Fujii // Journal of Aircraft. – 2015. – Vol. 52, Pp. 296-306. – DOI: 10.2514/1.C032721
11. **Lee, J.** Experimental Investigation of Noise Reduction in UAV Airfoils by Passive Trailing-Edge Modification / J. Lee, H. Kim // Appl. Acoustics. – 2021. – Vol. 175. Article 107482. – DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.107482
12. **Maumer, M.D.** A comparison of theoretical methods for predicting airfoil aerodynamic performance / M.D. Maumer, J.G. Coder // J. Aviation. – 2014. – Vol. 51. – Pp. 183-191.
13. **Maumer, M.D.** Design and testing of a winglet airfoil for low-speed aircraft / M.D. Maumer, T.S. Swan, S.M. Willits // J. Aviation. – 2001. – Vol. 39. – Pp. 654-661.
14. **Катаева, Л.Ю.** Поиск оптимальных режимов полета тела на основе аппроксимации результатов CFD-моделирования / Л.Ю. Катаева, Д.А. Масленников, С.В. Михалев, Н.Н. Киселева // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. – № 4 (127). – С. 27-35. – DOI 10.46960/1816-210X_2019_4_27.
15. **Никифоров, В.М.** Метод расчета отрывного обтекания крылового профиля с механизацией при малых скоростях // Ученые записки ЦАГИ. – 1993. – Т. 24. № 1. – С. 157-162.
16. **Марданов, Р.Ф.** Об одном подходе к проектированию многоэлементного крылового профиля // Аэромеханика и газовая динамика. – 2003. – № 2. – С. 31-36.

References

1. Lashari H.N., Ali, H. M. and Massan S.-U.-R. 2019. “Applications of Unmanned Aerial Vehicles: A Review”. *3C Tecnología – Glosas de innovación aplicadas a la pyme, Special Issue 3.* <https://doi.org/10.17993/3ctecno.2019.specialissue3.85-105>.
2. Anderson John D., Jr. 2010. *Fundamentals of Aerodynamics*. 7th ed. New York: McGraw-Hill.
3. Baker C.J., Smith A.R., Johnson B.N. and Williams D.K. 2015. “A Combined Viscous-Inviscid Method for the Analysis of Complex Aerodynamic Shapes”. *Journal of Aircraft* 52 (4): 1234-45.
4. Hess D.L. and M.A. Smith. 1967. *Comparison of Several Computational Methods for the Determination of Airfoil Characteristics*. NASA Report. Accessed April 11, 2025.

- <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19680016443/downloads/19680016443.pdf>.
5. Goldberg David E. 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Boston: Addison-Wesley.
 6. Deb K. 2001. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. New York: Wiley. Accessed April 11, 2025. <http://www.iitk.ac.in/kangal/deb.htm>.
 7. Hoeijmakers H.W.M. 1988. "Panel Methods in Aerodynamics; Some Highlights". In *Panel Methods in Fluid Mechanics with Emphasis on Aerodynamics*, edited by J. Ballmann, R. Eppler, and W. Hackbusch, 1-22. Notes on Numerical Fluid Mechanics, vol. 21. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-663-13997-3_1.
 8. Ogedengbe I.I., Akintunde M.A., Dahunsi O.A. [et al.]. 2022. "Multi-objective Optimization of Subsonic Glider Wing Using Genetic Algorithm". *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)* 14 (2): 14-25. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2022.02.02>.
 9. Bliamis C., Zacharakis I., Kaparos P. and Yakinthos K. 2021. "Aerodynamic and Stability Analysis of a VTOL Flying Wing UAV". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1024: 012039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1024/1/012039>.
 10. Amoiralis E., Tsili M., Spathopoulos V. and Hatziefremidis A. 2014. "Energy Efficiency Optimization in UAVs: A Review". *Materials Science Forum* 792: 281-86. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.792.281>.
 11. Lee D., Nonomura T., Oyama A. and Fujii K. 2015. "Comparison of Numerical Methods Evaluating Airfoil Aerodynamic Characteristics at Low Reynolds Number". *Journal of Aircraft*, 52: 296–306. <https://doi.org/10.2514/1.C032721>.
 12. Lee J. and Kim H. 2021. "Experimental Investigation of Noise Reduction in UAV Airfoils by Passive Trailing-Edge Modification". *Applied Acoustics*, 175: 107482. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.107482>.
 13. Maumer M.D. and Coder J.G. 2014. "A Comparison of Theoretical Methods for Predicting Airfoil Aerodynamic Performance". *Journal of Aviation* 51: 183-91.
 14. Maumer M.D., Swan T.S. and Willits S.M. 2001. "Design and Testing of a Winglet Airfoil for Low-Speed Aircraft". *Journal of Aviation* 39: 654-61.
 15. Kataeva L.Yu., Maslennikov D.A., Mikhalev S.V. and Kiseleva N.N. 2019. "Poisk optimal'nykh rezhimov poleta tela na osnove approksimatsii rezul'tatov CFD-modelirovaniia". [Searching for Optimal Body Flight Modes Based on Approximation of CFD Modeling Results]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University], no. 4 (127): 27-35. https://doi.org/10.46960/1816-210X_2019_4_27.
 16. Nikiforov V.M. 1993. "Metod rascheta otryvnogo obtekaniia krylovogo profilia s mekhanizatsiei pri malykh skorostiakh". [A Method for Calculating Separated Flow Around an Airfoil with High-Lift Devices at Low Speeds]. *Uchenye zapiski TsAGI* [TsAGI Science Journal] 24 (1): 157-62.
 17. Mardanov R.F. 2003. "Ob odnom podkhode k proektirovaniu mnogoelementnogo krylovogo profilia". [On One Approach to the Design of a Multi-Element Airfoil]. *Aeromekhanika i gazovaia dinamika* [Aeromechanics and Gas Dynamics], no. 2: 31-36.

Дата поступления
в редакцию: 23.06.2025

Дата принятия
к публикации: 30.10.2025

**ДВУМЕРНЫЙ СТОХАСТИЧЕСКИЙ И R/S-АНАЛИЗ
ТОПОЛОГИЙ ФРАКТАЛЬНЫХ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР.
ВЕРИФИКАЦИЯ ФРАКТАЛЬНОГО ПОДХОДА**

В.Б. Куликов

ORCID: 0000-0003-2825-7476 e-mail: vb.kulikov@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.Б. Куликов

ORCID: 0009-0008-4659-7793 e-mail: akulikov@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

В.П. Ханилов

ORCID: 0000-0003-1317-5320 e-mail: hranilov@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Методом фрактального и вероятностного анализа исследованы топологические характеристики образца стали 30ХГСА для обоснования и верификации предложенного фрактального понятия: двумерной фрактальной размерности Хаусдорфа-Безиковича с двумя «ортогональными» компонентами. Шероховатость образца стали, как и пористость ранее исследованных мембранных структур, исследуется на основе разработанного полимодального и двумерного R/S-анализа (обобщение метода Г.Е. Херста). Для малых выборок данных сканирующей туннельной микроскопии в методе линейной интерполяции выполнен корректный фрактальный анализ поверхности микроструктуры стали 30ХГСА. Предложенный подход оптимизирует и расширяет возможности обработки экспериментальных данных. Компоненты фрактальной размерности образца стали определяются усреднением вычисленного массива показателей Херста по каждому ортогональному направлению. Идентификация одномерных плотностей распределения значений шероховатости выявила их существенную полимодальность с числом значимых мод от одной до четырех.

Ключевые слова: фрактальный анализ; двумерная плотность распределения и двумерный R/S-анализ; сканирующая туннельная микроскопия; размерность Хаусдорфа-Безиковича; двумерная интерполяция стохастических данных.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Куликов, В.Б. Двумерный стохастический и R/S-анализ топологий фрактальных микро- и наноструктур. Верификация фрактального подхода / В.Б. Куликов, А.Б. Куликов, В.П. Ханилов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 21-30. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_21 EDN: EEILBV

**TWO-DIMENSIONAL STOCHASTIC AND R/S-ANALYSIS
OF FRACTAL MICRO- AND NANOSTRUCTURE TOPOLOGIES.
FRACTAL APPROACH VERIFICATION**

V.B. Kulikov

ORCID: 0000-0003-2825-7476 e-mail: vb.kulikov@yandex.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.B. Kulikov

ORCID: **0009-0008-4659-7793** e-mail: akulikov@nntu.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.P. Khranilov

ORCID: **0000-0003-1317-5320** e-mail: hranilov@nntu.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This article presents the results of a study of the topological characteristics (roughness) of a 30KhGSA (30CrMnSiA) steel sample using fractal and probabilistic analysis. These results are used to justify and verify the authors' proposed fractal concept – the two-dimensional Hausdorff-Besicovitch fractal dimension with two “orthogonal” components. The roughness of the steel sample, as well as the porosity of previously studied membrane structures, is studied on the basis of the developed polymodal and two-dimensional R/S analysis (generalization of the method of H. E. Hurst). A correct fractal analysis of the 30KhGSA steel surface microstructure was performed for small samples of scanning tunneling microscopy data in the linear interpolation method. The proposed approach optimizes and expands the possibilities of processing experimental data. The fractal dimension components of the steel sample are determined by averaging the calculated array of Hurst exponents for each orthogonal direction. Identification of univariate distribution densities of roughness values revealed their essential polymodality with the number of significant modes from one to four.

Key words: fractal analysis; two-dimensional distribution density and two-dimensional R/S analysis; scanning tunneling microscopy; Hausdorff-Besicovitch dimension; two-dimensional interpolation of stochastic data.

FOR CITATION: V.B. Kulikov, A.B. Kulikov, and V.P. Khranilov. Two-dimensional stochastic and R/S-analysis of fractal micro- and nanostructure topologies. Fractal approach verification. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 21-30. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_21 EDN: EEILBV

Введение

Настоящее исследование является продолжением и развитием современных методов фрактального анализа топологий нано- и микроструктур [1-4]. В публикациях [5, 6] «на основе методов двумерного стохастического и фрактального анализа впервые была выявлена фрактальная анизотропия топологических характеристик гибридных газоселективных мембран, что позволило ввести и обосновать математический формализм и представление о двумерной фрактальной размерности Хаусдорфа-Безиковича с двумя «ортогональными» компонентами $D_{x,y} = 3 \cdot M\{H_{x,y}\}$ ». Было показано, что статистический анализ профилей пористых структур и оценка фрактальных свойств зависят от направления сканирования атомно-силового микроскопа (ACM), т.е. имеет место анизотропия фактора самоподобия и плотностей распределения характеристик структуры.

В предлагаемой работе изучаются анизотропные свойства топологических характеристик (шероховатости) образца стали 30ХГСА для обоснования и верификации предложенного авторами нового фрактального понятия: двумерной фрактальной размерности Хаусдорфа-Безиковича, определяемой по двум ортогональным координатам и обобщающей классическое понятие фрактальной размерности Хаусдорфа-Безиковича для поверхностных топологий. Шероховатость образца стали, как и пористость мембранных структур, исследуется на основе разработанного двумерного R/S-анализа (обобщение классического метода Г.Е. Херста) и метода идентификации закона распределения значений неровностей поверхности, основанного на решении обратных задач математической физики (уравнения Фредгольма первого рода [7]). Для корректного применения метода Херста исследована правомерность кратной двумерной интерполяции данных атомно-силовой и сканирующей туннельной микроскопии измеряемых характеристик микроструктур.

Результаты настоящих исследований дополняют и обобщают теорию фрактальных структур и цифровые модели поверхностей материалов для важнейших направлений про-

мышленного применения в машиностроении, ракетно-космических технологиях, биомедицине. Например, при обосновании важности таких исследований в [8, с. 4] говорится: «Микроструктура поверхности является важной характеристикой, с которой связаны такие свойства, как микротвердость, износостойкость, усталостная прочность, коэффициент трения, тепло-силовые нагрузки, аэро- и газодинамические сопротивления и т.п. Решение задач газовой динамики в условиях отсутствия данных о реальной структуре поверхности, с которой взаимодействуют молекулы газа, затрудняет формулировку граничных условий для расчета переноса энергии и импульса при обтекании тел».

Двумерный вероятностный и R/S-анализ морфологических характеристик поверхности образца стали 30ХГСА

Перспективность методов фрактального анализа и моделирования шероховатых поверхностей для решения задач газодинамики, отработки фрагментов летательных аппаратов (ЛА), элементов теплозащиты подтверждается актуальной диссертационной работой [8]. Разработанные в ней методы фрактальной геометрии, учитывающие шероховатость на микро- и наноуровне, базируются на постулате фрактального подобия на всех масштабах: от начального минимального до некоторого максимального уровня. Данное исследование содержит актуальную информацию о морфологии поверхностей различных сплавов, легирующих нанопокрытий, микроструктур [9, 10].

На рис. 1 представлено трехмерное изображение данных сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) для стали 30ХГСА, полученное на базе нанотехнологического комплекса Умка-02-Е [8]. В этой работе для аналогичных образцов сплавов стали, титана, меди выполнена оценка величины фрактальной размерности в качестве главного информативного критерия при создании цифровых моделей микро- и наноструктур. В изучении теплообмена в высокоэнтальпийных неравновесных потоках фрактальная размерность количественно представляет геометрические характеристики шероховатости, измеренные методом СТМ-микроскопии.

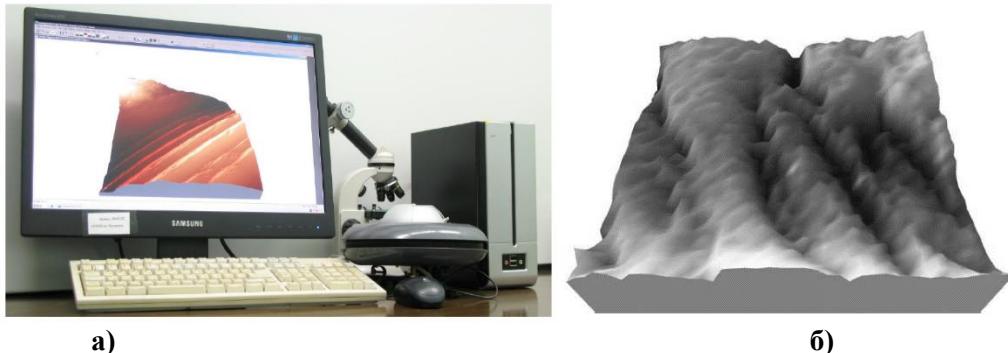


Рис. 1. Трехмерное изображение данных сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) для стали 30ХГСА:

а) нанотехнологический комплекс Умка-02-Е; б) 3D-модель поверхности образца стали 30ХГСА [8]

Fig. 1. Three-dimensional image of scanning tunneling microscopy (STM) data for 30KhGSA steel:
a) Umka-02-E nanotechnological complex; б) 3D model of 30KhGSA steel sample surface [8]

Практическая важность высокоточной идентификации фрактальной размерности в качестве информативной характеристики изрезанности и шероховатости микроструктуры, например, в аэrodинамике, определяется таким образом: «Задача построения геометрической модели микроповерхности имеет как теоретические, так и прикладные аспекты. Как известно, физические процессы, возникающие при взаимодействии атомов и молекул газа с поверхностью, весьма сложны. Поэтому требуется теоретически обоснованная трактовка результатов наземной экспериментальной отработки фрагментов летательных аппаратов. При-

кладное значение определяется необходимостью оптимизации средств диагностики потоков в высокотемпературных установках, в которых происходит имитация теплового нагружения, действующего на ЛА в процессе полета, а также технологических процессов создания теплоизоляционных материалов и покрытий изделий ракетно-космической техники (РКТ)» [8, с. 4-5].

Рассмотрим свойства топологических параметров стали 30ХГСА, исходя из введенного понятия двумерной фрактальной размерности Хаусдорфа-Безиковича $D_{x,y}$. Как и для мембранных структур [5], здесь применим авторский метод стохастического и фрактального анализа, обобщающий классическую фрактальную статистику. Для изучения вероятностных свойств поверхности такой структуры также используем систему одномерных плотностей распределения. Измеренные сканирующим туннельным микроскопом значения высотных отметок поверхности стали 30ХГСА размером $0,144 \times 0,144$ мкм [8] содержатся в текстовом файле с матрицей 40×40 узловых точек, что недостаточно для полноценного стохастического анализа. Разработанный для этих задач комплекс алгоритмов и программ позволяет корректно идентифицировать законы распределения случайных величин по выборкам малого объема (30-50 отсчетов), однако метод нормированного размаха Херста (*R/S*-анализ) требует, как минимум, на порядок больших значений случайной характеристики.

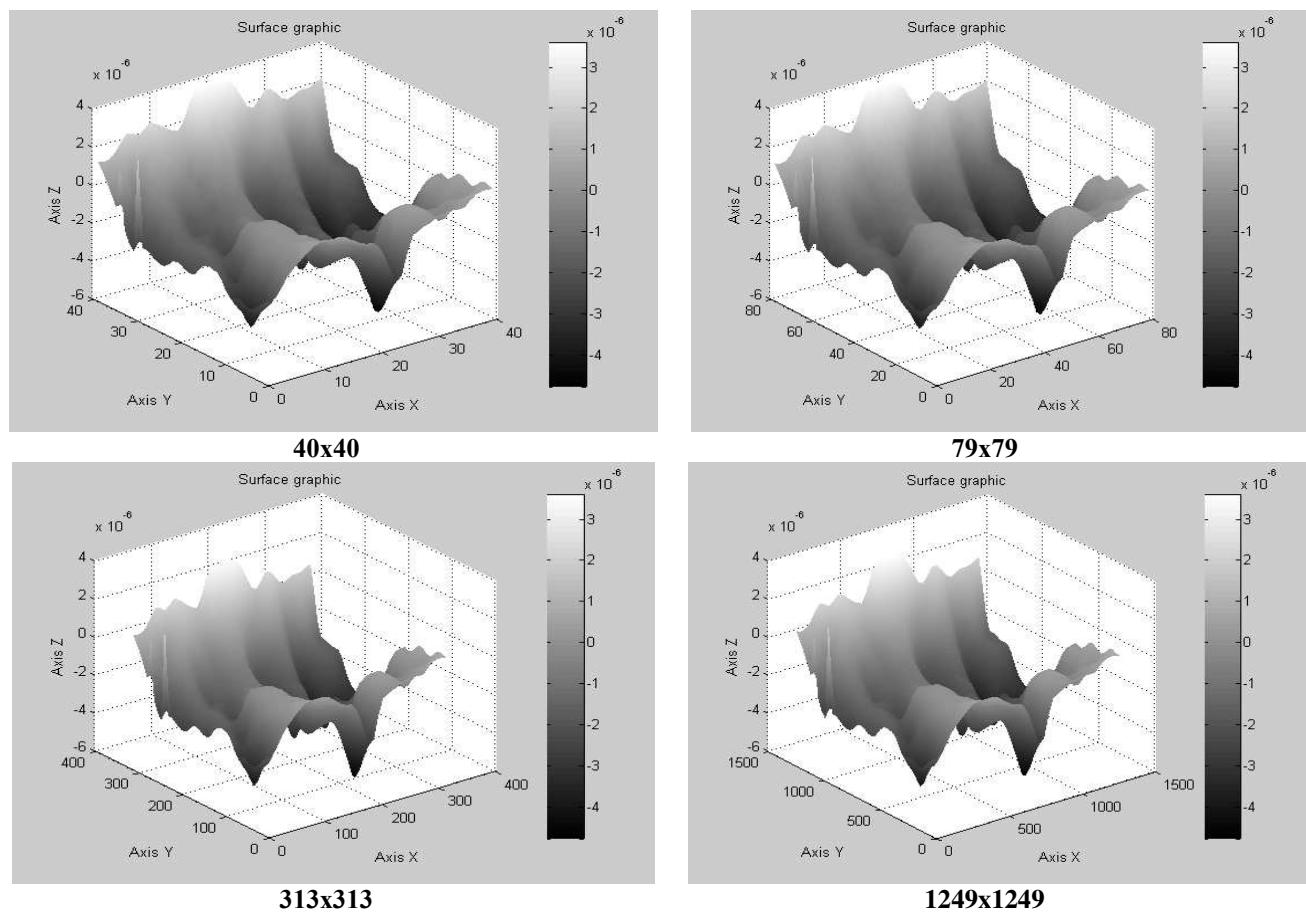


Рис. 2. Графика СТМ-данных (исходная поверхность и результат интерполяции) образца стали 30ХГСА

Fig. 2. Graphics of STM data (initial surface and interpolation result) of 30KhGSA steel sample

С целью получения расширенной выборки для верификации развивающегося подхода нами был применен метод двумерной интерполяции узловых значений (функция *interp2* пакета MATLAB) и последовательного увеличения размера матрицы данных [11]. При интерполяции последовательно контролировалось соответствие «расширенной» цифровой 3D-модели исходному изображению поверхности (рис. 2). Идентифицированные плотности распределения высотного профиля изображены на рис. 3.

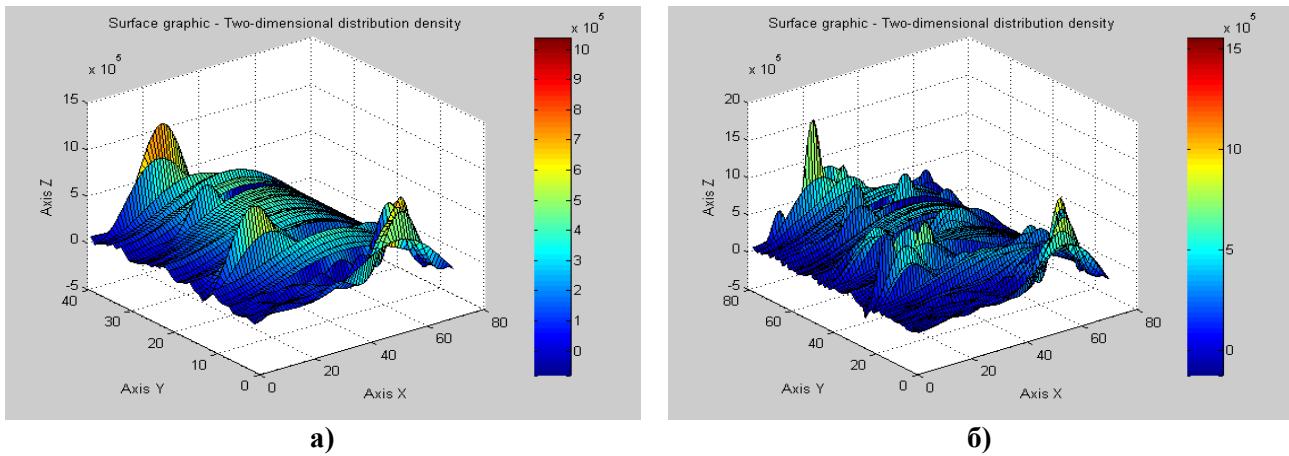


Рис. 3. Идентифицированные двумерные плотности распределения высотного профиля стали 30ХГСА:

a) для исходной матрицы данных; б) интерполяция в масштабе 79×79

Fig. 3. Identified two-dimensional distribution densities of the height profile of 30KhGSA steel:
a) for the original data matrix; б) interpolation at 79×79 scale

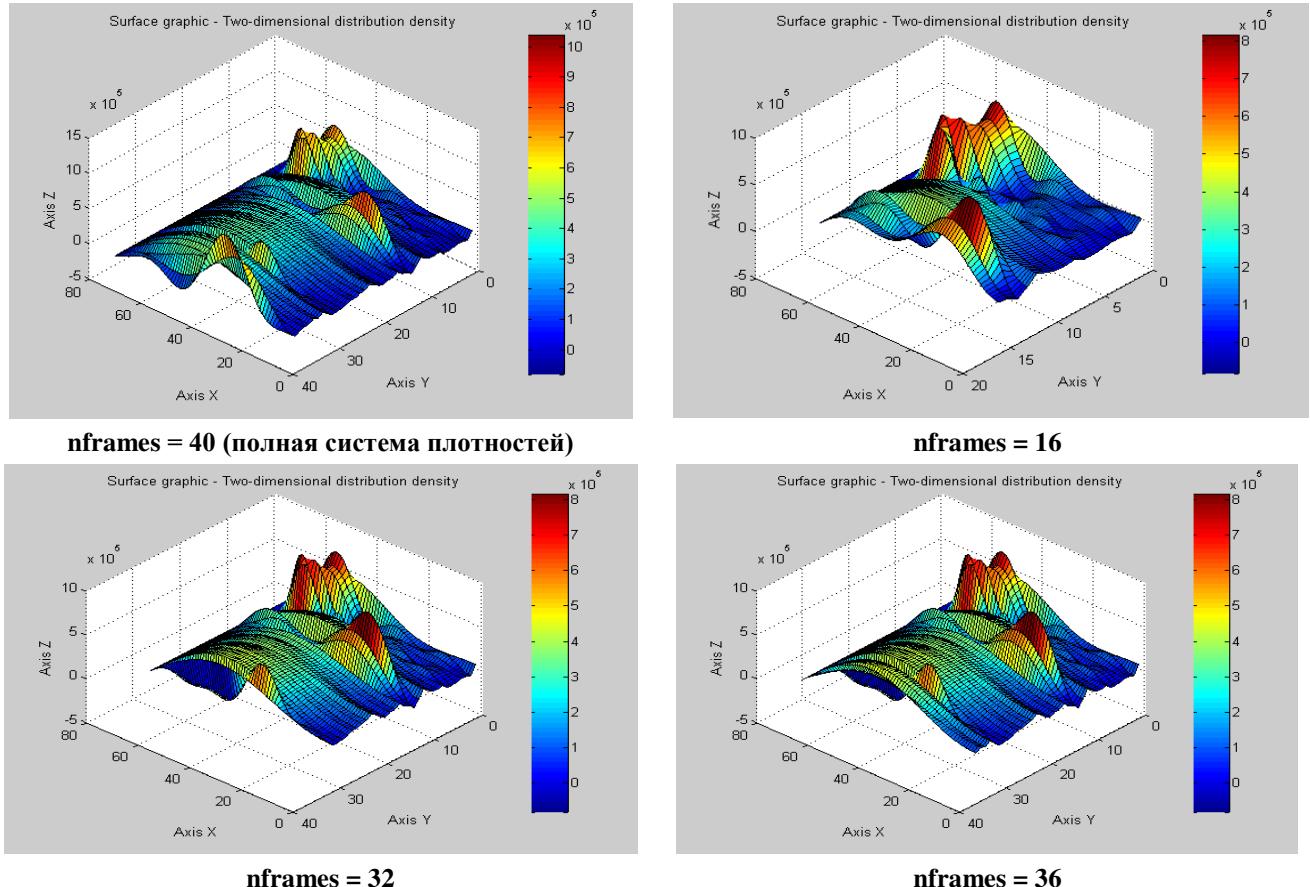


Рис. 4. Зависимость 2D-плотности распределения высотных профилей стали 30ХГСА от числа восстановленных одномерных плотностей по направлению Y

Fig. 4. Dependence of the 2D distribution density of the height profiles of 30KhGSA steel on the number of reconstructed one-dimensional densities in the Y direction

Показанные на рис. 2 «новые» поверхности повторяют структуру исходной (40x40 узлов), что подтверждает самоподобие структуры на различных масштабах. При увеличении

размера матрицы данных 3D-модели становятся закономерно сложнее при неизменном общем подобии (рис. 3). Как было отмечено ранее в [6], визуализация объемных плотностей распределения допускает множество возможных представлений.

Рис. 4 с исходной матрицей данных 40×40 пикселей иллюстрирует возможности анимации в процессе идентификации графиков распределения (значения по азимуту и полярному углу можно варьировать). Более поздние графики плотностей ставятся на передний план для улучшения графической визуализации и восприятия информации. Идентификация одномерных плотностей распределения высотных отметок выявила полимодальность законов распределения (число выраженных мод от одной до четырех). Информация о полимодальной природе высотных отметок необходима для выбора технологии и контроля чистоты обработки поверхности стальных элементов с учетом различных свойств по ортогональным направлениям. В ракетно-космической технике предложенный авторами публикации метод исследования анизотропных свойств поверхности конструкций (стали, композиты, защитные покрытия) имеет актуальную новизну. Важнейшее прикладное значение имеет учет влияния фрактальной анизотропии и стохастических характеристик на каталитическую активность материалов в аэродинамике разреженных газов, а также теоретические и экспериментальные исследования теплофизических и кинетических характеристик теплозащитных материалов [9, 12].

Рассмотрим фрактальную геометрию высотных отметок поверхности стали 30ХГСА на основе метода нормированного размаха Херста [13, 14]. На рис. 5 и 6 показаны двумерные R/S поверхности – семейство одномерных графиков, зависящих от аргумента X (аргумента Y) и соответствующие массивы показателей Херста (H) для матрицы 313×313 .

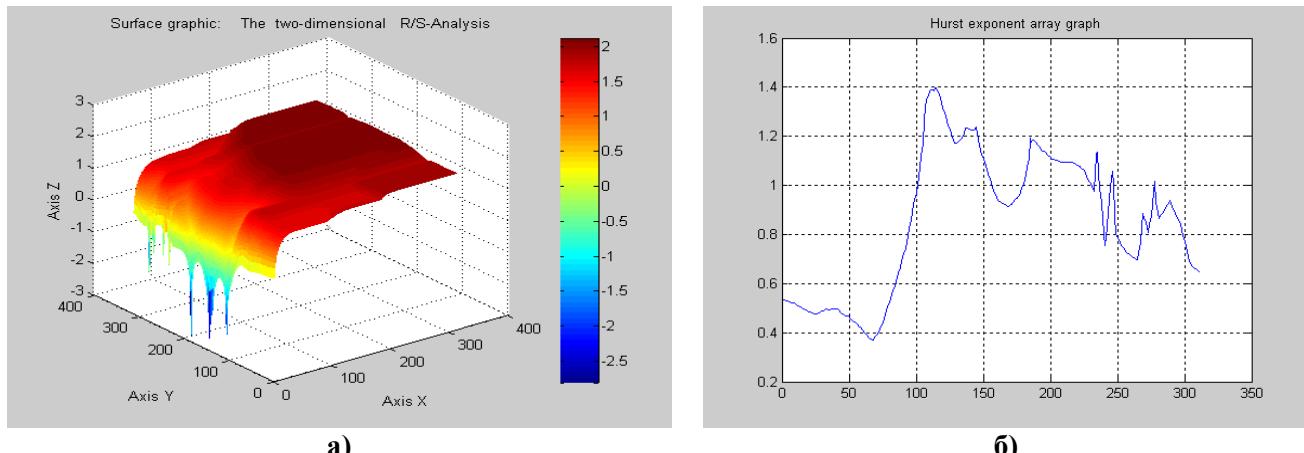


Рис. 5. Двумерные R/S поверхности и соответствующие массивы показателей Херста:
а) двумерная R/S поверхность высотных отметок стали 30ХГСА (семейство одномерных графиков, функций от аргумента X) по направлению оси Y; б) вычисленный массив показателей Херста

Fig. 5. Two-dimensional R/S surfaces and corresponding arrays of Hurst exponents:
a) two-dimensional R/S surface of elevation marks of 30KhGSA steel (a family of one-dimensional graphs, functions of the argument X) in the direction of the Y axis; б) calculated array of Hurst exponents

Как и в случае мембранный структуры, показатель H для стали 30ХГСА имеет часть значений выше 0.5 и ниже 1. Значения, большие 1, составляют в обоих вариантах (рис. 5б, 6б) примерно 50 %. Очевидно, что утверждение о фрактальных свойствах топологии образца стали необходимо также дополнить положением о анизотропии показателя H и экстремальности (относительно размеров шероховатости) высотных профилей.

Двумерный R/S-анализ шероховатости стали 30ХГСА выполнен для матриц узловых значений 157×157 , 625×625 , 1249×1249 . Фрактальная размерность Хаусдорфа-Безиковича $D = 3 - H$ высотных отметок тоже двумерная: $D_{x,y} = 3 - M\{H_{x,y}\}$. Например, для матрицы данных 313×313 значение $M\{H_x\} = 0.8548$, $D_x = 2.1452$. Аналогичный R/S-анализ вдоль оси Y образца

дает $D_y = 3 - M\{H_y\} = 3 - 0.8926 = 2.1074$. Отметим корректность применения интерполяции в условиях малых выборок: на сетке 1249x1249 значение $M\{H_x\} = 0.8479$, $D_x = 2.1521$; $D_y = 3 - M\{H_y\} = 3 - 0.8719 = 2.1281$. Для всех вариантов двумерной интерполяции подтверждается фрактальность геометрии топологических характеристик поверхности стали.

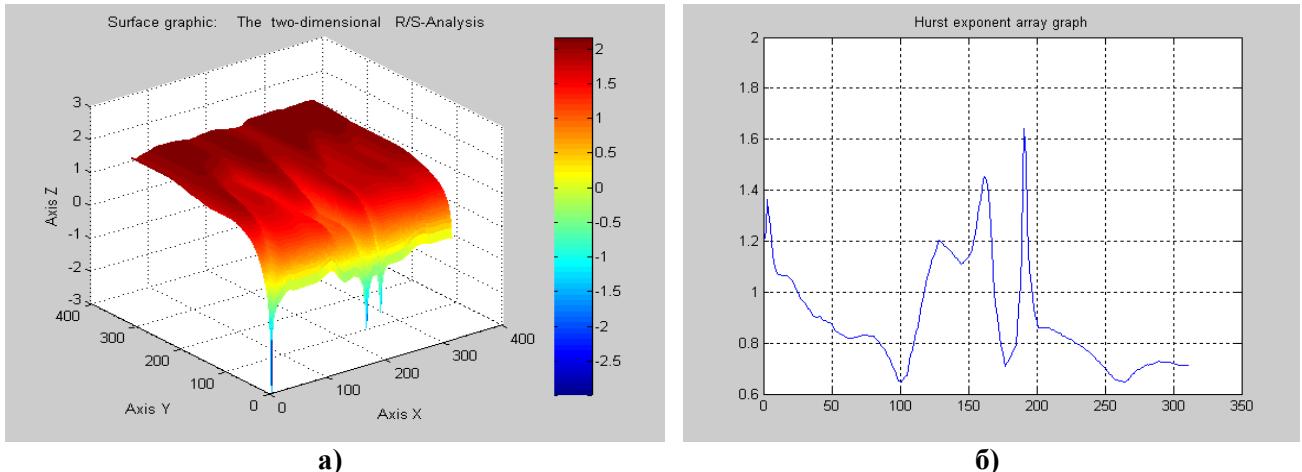


Рис. 6. Двумерные R/S поверхности и соответствующие массивы показателей Херста:
a) R/S поверхность высотных отметок стали 30ХГСА (семейство одномерных графиков, функций от аргумента Y) по направлению оси X; б) массив показателей Херста

Fig. 6. Two-dimensional R/S surfaces and corresponding arrays of Hurst exponents:
a) R/S surface of elevation marks of 30KhGSA steel (a family of one-dimensional graphs, functions of the argument Y) in the direction of the X axis; б) array of Hurst exponents

В табл. 1 приведены все идентифицированные значения двумерной фрактальной размерности $D_{x,y}$ для метода двумерной линейной интерполяции СТМ-данных изученного образца стали. Компонента D_y фрактальной размерности для исходной матрицы данных, определенная по методу Херста равна 1.9704, что дает неверное значение, меньшее топологической евклидовой размерности, равной 2. Это подтверждает тезис о том, что объем измерительных данных должен быть существенно больше.

Таблица 1.
Значения двумерной фрактальной размерности $D_{x,y}$ для образца стали 30ХГСА (двумерный метод Херста)

Table 1.
Values of the two-dimensional fractal dimension $D_{x,y}$ for 30KhGSA steel sample (two-dimensional Hurst method)

Размер топологии	40x40	79x79	157x157	313x313	625x625	1249x1249
D_x	2.1356	2.1381	2.1405	2.1452	2.1491	2.1521
D_y	1.9704*	2.0475	2.0853	2.1074	2.1204	2.1281

В публикации [12] для стали 30ХГСА выполнен анализ фрактальных свойств поверхности на основе СТМ-снимков. Табл. 2 воспроизводит вычисленные фрактальные размерности, зависящие от профилей поверхности в различных масштабах сканирования. В статье отмечается, что «для определения фрактальной размерности D использовался метод кубической размерности [8], при этом в среднем $D = 2.2$ с разбросом 0,1». Отметим, что в работах [8-10], как и в большинстве значимых отечественных и зарубежных исследований, фрактальная размерность D – скалярный параметр, количественно описывающий фрактальные свойства поверхности изучаемого образца.

Таблица 2.
Фрактальная размерность поверхности стали 30ХГСА
при различных масштабах съемки СТМ [12]

Table 2.
Fractal dimension of 30KhGSA steel surface of at different STM shooting scales [12]

Снимок	8x8 мкм	4x4 мкм	2x2 мкм	1x1 мкм	0,5x0,5 мкм	250x250 нм	120x120 нм	63x63 нм	30x30 нм
<i>D</i>	2,14	2,24	2,28	2,10	2,20	2,22	2,29	2,33	2,20

Сравнение значений табл. 1 с фрактальными данными табл. 2 подтверждает корректность применения двумерной интерполяции СТМ-данных для малых двумерных выборок и обобщает одномерный фрактальный подход.

Выводы

1. На примере стали 30ХГСА выявлена возможность применения интерполяции данных СТМ в условиях малых двумерных выборок с актуальным увеличением размеров матриц (как минимум до уровня 1249x1249).
2. Предложенный полимодальный вероятностный и фрактальный подход к изучению топологических характеристик образца стали 30ХГСА является универсальным и может применяться для изучения морфологических параметров поверхностей различных типов.
3. Оптимизация измерений параметров в АСМ и СТМ микроскопии за счет двумерной интерполяции данных (типичные значения времени сканирования участка размером 256×256 пикселей от 10 до 40 мин) сокращает длительность зондирования, повышает точность и возможности методов в режиме масштабного мониторинга топологий микроструктур.

Библиографический список

1. Анофриев, В.А. К проблеме автоматизации процесса определения фрактальной размерности / В.А. Анофриев, А.В. Низенко, Д.В. Иванов [и др.] // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. – С. 264-276.
2. Имашев, С.А. Оценка возможностей применения методов фрактального анализа для исследования геофизических данных. Часть 1. Обзор методов оценки параметра Херста / С.А. Имашев, В.Н. Сычев // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2017. – Т. 17. № 5. – С. 72-77.
3. Аптуков, В.Н. Фрактальные и механические свойства кристаллов сильвина и галита в микро- и нанодиапазоне / В.Н. Аптуков, В.Ю. Митин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. – 2017. – № 3. – С. 481-495.
4. Кириллов, Д.С. Распределения показателя Херста нестационарного маркированного временного ряда / Д.С. Кириллов, О.В. Короб, Н.А. Митин [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2013. – № 11. – С. 1-16.
5. Куликов, В.Б. Плотности распределения и фрактальная геометрия двумерных характеристик стохастических структур и систем / В.Б. Куликов, А.Б. Куликов, В.П. Хранилов, А.А. Игнатьев // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 6. – С. 101-106.
6. Куликов, В.Б. Анализ фрактальных параметров поверхностных топологий микроструктур со стохастическими свойствами / В.Б. Куликов, А.Б. Куликов, В.П. Хранилов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2024. – № 4. – С. 17-26. – EDN MXHDMW.
7. Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – Москва: Наука, 1986. – 288 с.
8. Брылкин, Ю.В. Геометрическое моделирование микроструктуры поверхности на основе теории фракталов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.01.01 / Брылкин Юрий Владимирович. – М., 2018. – 121 с.

9. **Брылкин, Ю.В.** Экспериментальные исследования влияния структуры поверхности материалов на их катализическую активность / Ю.В. Брылкин, В.И. Власов, Г.Н. Залогин [и др.] // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2015. – Т. 16, вып. 3. URL: www.chemphys.edu.ru/issues/2015-16-3/articles/600 (дата обращения: 1.09.2025).
10. **Брылкин, Ю.В.** Исследование микро- и наноструктуры поверхности медного сплава с использованием теории фракталов / Ю.В. Брылкин, А.Л. Кусов // Космонавтика и ракетостроение. – 2016. – № 5 (90). – С. 89-95.
11. **Дьяконов, В.П.** MATLAB. Полный самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
12. **Брылкин, Ю.В.** Моделирование структуры рельефа реальных поверхностей на основе фракталов в аэродинамике разреженных газов / Ю.В. Брылкин, А.Л. Кусов // Космонавтика и ракетостроение. – 2014. – № 3 (76). – С. 22-28.
13. **Федер, Е.** Фракталы / Е. Федер. – Москва: Мир, 1991. – 254 с.
14. **Петерс, Э.** Хаос и порядок на рынках капитала. Новый аналитический взгляд на циклы, цены и изменчивость рынка / Э. Петерс. – Москва: Мир, 2000. – 333 с.

References

1. Anofriev V.A., A.V. Nizenko, D.V. Ivanov, A.S. Antonov and N.Iu. Sdobniakov. 2022. “K probleme avtomatizatsii protsessa opredeleniia fraktal'noi razmernosti” [On the Problem of Automating the Process of Determining Fractal Dimension]. *Fiziko-khimicheskie aspeki izucheniiia klasteroi, nanostruktur i nanomaterialov* [Physical and Chemical Aspects of the Study of Clusters, Nanostructures and Nanomaterials], no. 14: 264-276.
2. Imashev S.A. and V.N. Sychev. 2017. “Otsenka vozmozhnosti primeneniia metodov fraktal'nogo analiza dlja issledovaniia geofizicheskikh dannykh. Chast' 1. Obzor metodov otsenki parametra Khersta” [Assessing the Possibilities of Applying Fractal Analysis Methods for the Study of Geophysical Data. Part 1. A Review of Methods for Estimating the Hurst Parameter]. *Vestnik KRSU* [Bulletin of KRSU] 17 (5): 72-77.
3. Aptukov V.N. and V.Yu. Mitin. 2017. “Fraktal'nye i mekhanicheskie svoistva kristallov sil'vina i galita v mikro- i nanodiapazone” [Fractal and Mechanical Properties of Sylvite and Halite Crystals in the Micro- and Nanorange]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki* [Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences], no. 3: 481-495.
4. Kirillov D.S., O.V. Korob, N.A. Mitin and [et al.]. 2013. “Raspredeleniia pokazatelia Khersta nesstasionarnogo markirovannogo vremennogo riada” [Distributions of the Hurst Exponent for a Non-Stationary Marked Time Series]. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha* [Keldysh Institute Preprints], no. 11: 1-16.
5. Kulikov V.B., A.B. Kulikov, V.P. Khranilov and A.A. Ignat'ev. 2024. “Plotnosti raspredeleniia i fraktal'naia geometriia dvumernykh kharakteristik stokhasticheskikh struktur i sistem” [Distribution Densities and Fractal Geometry of Two-Dimensional Characteristics of Stochastic Structures and Systems]. *Matematicheskie metody v tekhnologiiakh i tekhnike* [Mathematical Methods in Technologies and Engineering], no. 6: 101-106.
6. Kulikov V.B., A.B. Kulikov and V.P. Khranilov. 2024. “Analiz fraktal'nykh parametrov poverkhnostnykh topologii mikrostruktur so stokhasticheskimi svoistvami” [Analysis of Fractal Parameters of Surface Topologies of Microstructures with Stochastic Properties]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev], no. 4: 17-26. EDN: MXHDMW.
7. Tikhonov A.N. and V.Ya. Arsenin. 1986. *Metody resheniiia nekorrektnykh zadach* [Methods for Solving Ill-Posed Problems]. Moscow: Nauka.
8. Brylkin Yu.V. 2018. “Geometricheskoe modelirovaniie mikrostruktury poverkhnosti na osnove teorii fraktalov” [Geometric Modeling of Surface Microstructure Based on Fractal Theory]. Candidate of Technical Sciences diss., Moscow.
9. Brylkin Yu.V., V.I. Vlasov, G.N. Zaloga, A.L. Kusov and N.F. Rudin. 2015. “Eksperimental'nye issledovaniia vliianiia struktury poverkhnosti materialov na ikh kataliticheskuiu aktivnost” [Experimental Studies of the Influence of Material Surface Structure on Their Catalytic Activity]. *Fiziko-khimicheskaiia kinetika v gazovoi dinamike* [Physicochemical Kinetics in Gas Dynamics] 16 (3).

10. Brylkin Yu.V. and A.L. Kusov. 2016. “Issledovanie mikro- i nanostruktury poverkhnosti mednogo splava s ispol'zovaniem teorii fraktalov” [Study of the Micro- and Nanostructure of a Copper Alloy Surface Using Fractal Theory]. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and Rocket Engineering], no. 5 (90): 89-95.
11. D'iakonov V.P. 2012. *MATLAB. Polnyi samouchitel'* [MATLAB. Complete Tutorial]. Moscow: DMK Press.
12. Brylkin Yu.V. and A.L. Kusov. 2014. “Modelirovaniye struktury re'efa real'nykh poverkhnostei na osnove fraktalov v aerodinamike razrezhennykh gazov” [Modeling the Structure of Real Surface Topography Based on Fractals in Rarefied Gas Aerodynamics]. *Kosmonavtika i raketostroenie* [Cosmonautics and Rocket Engineering], no. 3 (76): 22-28.
13. Feder E. 1991. *Fraktały* [Fractals]. Moscow: Mir.
14. Peters E. 2000. *Khaos i poriadok na rynkakh kapitala. Novyi analiticheskii vzgliad na tsikly, tseny i izmenchivost' rynka* [Chaos and Order in the Capital Markets. A New Analytic View of Cycles, Prices and Market Volatility]. Moscow: Mir.

Дата поступления
в редакцию: 10.09.2025

Дата принятия
к публикации: 14.10.2025

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ НЕПОЛНЫХ ДАННЫХ

И.Д. Чернобаев

ORCID: 0000-0001-6809-6473 e-mail: ichernobnn@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрено применение инструментов нейросетевого моделирования и теории нечетких множеств в задачах диагностирования проблемных состояний технических объектов в условиях неполных данных. Выполнены построение и настройка нейро-нечетких моделей в условиях неполных данных с применением нечетких логических систем второго типа. Рассматриваемый подход к построению нейро-нечетких классификаторов основан на расширении инструмента нейросетевого моделирования аппаратом нечетких логических систем. Экспериментальное применение нейро-нечеткого классификатора в задаче технической диагностики позволило повысить точность классификации проблемных состояний до 11.2 % в сравнении с обычной нейросетевой моделью. Практическая значимость исследования определяется тем, что нейро-нечеткие системы классификации могут быть применены в условиях неполных данных в задачах диагностики технических объектов, в том числе, объектов атомной отрасли.

Ключевые слова: техническая диагностика; неполные данные; нейросетевое моделирование; нечеткая логическая система; нейро-нечеткая классификация.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чернобаев, И.Д. Техническая диагностика на основе нейросетевого моделирования при неполных данных // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 31-41.
DOI:10.46960/1816-210X_2025_4_31 EDN: JARTUC

TECHNICAL DIAGNOSTICS BASED ON NEURAL NETWORK MODELING WITH INCOMPLETE DATA

I.D. Chernobaev

ORCID: 0000-0001-6809-6473 e-mail: ichernobnn@gmail.com
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article discusses the application of neural network modeling tools and fuzzy set theory in diagnosing problematic states of technical objects in conditions of incomplete data. Neuro-fuzzy models were built and tuned under conditions of incomplete data using type-2 fuzzy logic systems. The considered approach to the construction of neuro-fuzzy classifiers is based on the expansion of the neural network modeling tool with the apparatus of fuzzy logical systems. The experimental application of the neuro-fuzzy classifier in a technical diagnostics task allowed to increase the accuracy of classifying problematic conditions to 11.2 % compared to a conventional neural network model. Neuro-fuzzy classification systems can be applied in conditions of incomplete data in diagnostic tasks of technical objects, including nuclear industry objects.

Key words: technical diagnostics; incomplete data; neural networks; fuzzy logic system; neuro-fuzzy classification.

FOR CITATION: I.D. Chernobaev. Technical diagnostics based on neural network modeling with incomplete data. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 31-41. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_31 EDN: JARTUC

В работе рассматривается задача технического диагностирования состояний объектов со сложной структурой. Под состоянием объекта понимается некоторая категория, характеризующая свойства объекта в момент времени и при этом описываемая набором признаков. Сложность структуры объекта выражается в присутствии в признаковом описании характеристик, которые требуют предварительной специализированной обработки и обладают отношениями иерархии или характеризуются наличием последовательностей, неструктурированных элементов.

В теории машинного обучения под решением задачи классификации понимается получение ответа на вопрос о принадлежности рассматриваемого объекта к некоторой категории из множества допустимых в рамках задачи. Для определения объекта к той или иной категории требуется построить модель объекта в виде набора признаков и выполнить анализ его признакового описания. В контексте технического диагностирования значения элементов признакового описания рассматриваемого объекта могут содержать неточности, погрешности и ошибки, обусловленные датчиками измерительных приборов. Подобные неточности приводят к «нечеткости» границ между категориями, что затрудняет получение однозначного ответа о принадлежности объекта к одной из них. В таких условиях необходимо рассматривать степень принадлежности объекта к категории, что требует более детального и комплексного подхода к анализу данных.

Задача классификации может быть решена применением как точных аналитических методов, так и приближенных численных подходов. Аналитические методы предполагают формализацию проблемы и последующее нахождение точного решения за конечное число операций, что позволяет проводить оценку вычислительной и временной сложности получения решения. В основу аналитического подхода заложены строгие математические принципы, что позволяет достичь высокой степени уверенности в корректности и точности результата, и делает эти методы предпочтительными в областях с повышенными требованиями к надежности и интерпретируемости полученных решений.

Точные методы требуют строгого определения анализируемого процесса. Тем не менее, даже при его наличии точное решение может оказаться недостижимым. У аналитических методов отсутствует стадия обучения на данных ввода, поэтому они особенно требовательны к качеству входных данных. Эти методы обеспечивают интерпретируемость решений и востребованы в областях, где отсутствуют необходимые объемы обучающих данных, а сами данные содержат хорошо известные закономерности. При этом вычислительная сложность получения точного решения, при условии его существования, определяется размером пространства признаков анализируемых объектов, следовательно, точные методы могут оказаться неприменимы в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Поиск оптимального решения численными методами является ключевым инструментом в ситуациях, когда существует множество допустимых решений задачи, а поиск точного решения аналитическим методом затруднен ввиду необходимости выполнения чрезмерно ресурсоемких вычислений. Эти методы позволяют эффективно справляться с задачами оптимизации в условиях неполноты данных, наличия ошибок и погрешностей измерений, а также при ограниченных вычислительных ресурсах. Численные методы оптимизации играют важную роль в ситуациях, когда точное решение задачи либо не может быть получено в разумные сроки, либо не существует в принципе. В связи с этим, алгоритмы численных методов позволяют находить приближенные решения, удовлетворяющие заданным критериям оптимальности и востребованы в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Инструмент нейросетевого моделирования, как один из методов приближенного поиска решения, позволяет обрабатывать большие объемы данных, выявлять и аппроксимировать скрытые в них закономерности, которые не всегда поддаются аналитическому решению. Возможность применения искусственных нейронных сетей (ИНС) для обработки данных любой физической природы [1], способность инструмента нейросетевого моделирования обобщать новые данные, отсутствующие в обучающей выборке, подходы к повышению про-

изводительности нейросетевых моделей через организацию параллельных и распределенных вычислений, построения ансамблей базовых нейросетевых моделей, квантизацию весовых коэффициентов, позволяют применять инструмент нейросетевого моделирования в задачах технического диагностирования для классификации проблемных состояний технических объектов, прогнозирования отказов оборудования.

В инструменте нейросетевого моделирования рассматривается совместное применение множеств простейших компонентов в качестве основы ИНС: искусственный нейрон (рис. 1) и функция активации (ФА), преобразующая сигнал на выходе нейрона.

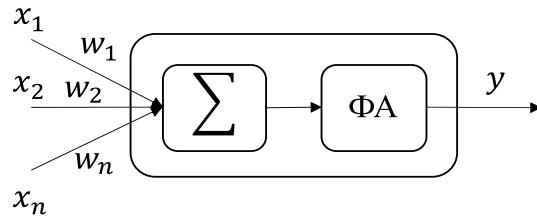


Рис. 1. Модель искусственного нейрона включает операцию линейной комбинации входа и весовых коэффициентов, а также функцию активации

Fig. 1. The artificial neuron model includes a linear combination operation of the input and weight coefficients, as well as an activation function

Функции активации обеспечивают нелинейность, необходимую для аппроксимации произвольных функций и позволяют формировать способность нейросетевой модели к извлечению и представлению сложных зависимостей в данных. Кроме того, ФА оказывают значительное влияние на сходимость и стабильность процесса обучения. Например, функция ReLU (рис. 2), способствует ускорению обучения благодаря устранению проблемы исчезающего градиента, что особенно важно для глубоких нейронных сетей. Функция сигмоиды (рис. 2) обеспечивает отображение входного сигнала в диапазон $[0, 1]$, но в то же время применение этой функции может способствовать замедлению обучения из-за проблемы исчезающего градиента.

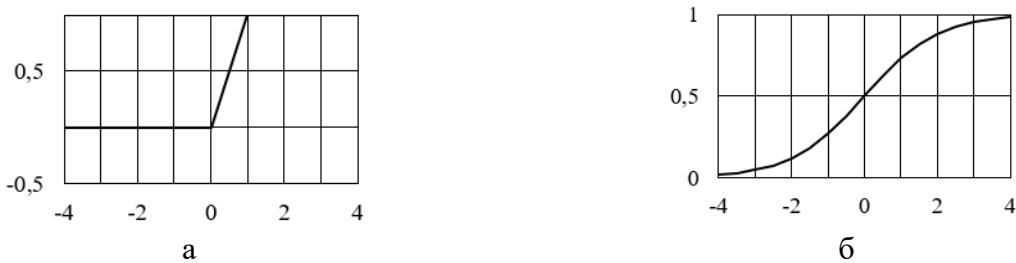


Рис. 2. Функции активации ReLU (а) и Sigmoid (б)

Fig. 2. ReLU (a) and Sigmoid (b) activation functions

Простейшие нейросетевые модели включают полносвязные ИС прямого распространения, рекуррентные сети, характеризуемые наличием петли в структуре вычислительного графа ИНС, а также сверточные ИНС, в которых применяется операция свертки изображения. Различия между этими архитектурами заключаются в применяемых операциях и способе распространения сигнала по вычислительному графу сети. Сети прямого распространения представляют собой многослойные нейросетевые модели, где входные данные последовательно преобразуются и передаются в направлении от входного слоя к выходному. Эта конфигурация позволяет сети осуществлять последовательное извлечение и обработку информации, что делает ее эффективным инструментом для решения задач классификации, регрессии и других задач машинного обучения. В сети прямого распространения реализована операция линейной комбинации вектора входного сигнала и матрицы весовых коэффициентов

нейронов в слое (рис. 3). Это обеспечивает возможность моделирования сложных нелинейных зависимостей между входными и выходными данными.

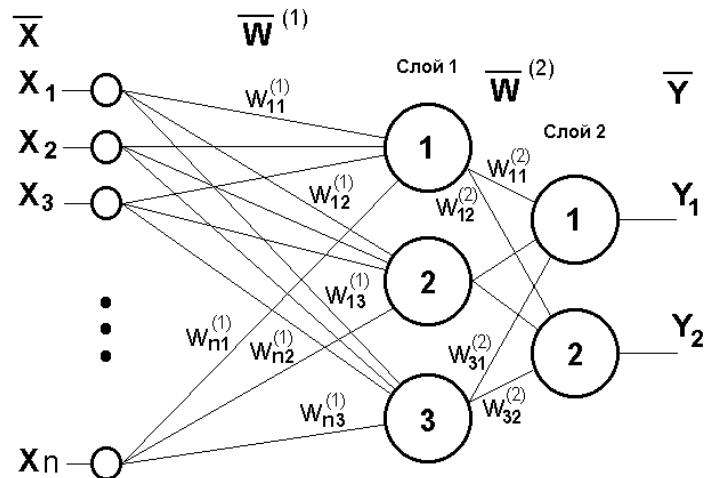


Рис. 3. Модель ИНС прямого распространения

Fig. 3. Feedforward artificial neural network model

В архитектуре рекуррентных нейросетевых моделей присутствуют элементы обратной связи, формирующие ориентированный граф с циклическими связями (рис. 4). Наличие обратной связи позволяет учитывать временную зависимость данных и обеспечивает возможность сохранения информации о предыдущих состояниях сети. Такие сети применяются в задачах обработки последовательностей данных.

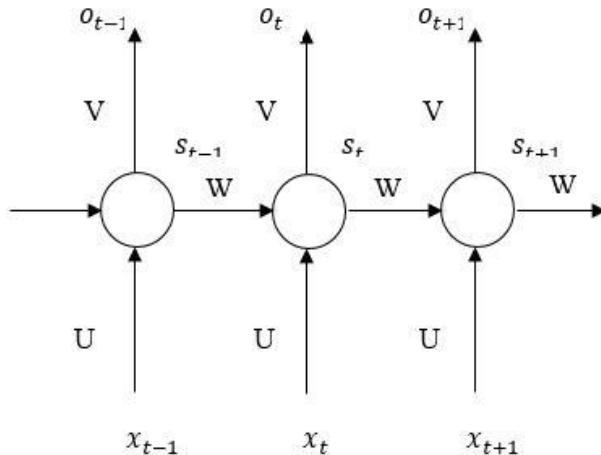


Рис. 4. Структура РНС

Fig. 4. Structure of a recurrent neural network

Ключевым элементом архитектуры сверточных нейронных сетей (СНС) является операция свертки изображения – специализированный настраиваемый фильтр, направленный на выявление существенных признаков в изображении. Операция свертки позволяет нейросетевой модели эффективно анализировать визуальные данные, при этом абстрагируясь от не значительных деталей и фокусируясь на более значимых признаках, что является ключевым аспектом в задачах компьютерного зрения и распознавания образов. В результате применения нескольких операций свертки изображения в последовательности (рис. 5), из исходного изображения на каждом шаге извлекаются все более абстрактные и значимые признаки.

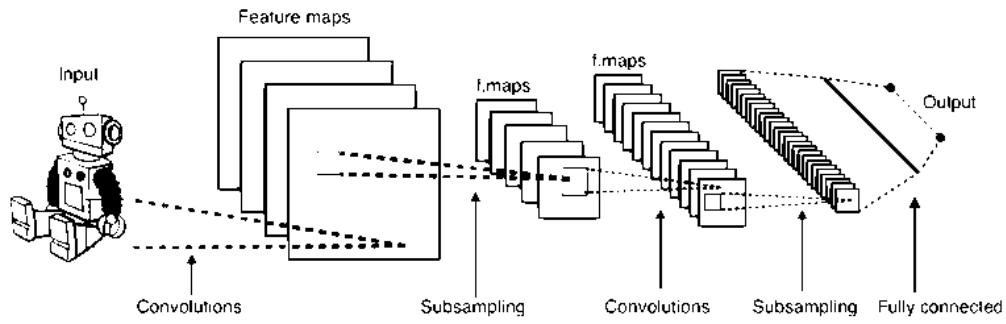


Рис. 5. Модель сверточной ИНС

Fig. 5. Convolutional artificial neural network model

Свойство универсального аппроксиматора [2] обеспечивает высокую точность нейросетевых моделей при решении любых прикладных задач. Структура графа в основе нейросетевых моделей допускает параллельную обработку данных, что способствует ускорению процесса обучения и принятия решений. Существенный недостаток ИНС заключается в низкой интерпретируемости [3] решений, принятых нейросетевыми моделями и ограничивает их применение в областях, требующих прозрачности и надежности используемых моделей. Эффективность нейронных сетей в обобщении данных напрямую связана с количеством и качеством информации, поступающей на вход. Качество решений нейросетевой модели может значительно снизиться при обработке неполных или неточных данных.

При работе с нечеткими или неполными данными для моделирования нечеткости применяется инструмент теории нечетких множеств (НМ), который предоставляет методологическую основу для формализации неопределенности [4] с помощью функций принадлежности (ФП), которые количественно оценивают степень принадлежности объектов к классам с нечеткими границами. Интеграция НМ в архитектуру нейросетевых моделей позволит повысить интерпретируемость и точность ИНС при работе с нечеткими или неполными данными. Нечеткое множество первого типа (T1-НМ) представляет собой набор упорядоченных пар, каждая из которых включает элемент «х» универсального множества «Х» и соответствующее ему значение степени принадлежности.

Характеристическая функция НМ определяется на диапазоне допустимых значений принадлежностей. На рис. 6 приведен график треугольной ФП, определенной для значений $\{2, 4, 6, 8\}$ диапазона принадлежностей. Если пространство принадлежностей содержит только два элемента $\{0, 1\}$, то НМ вырождается в детерминированное четкое множество.

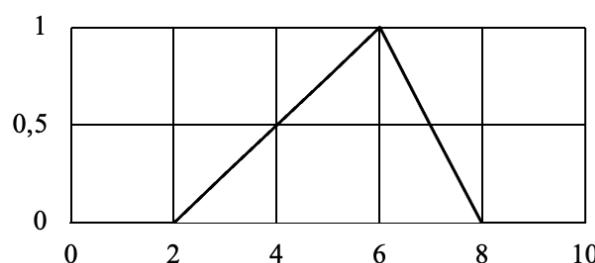


Рис. 6. График треугольной ФП

Fig. 6. Graph of triangular membership functions

Из определения функции НМ первого типа следует его важное ограничение и недостаток. Такое множество не позволяет моделировать неопределенность в значениях характеристической функции. Нечеткое множество 2-го типа (T2-НМ) расширяет возможности стандартных ФП и приведено на рис. 7. T2-НМ описывается множеством ФП, также являющихся T1-НМ [5].

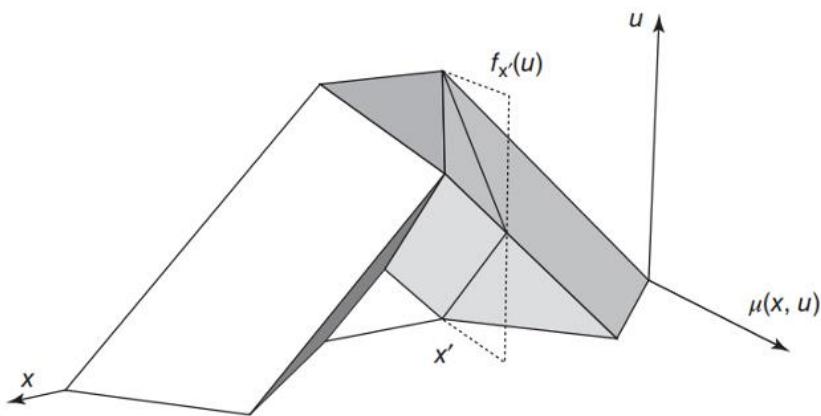


Рис. 7. Трехмерная модель обобщенного Т2-НМ с треугольными ФП

Fig. 7. Three-dimensional model of a generalized type-2 fuzzy set with triangular membership functions

Нечеткое множество второго типа можно рассматривать как область, образуемую проекцией множества ФП первого типа на плоскость "u-x", образуемую двумя ФП (рис. 8). Эту проекцию называют «отпечатком неопределенности» нечеткого множества второго типа. Третье измерение у Т2-НМ и его след неопределенности образуют вторичную ФП, которая позволяет моделировать нечеткость в ФП. Вторичная ФП – это проекция Т2-НМ на плоскость "u-Mu" в точке "x'" (рис. 8, справа).

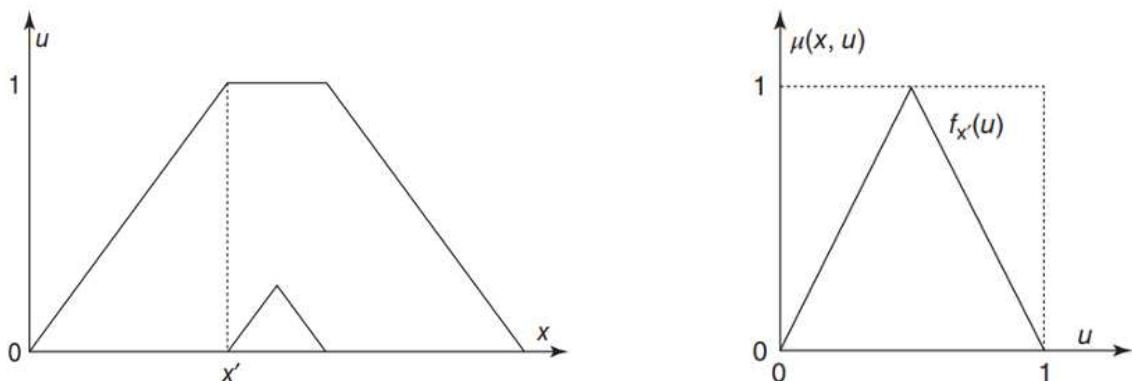


Рис. 8. Отпечаток неопределенности ФП Т2-НМ (слева) и вторичная треугольная ФП в точке x' (справа)

Fig. 8. The fingerprint of the uncertainty of the membership function of type-2 fuzzy set (left) and the secondary triangular membership function at point x' (right)

Если значения вторичной функции принадлежности для всех элементов первичной принадлежности принимают значение, равное 1, функция принадлежности классифицируется как интервальная (пунктирная линия на рис. 8 справа). Соответствующее нечеткое множество также обозначается как интервальное нечеткое множество второго типа (Т2-ИНМ). Обобщая вышеизложенное, Т2-НМ можно рассматривать как совокупность встроенных Т1-НМ. Принцип работы НЛС построен на совокупной обработке НМ в соответствии с заданными правилами. Поэтому решения НЛС – интерпретируемые, но построение подобных систем требует применения экспертных знаний прикладной области при составлении базы правил.

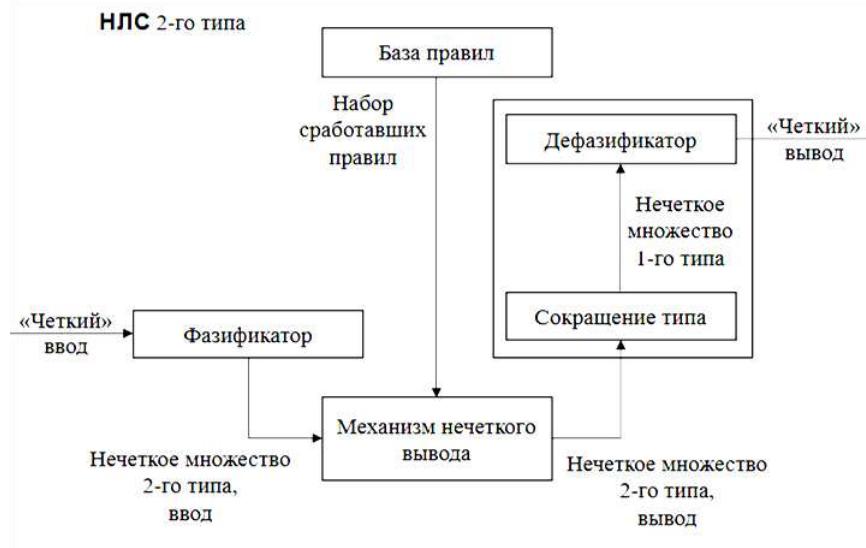


Рис. 9. Структура НЛС 2-го типа

Fig. 9. Structure of type-2 fuzzy logic system

В работе рассматривается структура Т2-НЛС, содержащая три правила для оперирования Т2-ИНМ, определяемыми треугольными ФП сверху и снизу (рис. 10).

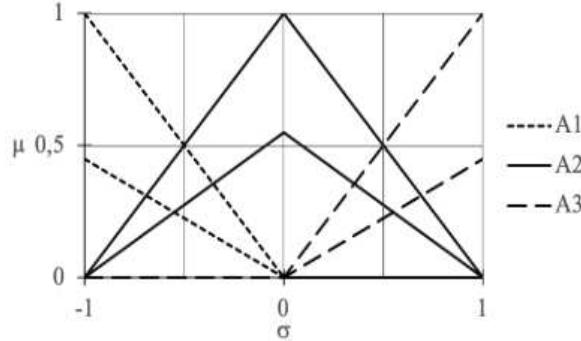


Рис. 10. Графическое представление рассматриваемой базы правил

Fig. 10. Graphical representation of the rule base under consideration

В рассматриваемых НМ след неопределенности формируется следующими ФП:

$$\bar{\mu}_{A_i} = \begin{cases} \frac{\sigma - c_{i+1}}{c_i - c_{i+1}}, & \sigma \in [c_i, c_{i+1}) \\ \frac{c_{i-1} - \sigma}{c_{i-1} - c_i}, & \sigma \in [c_{i-1}, c_i) \end{cases} \quad (1)$$

$$\underline{\mu}_{A_i} = h_i \cdot \bar{\mu}_{A_i}, \quad (2)$$

где $c_1 = -1, c_2 = 0, c_3 = 1$, отпечаток неопределенности Т2-ИНМ определяется только коэффициентами $h_1 = h_3 = 1 - a, h_2 = a$, $a \in (0,1)$. Рассматриваемый подход [6] к прототипированию Т2-НЛС позволяет формировать вывод через изменение параметра a .

В рассматриваемой Т2-НЛС выполняются следующие пять этапов преобразования информационного сигнала.

1. Фаззификация – сигнал, передаваемый на вход системы на этапе фаззификации отображается в Т2-НМ.

2. В соответствии с базой определяются правила, соответствующие вводу:

$$\text{ЕСЛИ } \sigma \text{ ЯВЛЯЕТСЯ } A_i \text{ ТОГДА } F \text{ ЯВЛЯЕТСЯ } F_i = B_i \quad (3)$$

где σ – сигнал на входе Т2-НЛС, A_i – Т2-ИНМ, а B – вывод Т2-НЛС, при этом $B_1 = N$, $B_2 = 0$, $B_3 = P$, P и N – числовые коэффициенты.

3. Следствия активированных правил объединяются с применением операций над Т2-НМ и образуют вывод Т2-НЛС – агрегированное нечеткое множество.

4. Сокращение типа – для Т2-НМ определяется центроид, который является Т1-НМ.

5. Дефазификация – полученное Т1-НМ преобразуется в числовой вывод, который включает алгоритм отображения Т1-НМ в вывод НЛС.

Из выражения (2) следует, что параметры рассматриваемой НЛС определяют форму следа неопределенности. При этом следует отметить, что значения параметра " $a=\{0,1\}$ ", приводят к вырождению Т2-НМ в Т1-НМ, что приводит к сокращению типа НЛС, в результате чего сокращается количество Т1-НМ, входящих в состав Т2-НМ

В результате выполнения этапов 4-5 работы НЛС, модель НФА можно формализовать в виде [7]:

$$F(\sigma, P, N, a) = \begin{cases} P\sigma k(\sigma, a), & \sigma \in (0; 1] \\ N\sigma k(-\sigma, a), & \sigma \in [-1; 0] \end{cases} \quad (4)$$

$$k(\sigma) = 0.5 \left(\frac{1}{a + \sigma - a\sigma} + \frac{1 - a}{1 - a\sigma} \right) \quad (5)$$

где параметры P , N , a – конфигурируемые параметры, определяющие форму нечеткой функции активации, график которой приведен на рис. 11.

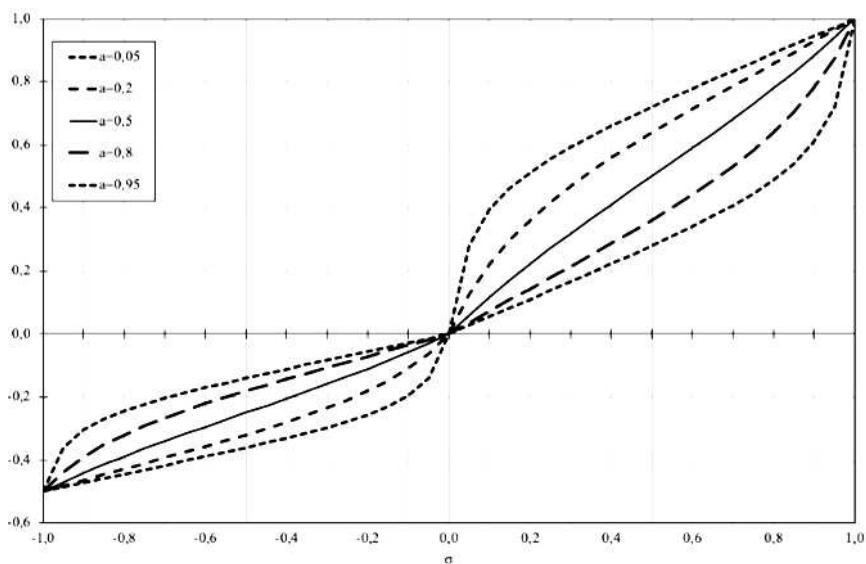


Рис. 11. График нечеткой функции активации с параметрами $N=1.0$, $P=1.0$ и переменными значениями параметра a

Fig. 11. Graph of fuzzy activation function with parameters $N=1.0$, $P=1.0$ and variable values of parameter a

На рис. 11 продемонстрирован потенциал гибкой настройки нелинейного отображения в НФА путем изменения параметров функции, которое позволяет получать отображения, близкие к базовым функциям активации. При построении моделей ИНС выражение (4) допустимо использовать как НФА, при этом весовые коэффициенты модели нейрона замещены параметрами НФА. Продемонстрировано, как меняется нелинейное отображение НФА в зависимости от знака и абсолютного значения параметра " a ".

В работе для моделирования НФА (рис. 12), применяются Т2-НЛС и, соответственно, Т2-ИНМ, при этом параметры НФА обновляются согласно правилу обучения ИНС. Такой подход позволяет использовать различные типы НМ и алгоритмы перехода в диапазон «четких» чисел [8].

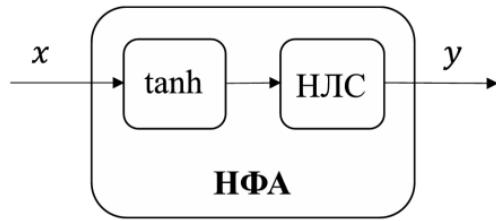


Рис. 12. Модель нечеткой функции активации

Fig. 12. Fuzzy activation function model

При обучении нейро-нечеткого классификатора значения параметра "a" могут принимать значения за пределом области определения в выражении (1), что сделает НФА недифференцируемой и негативно отразится на точности ННК. Для того чтобы исключить возможность выхода значений за пределы допустимого интервала, в [7] предложен этап нормализации ввода, который, ограничивающий значения параметра α в пределах (0,1). В исследовании рассматривается метод нормализации с использованием функции гиперболического тангенса:

$$\sigma = \tanh(x) = \frac{e^{2x}-1}{e^{2x}+1}, \quad (6)$$

Слой нейронов с НФА применяется для получения нейро-нечетких систем классификации [9]. Ввиду того, что у нейрона с НФА весовые коэффициенты замещены параметрами НФА, связь между слоем ИНС предшествующим слою НФА, и слоем НФА организована по принципу «один к одному» (рис. 13).

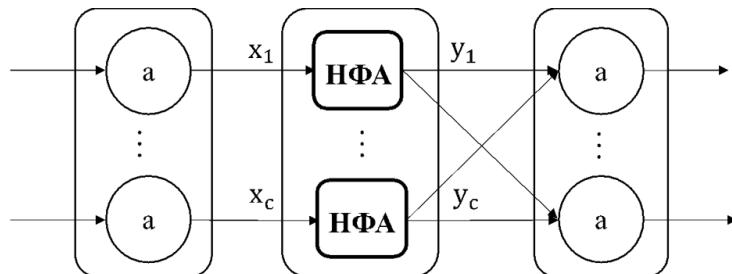


Рис. 13. Схема организации связей со слоем НФА в ИНС прямого распространения

Fig. 13. Diagram of the organization of connections with a fuzzy activation function layer in a feedforward artificial neural network

Системы классификации, объединяющие ИНС и НФА, предлагают альтернативный подход к построению нейросетевых моделей. При построении нейро-нечетких моделей требуется добавить слой НФА в структуру любой нейросетевой модели. Например, при построении сверточной нейро-нечеткой сети (СННС) достаточно применить слой нейронов с НФА в составе сверточной ИНС. В работе нейро-нечеткие классификаторы применены к прикладной задаче диагностирования дефектов внутренней поверхности труб [1], являющихся, в том числе, объектами атомной отрасли. СННК обучен на выборке из 3156 изображений с категориями дефектов: «царапина», «вмятина», «ржавчина», «продольная риска», «кольцевая риска», каждая категория представлена набором из 526 изображений. Объем тестовой выборки составляет 300 изображений.

Результаты обучения и тестирования ННК приведены на рис. 14. В проведенных экспериментах построенные нейро-нечеткие системы классификации, в сравнении с аналогичными системами на основе ИНС, позволили добиться повышения точности классификации до 11.2 %.

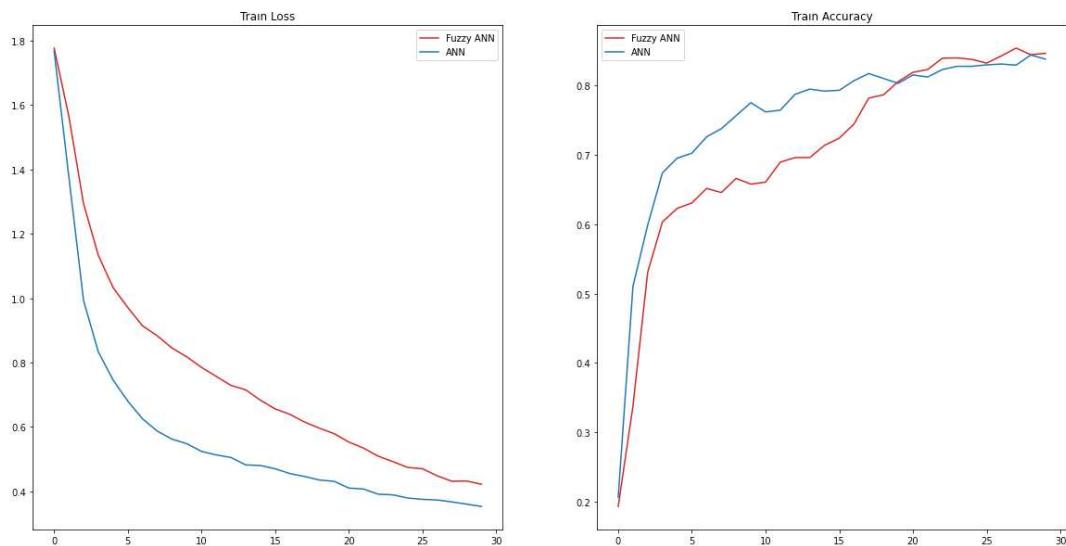


Рис. 14. Изменение точности и ошибки СННК и СНС при обучении в задаче классификации дефектов внутренней поверхности труб

Fig. 14. Change in the accuracy and error of convolutional neuro-fuzzy classifier and convolutional neural network during training in the problem of classifying defects on the inner surface of pipes

Библиографический список

1. **Ломакина, Л.С.** Нейро-нечеткие классификаторы. Теория и практика: монография / Л.С. Ломакина, С.А. Манцеров, И.Д. Чернобаев. – Воронеж: Научная книга, 2022. – 137 с.
2. **Lu, Y.** A universal approximation theorem of deep neural networks for expressing probability distributions / Y. Lu, J. Lu // Advances in neural information processing systems. – 2020. – Vol. 33. – Pp. 3094-3105.
3. **Ломакина, Л.С.** Проблема ускорения вычислений в прикладных задачах диагностирования объектов различной физической природы / Л.С. Ломакина, И.Д. Чернобаев, А.Н. Двиговская [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2025. – № 7. – С. 123-130.
4. **Заде, Л.А.** Размытые множества и их применение в распознавании образов и кластер-анализе // Классификация и кластер / Л.А. Заде. – М.: Мир, 1980. – С. 208-247.
5. **Mendel, J.** Introduction to type-2 fuzzy logic control: theory and applications / J. Mendel, H. Hagras, W. Tan [et al.]. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2014. – 357 p.
6. **Kumbasar, T.** A simple design method for interval type-2 fuzzy PID controllers / T. Kumbasar // Soft Computing. – 2014. – Vol. 18, № 7. – Pp. 1293-1304.
7. **Ломакина, Л.С.** Нейро-нечеткие классификаторы / Л.С. Ломакина, И.Д. Чернобаев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2021. – Т. 9, № 4. – URL: <https://moitvivt.ru/ru/journal/pdf?id=1092> (дата обращения: 11.09.2025). – DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.027.
8. **Naa, S.** Effect of different defuzzification methods in a fuzzy based load balancing application / S. Naaz, A. Alam, R. Biswas // International Journal of Computer Science Issues (IJCSI). – 2011. – Vol. 8, № 5. – Pp. 261-267.
9. **Ломакина, Л.С.** Алгоритмическое обеспечение нейро-нечеткой классификации объектов сложной структуры / Л.С. Ломакина, И.Д. Чернобаев, Ю.Н. Киселев // Труды Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2021» («IS&IT'21»). – Дивноморское, 2021. – № 6. – С. 475-481.

References

1. Lomakina L.S., Mantserov S.A. and Chernobaev I.D. *Neuro-nechetkie klassifikatory. Teoriia i praktika* [Neuro-Fuzzy Classifiers. Theory and Practice]. Voronezh: Nauchnaia kniga, 2022.
2. Lu Y. and Lu J.. 2020. “A Universal Approximation Theorem of Deep Neural Networks for Expressing Probability Distributions” *Advances in Neural Information Processing Systems* 33: 3094-3105.

3. Lomakina L.S., Chernobaev I.D., Dvitovskaya A.N. [et al.]. 2025. “Problema uskoreniiia vychislenii v prikladnykh zadachakh diagnostirovaniia ob'ektov razlichnoi fizicheskoi prirody” [The Problem of Accelerating Computations in Applied Problems of Diagnosing Objects of Various Physical Nature]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik Povolzh'ya* [Scientific and Technical Journal of the Volga Region], no. 7: 123-130.
4. Zadeh L.A. 1980. Razmytye mnozhestva i ikh primenenie v raspoznavanii obrazov i klasternom analize [Fuzzy Sets and Their Application in Pattern Recognition and Cluster Analysis]. In *Klassifikatsiia i klaster* [Classification and Cluster], 208-247. Moscow: Mir.
5. Mendel Jerry, Hani Hagras and Woei-Wan Tan. 2014. Introduction to Type-2 Fuzzy Logic Control: Theory and Applications. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
6. umbasar, T. 2014. “A Simple Design Method for Interval Type-2 Fuzzy PID Controllers”. *Soft Computing* 18 (7): 1293-1304. <https://doi.org/10.1007/s00500-013-1>
7. Lomakina L.S. and Chernobaev I.D. 2021. “Neuro-nechetkie klassifikatory” [Neuro-Fuzzy Classifiers]. *Modelirovanie, optimizatsiia i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, Optimization and Information Technology] 9, no. 4. <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.35.4.027>.
8. Naaz S., Alam A. and Biswas R. 2011. “Effect of Different Defuzzification Methods in a Fuzzy Based Load Balancing Application”. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)* 8 (5): 261-267.
9. Lomakina L.S., Chernobaev I.D. and Kiselev Y.N. 2021. “Algoritmicheskoe obespechenie neyro-nechetkoi klassifikatsii ob'ektov slozhnoi struktury” [Algorithmic Support for Neuro-Fuzzy Classification of Complex Structure Objects]. In *Trudy Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo kongressa “Intellektual'nye sistemy i informatsionnye tekhnologii – 2021” (“IS&IT'21”)* [Proceedings of the International Scientific and Technical Congress “Intelligent Systems and Information Technologies – 2021” (“IS&IT'21”)], 6:475-481. Divnomorskoe.

*Дата поступления
в редакцию: 17.07.2025*

*Дата принятия
к публикации: 10.11.2025*

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.039.4

DOI 10.46960/1816-210X_2025_4_42
EDN JUGNJK

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КСЕНОНОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА АКТИВНУЮ ЗОНУ ПРИ МАНЕВРЕННЫХ РЕЖИМАХ АЭС

Г.В. АркадовORCID: 0009-0005-4464-9973 e-mail: arkgen47@gmail.comНекоммерческое партнерство содействию развитию системной инженерии «Райз»
Москва, Россия**Д.С. Колотушкин**ORCID: 0009-0004-2383-4056 e-mail: kolotushkins@nvnpp1.rosenergoatom.ruРоссийский государственный концерн по производству электрической
и тепловой энергии на атомных станциях (концерн «Роэнергоатом»)
Нововоронежская АЭС им. В.А. Сидоренко
Нововоронеж, Россия**М.Т. Слепов**ORCID: 0000-0001-5563-0526 e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ruРоссийский государственный концерн по производству электрической
и тепловой энергии на атомных станциях (концерн «Роэнергоатом»)
Нововоронежская АЭС им. В.А. Сидоренко
Нововоронеж, Россия

Предлагается новый метод управления мощностью ядерного реактора типа ВВЭР: изменение мощности ядерного реактора осуществляется путем управления нисходящей и восходящей фазами естественных ксеноновых колебаний с минимальным воздействием на реактивность путем, по меньшей мере, однократного перемещения органов регулирования системы управления и защиты и/или посредством минимального борного регулирования с достижением интегральных значений мощности реактора за ночной и дневной периоды регулирования. В результате повышаются безопасность эксплуатации реакторной установки и надежность оборудования, улучшаются ресурсные характеристики оборудования реакторной установки при циклических изменениях суточной нагрузки за счет минимизации термомеханических нагрузок, исчерпывающих ресурс оборудования, участвующего в процессе регулирования. Помимо этого, уменьшается объем водообмена, а также исключаются ошибки оператора за счет упрощения алгоритма автоуправления реактором со стороны второго контура.

Ключевые слова: маневренные режимы; ксеноновые колебания; реактивность; управляющие воздействия; суточная нагрузка; активная зона; ресурсные характеристики; борное регулирование; оффсет.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Аркадов, Г.В. Использование ксеноновых колебаний для минимизации управляющих воздействий на активную зону при маневренных режимах АЭС / Г.В. Аркадов, Д.С. Колотушкин, М.Т. Слепов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 42-56. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_42 EDN: JUGNJK

XENON OSCILLATIONS USAGE TO MINIMIZE CONTROL ACTIONS ON THE CORE IN LOAD-FOLLOWING MODES OF NUCLEAR POWER PLANTS

G.V. Arkadov

ORCID: 0009-0005-4464-9973 e-mail: arkgen47@gmail.com

Non-Profit Partnership for the Promotion of System Engineering «Rise»
Moscow, Russia

D.S. Kolotushkin

ORCID: 0009-0004-2383-4056 e-mail: kolotushkinds@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Rosenergoatom Joint-Stock Company

Novovoronezh Nuclear Power Plant n.a. V.A. Sidorenko
Novovoronezh, Russia

M.T. Slepov

ORCID: 0000-0001-5563-0526 e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Rosenergoatom Joint-Stock Company

Novovoronezh Nuclear Power Plant n.a. V.A. Sidorenko
Novovoronezh, Russia

Abstract. The article proposes a new method for controlling the power of a WWER-type nuclear reactor. The change in the power of the nuclear reactor is carried out by controlling the descending and ascending phases of natural xenon oscillations with a minimum impact on reactivity by at least one movement of the control elements of the control and protection system and/or by minimum boron regulation with the achievement of integral values of the reactor power for the night and day regulation periods. As a result, the operational safety of the reactor plant and the reliability of the equipment are increased, and the service life characteristics of the reactor plant equipment are improved during cyclic changes in the daily load by minimizing thermomechanical loads that exhaust the service life of the equipment involved in the regulation process. In addition, the volume of water exchange is reduced, and operator errors are eliminated by simplifying the automatic reactor control algorithm from the second circuit side.

Key words: load-following mode; xenon oscillations; reactivity; control actions; daily load; reactor core; resource characteristics; boron regulation; offset.

FOR CITATION: G.V. Arkadov, D.S. Kolotushkin, and M.T. Slepov. Xenon oscillations usage to minimize control actions on the core in load-following modes of nuclear power plants. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 42-56. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_42 EDN: JUGNJK

Введение

Заложенные в проект ВВЭР-1200, ВВЭР-1000 алгоритмы авторегулирования турбины и реактора нацелены на базовый стационарный режим, при котором турбина определяет, как должна измениться мощность реактора, чтобы выходная электрическая мощность турбины оставалась постоянной [1]. При маневренных режимах алгоритм авторегулирования усложняется, что приводит к значительной интенсификации управляющих реактивностных воздействий (УРВ).

Известен способ управления ядерной энергетической установкой с реактором водяного типа при изменении мощности реактора или внешней нагрузки, предусматривающий поддержание аксиального оффсета в активной зоне реактора. При уменьшении мощности реактора одновременно осуществляют введение борной кислоты в теплоноситель первого контура и рабочей группы органов регулирования системы управления и защиты в активную зону реактора по пропорциональному закону регулирования, а также повышение

шают давление пара в главном паровом коллекторе и парогенераторах до величины, обеспечивающей постоянную температуру теплоносителя на входе в реактор, а при достижении заданного промежуточного уровня мощности реактора подачу борной кислоты прекращают и при достижении заданного уровня мощности подают в первый контур чистый дистиллят, а после прохождения максимума «йодной ямы» (максимальной концентрации короткоживущего изотопа ксенона ^{135}Xe , образующегося в результате радиоактивного распада изотопа иода ^{135}I) для стабилизации мощности реактора на заданном уровне вводят борную кислоту, а для увеличения мощности реактора до нового стационарного уровня осуществляют одновременно введение чистого дистиллята в теплоноситель первого контура, выведение рабочей группы органов регулирования системы управления и защиты из активной зоны реактора по пропорциональному закону регулирования, а также понижают давление пара в главном паровом коллекторе и парогенераторах до величины, обеспечивающей постоянную температуру теплоносителя на входе в реактор.

Указанные способы управления мощностью ядерного реактора связаны с подавлением возникающих ксеноновых колебаний [2-5]. Главным недостатком используемых в настоящее время методов маневренных режимов является увеличение объемов водообмена и/или интенсивные акты перемещения органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ), а также большая неравномерность поля энерговыделения активной зоны, что уменьшает глубину выгорания топлива при реализации маневренных режимов. Используемые алгоритмы управления мощностью ядерного реактора не исчерпывают всех проблем, связанных с работой энергоблока АЭС в суточном графике нагрузки. В частности, требуется обоснование работоспособности топлива, а также парогенераторов, турбины и другого оборудования [6].

В настоящее время при маневренных режимах осуществляют процесс перехода на ночной режим (с временным понижением мощности РУ и дальнейшим повышением до номинальных значений) очень высокоскоростным переходным процессом, который в дальнейшем определяет негативные стороны маневрирования мощности. Такое быстрое и значительное по амплитуде изменение мощности реакторной установки (РУ) вызывает также мощные аксиальные ксеноновые колебания в нисходящей фазе (то есть направленные на уменьшение мощности РУ). Таким образом, второй этап маневренного режима (удержание постоянной пониженной мощности в течение шести ночных часов) начинается и в дальнейшем сопровождается мощными ксеноновыми колебаниями (КК). Три группы ОР СУЗ, находящиеся на своих минимальных прогнозных положениях, вызывают большую неравномерность поля энерговыделения активной зоны, что уменьшает глубину выгорания топлива. Это подтверждается минимальным значением аксиального оффсета за пределами рекомендуемой области, то есть минимальная мощность в ночной период вырабатывается главным образом нижней половиной активной зоны. Сразу после достижения минимальной мощности управляющая группа ОР СУЗ направляется в обратную сторону (вверх), совершая большое число шагов и внося положительную реактивность, компенсируя тем самым нисходящий тренд КК. Удержание мощности с высокой точностью – второй негативный фактор данного маневренного режима. Здесь возможен водообмен, дополнительный реактивностный фактор, если авторегулирование со стороны турбогенератора путем удержания давления пара в главном паровом коллекторе на постоянном уровне достигает своих допустимых границ. Увеличение объема водообмена по сравнению с базовым стационарным режимом функционирования реакторной установки – еще один негативный фактор при реализации данного маневренного режима [7].

Активная зона находится в непрерывном нестационарном состоянии, что ускоренно исчерпывает ресурс тепловыделяющих элементов, ОР СУЗ, системы группового и индивидуального управления и всех других органов управления реактивностью. В этот период авторегулирование производится относительно частыми актами. При нестационарном энерговыделении изменяются локальные тепло-гидравлические характеристики участков активной зоны, приводящие к изменению поканальных расходов теплоносителя и расходов поперечных пере-

течек теплоносителя. Соответственно, при реализации данного маневренного режима появляется неопределенность теплосъема или неопределенность энергонапряженности тепловыделяющих сборок. Таким образом, осуществляется довольно сложный маневренный режим, в котором задействованы все УРВ, а движения ОР СУЗ вверх и вниз направлены не только на изменение мощности, но и на ее удержание на постоянном уровне в результате подавления КК.

Природа ксеноновых колебаний

Ксеноновые колебания представляют собой низкочастотные колебания, которые вызваны, как известно, различными процессами (изменением положения регулирующей группы ОР СУЗ, изменением мощности реактора). Точное значение периода ксеноновых колебаний, а также их амплитуда зависят от многих факторов, но главным образом от параметров загрузки активной зоны ядерного реактора и отработанных эффективных суток, что с достаточной степенью точности вычисляется существующими и известными программными средствами (источники [2, 8, 9]).

В свою очередь, характеристики ксеноновых колебаний зависят от способа реактивностного воздействия на активную зону. Свободные ксеноновые колебания, возникающие после однократного изменения мощности реакторной установки, могут иметь устойчивый характер, если их амплитуда спадает во времени и, наоборот, могут иметь неустойчивый характер, если их амплитуда не совпадает во времени [10].

Изменение мощности ядерного реактора в результате возникновения ксеноновых колебаний удовлетворительно описывается формулой:

$$N(t) = N_1 e^{-\alpha t} \cos\left(\frac{2\pi}{T_{Xe}} t\right) + N_0, \quad (1)$$

где:

N – мощность реакторной установки, (N_0, N_1) – соответственно начальная мощность и конечная мощность при изменении режима работы;

α – индекс стабильности уменьшения амплитуды свободных ксеноновых колебаний (данный параметр определяет уменьшение амплитуды ксеноновых колебаний во времени);

t – время;

T_{Xe} – период ксеноновых колебаний;

$\alpha = \frac{1}{\tau_{Xe}}$, где τ_{Xe} – постоянная времени затухания (время, за которое, амплитуда ксеноновых колебаний уменьшится в «е» раз).

τ_{Xe} изменяется в довольно широких пределах: 20-60 часов. Частота колебаний $\omega = \frac{2\pi}{T_{Xe}}$, $T_{Xe} = (27-30)$ часов.

Новый способ реализации маневренных режимов

Жесткие требования к параметрам маневренного режима задаются потребителем сгенерированной АЭС мощности, т.е. Энергетической Системой (ЭС). Потребители электроэнергии не одномоментно прекращают ее потреблять, переходя от дневного к ночному режиму (рис. 1) [1111]. Это время – случайная величина, меняющаяся от одних суток к другим, от одного региона к другому. Поэтому быстрый, в течение 15 мин переход от мощности 95 % к мощности 55 % – требование завышенное. По этой же причине длительность ночного периода не равна в точности шести часам и может быть увеличена до 7-8 час (до четверти периода КК). Форма кривой суточного потребления не имеет резких перепадов и может быть аппроксимирована синусоидой с суточным периодом [11]. Поддержание с высокой точностью значения мощности РУ в ночном режиме (до 1 %) – также завышенное требование. Потребление имеет свой, куда больший естественный, разброс по мощности и значительно отличается в разных регионах. Следовательно, трудности исполнения функции ЭС по удержанию баланса между

многими генерирующими станциями (ТЭС, АЭС) и множеством потребителей сгенерированных мощностей перекладываются на АЭС.

Проблема суточного маневрирования состоит еще и в том, что цикличность достигается тем, что начало каждого цикла – одно и то же время суток, восемь часов – характеризуется одним и тем же состоянием всех органов регулирования реактивностью. При этом активная зона представляет собой весьма динамический объект с быстрыми и медленными за кампанию трендами, которые зависят от многих факторов, в частности, от того, сколько наработано эффективных суток, насколько выгорело топливо и выгорающие поглотители, с какой скоростью исчерпывается запас реактивности и т.д. [12, 13]. Быстрые во времени и с большой амплитудой изменения генерируемой мощности могут вызвать нежелательные переходные процессы в самой энергетической системе. Предложенный способ меняет основной принцип реализации маневренного режима и направлен на максимизацию работы реакторной установки с использованием ксеноновых колебаний путем управления нисходящей и восходящей фазами ксеноновых колебаний (исключая подавление или минимальное подавление ксеноновых колебаний).

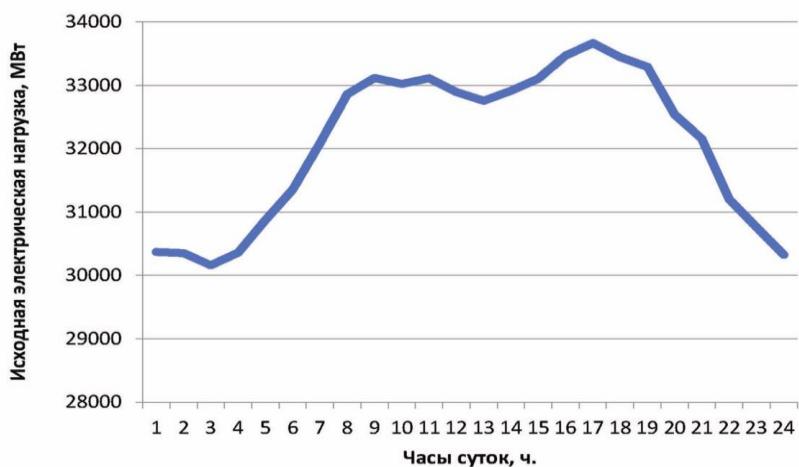


Рис. 1. Суточный график электрических нагрузок по ОЭС Урала (по состоянию на 01.02.2020)

Fig. 1. Daily load schedule in the Ural Unified Energy System (as of 01.02.2020)

При реализации предложенного способа управления мощностью ядерного реактора типа ВВЭР изменение мощности осуществляют путем управления нисходящей и восходящей фазами естественных ксеноновых колебаний. При этом управление осуществляют путем минимального (незначительного, однократного или немного более одного раза) перемещения органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) или путем осуществления минимального (незначительного) борного регулирования (уменьшения или увеличения подачи концентрации борной кислоты), или одновременно путем минимального перемещения ОР СУЗ и путем осуществления минимального борного регулирования с достижением интегральных значений мощности реактора за ночной и дневной периоды регулирования. Т.н. первичные управляющие реактивностные воздействия (УРВ1 – соответствуют периоду перед переходом на ночной режим работы реакторной установки) осуществляют или однократно, или минимальное число раз для достижения требуемой нисходящей фазы ксеноновых колебаний. Введение отрицательной реактивности за счет увеличения концентрации ксенона происходит естественным образом, что позволяет минимизировать перемещение органов СУЗ, а также минимизировать осуществление борного регулирования (рис. 2). Далее, так называемые вторичные управляющие реактивностные воздействия (УРВ2 – соответствуют периоду перед переходом на дневной режим работы реакторной установки) осуществляют или однократно, или минимальное число раз для достижения требуемой восходящей фазы ксеноновых колебаний.

Введение положительной реактивности за счет уменьшения концентрации ксенона происходит естественным образом, что также позволяет минимизировать перемещение органов СУЗ, а также минимизировать осуществление борного регулирования. Далее, т.н. последующие управляющие реактивностные воздействия (УРВ3 – соответствуют периоду перед поддержанием дневного режима работы реакторной установки) осуществляют или однократно, или минимальное число раз для достижения требуемой восходящей фазы ксеноновых колебаний. Для этого на первом этапе осуществляют подготовку управляющих реактивностных воздействий (УРВ1) для реализации требуемой нисходящей фазы ксеноновых колебаний. Подготовку осуществляют путем первичной настройки положения ОР СУЗ и/или путем определения количества концентрации борной кислоты, которую необходимо повысить для подачи в первый контур, которые обеспечивают требуемую нисходящую фазу ксеноновых колебаний, обеспечивающую снижение мощности реакторной установки при работе в ночной период.

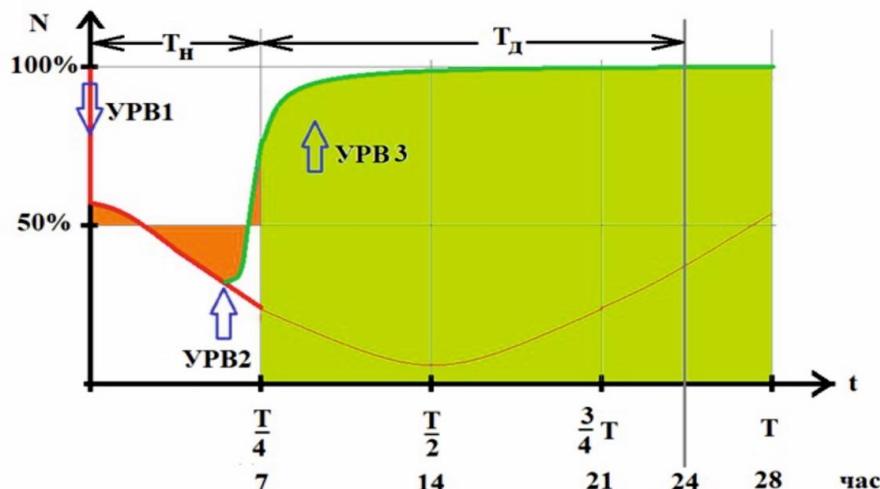


Рис. 2. Вариант изменения мощности РУ с использованием ксеноновых колебаний

Fig. 2. Variant of changing the reactor power using xenon oscillations

Далее реализуют требуемую фазу нисходящих ксеноновых колебаний путем управляющих реактивностных воздействий (УРВ1), т.е. осуществляют минимальное (незначительное) однократное, либо немного более одного раза перемещение ОР СУЗ, либо осуществляют минимальное (незначительное) повышение подачи концентрации борной кислоты, либо одновременно осуществляют и минимальное перемещение ОР СУЗ и минимальное повышение подачи концентрации борной кислоты. После реализации требуемой нисходящей фазы ксеноновых колебаний идет работа реакторной установки в ночной период на монотонной фазе ксеноновых колебаний без управляющих реактивностных воздействий.

Далее для последующей регулировки мощности реакторной установки (до начала дневного периода работы реакторной установки) осуществляют подготовку управляющих реактивностных воздействий (УРВ2) для реализации требуемой восходящей фазы ксеноновых колебаний путем настройки положения ОР СУЗ и/или путем определения количества концентрации борной кислоты, которую необходимо понизить для подачи в первый контур, которые обеспечивают требуемую восходящую фазу ксеноновых колебаний, обеспечивающую повышение мощности реакторной установки при работе в дневной период.

Далее реализуют требуемую фазу восходящих ксеноновых колебаний путем управляющих реактивностных воздействий (УРВ2), т.е. осуществляют минимальное (незначительное) однократное, либо немного более одного раза перемещение ОР СУЗ, либо осуществляют ми-

нимальное (незначительное) снижение подачи концентрации борной кислоты, либо одновременно осуществляют и минимальное перемещение ОР СУЗ и минимальное снижение подачи концентрации борной кислоты.

Далее для стабилизации восходящей фазы ксеноновых колебаний, обеспечивающей стабильную работу реакторной установки в дневной период с требуемой мощностью реакторной установки, осуществляют подготовку управляющих реактивностных воздействий (УРВ3) для реализации стабильности восходящей фазы ксеноновых колебаний путем настройки положения ОР СУЗ и/или путем определения количества концентрации борной кислоты, которую необходимо понизить для подачи в первый контур, которые обеспечивают стабильность восходящей фазы ксеноновых колебаний, обеспечивающей стабильную мощность работы реакторной установки при работе до окончания дневного режима.

Далее реализуют стабильность восходящей фазы ксеноновых колебаний путем управляющих реактивностных воздействий (УРВ3), т.е. осуществляют минимальное (незначительное) однократное, либо немного более одного раза перемещение ОР СУЗ, либо осуществляют минимальное (незначительное) снижение подачи концентрации борной кислоты, либо одновременно осуществляют и минимальное перемещение ОР СУЗ и минимальное снижение подачи концентрации борной кислоты с достижением стабильности восходящей фазы ксеноновых колебаний.

По окончании дневного периода работы реакторной установки и перед началом ночных периодов работы реакторной установки возвращаются к реализации первого этапа. Нисходящая фаза ксеноновых колебаний, если ее отсчитывать сразу после окончания переходного процесса (95-55 %), составляет четверть периода свободных ксеноновых колебаний, то есть примерно семь часов, что близко к длительности ночных периодов на пониженной мощности реакторной установки. Возбуждение нисходящей фазы ксеноновых колебаний реализует переход в ночной режим (95-55 %) работы реакторной установки [14]. При этом ночной режим работы реакторной установки реализуется исключительно на свободных ксеноновых колебаниях. По истечении четверти периода свободных ксеноновых колебаний минимальным воздействием ОР СУЗ и/или терморегулированием достигают необходимой фазы ксеноновых колебаний, которая увеличивает мощность реакторной установки, т.е. переходят в дневной режим работы реакторной установки. Таким образом добиваются естественного авторегулирования за счет ксеноновых колебаний и число актов управляющих реактивностных воздействий значительно снижают.

Если требования к кривой изменения мощности выразить не в мгновенных значениях, а в усредненных, то интенсивность управляющих реактивностных воздействий снизится:

$$\frac{1}{T_h} \int_0^{T_h} N(t) dt = 55\% \quad (2)$$

$$\frac{1}{T_d} \int_{T_h}^{T_d} N(t) dt = 95\% \quad (3)$$

где T_h – ночной период работы реакторной установки; T_d – дневной период работы реакторной установки.

Экономические расчеты за генерирование мощности проводятся в средних, а не мгновенных единицах. Средняя сгенерированная мощность за ночной период будет в точности такой же, как и в соответствии с требованиями по мгновенной мощности.

Итак, допускается, что ночной период длиною $T_h = \frac{T_{xe}}{4}$ совпадает с четвертью периода свободных ксеноновых колебаний. Они вызываются переходным процессом 95-45 % (УРВ1), в котором параметры $(N_0, N_1, \tau_{xe}, T_{xe})$ таковы, что выполняется условие (02) при том, что до

момента времени $\frac{T_{xe}}{4}$ будет произведено УРВ2, которое подготовит выполнение интегрального условия (03). Далее возможно УРВ3, которое стабилизирует восходящую фазу ксеноновых колебаний.

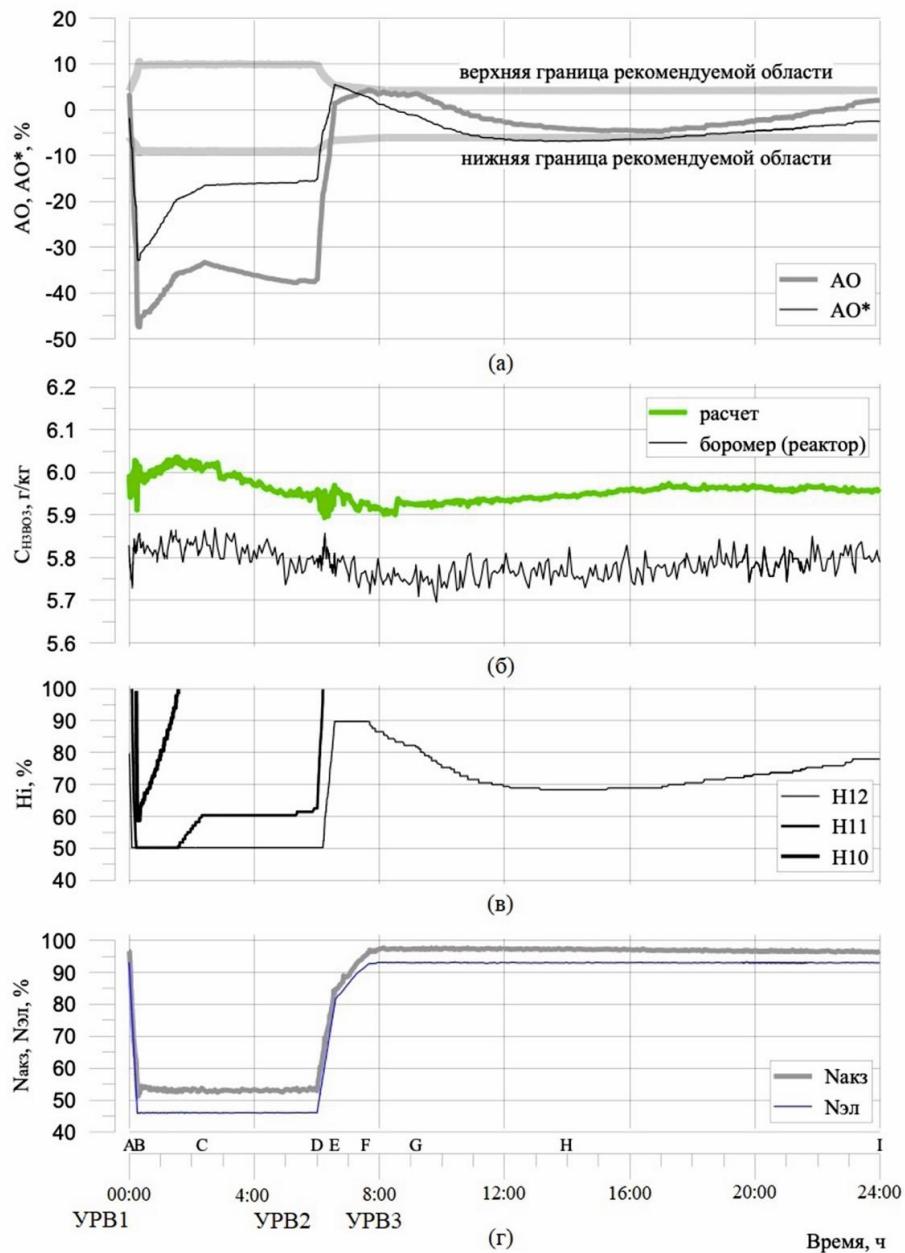


Рис. 3. Пример маневренного режима на блоке ВВЭР-1200 (Нововоронежская АЭС) на маневренные режимы, проведенного в 2022 г.

Fig. 3. An example of a load-following mode at a WWER-1200 (Novovoronezh NPP) carried out in 2022

Далее приведен пример испытания блока реакторной установки на маневренные режимы, проведенного в 2022 г. (Нововоронежская АЭС). Испытания проводились как путем воздействия на блоки стержней 10-й (H10), 11-й (H11) и 12-й (H12) групп стержней (рис. 3 (в)), а также путем управления подачи концентрации борной кислоты $C_{\text{НВОЗ}}$ (повышение концентрации или понижение концентрации борной кислоты, рис. 3 (б)). Причем испытания прово-

дились как при отдельном регулировании положения стержней, так и отдельным регулированием концентрации борной кислоты, так и одновременным воздействие на группы стержней и управлением концентрацией борной кислоты.

Из графика (а) рис. 3 видно изменений аксиального офсета во времени (с начала ночных периода и до окончания дневного периода), а из графика (г) рис. 3 видно изменение мощности реактора (с начала ночных периода и до окончания дневного периода) при управлении ксеноновыми колебаниями воздействием на ОР СУЗ и борным регулированием.

На графиках а-г рис. 3 применяются следующие обозначения:

- АО – аксиальный офсет распределения энерговыделения, %
- АО* – равновесный аксиальный офсет распределения энерговыделения, %;
- Снвз – концентрация борной кислоты;
- H_i – положение группы ОР СУЗ с номером « i », % от высоты активной зоны;
- $N_{акз}$ – мощность энерговыделения активной зоны, % $N_{ном}(p)$
- $N_{эл}$ – электрическая мощность энергоблока, % $N_{ном}(э)$
- $(N_{ном}(p))$ – номинальная мощность реактора, 3200 МВт, $N_{ном}(э)$ – номинальная электрическая мощность реактора, 1200 МВт.

Подготовку перехода на ночной режим работы реакторной установки осуществляют, преимущественно, в 23:00 (однако могут начинать подготовку и в другое удобное и расчетное время). Переход на ночной режим работы осуществляют ближе к 00:00 (применяют УРВ1). Для этого сначала резко опустили блоки стержней 10-й группы (Н10), 11-й группы (Н11) и 12-й группы (Н12), а затем подняли до самого верха блок стержней 10-й группы (Н10). Концентрация ксенона возросла и мощность реакторной установки снизилась, при этом работа реакторной установки происходит на свободных ксеноновых колебаниях. В период, примерно, с 1:00 до 2:00 немного приподняли блок стержней 11-й группы (Н11), сохранив необходимую концентрацию ксенона для работы реакторной установки в требуемой мощности, соответствующей ночному периоду работы. При необходимости повышали концентрацию борной кислоты, подаваемой в первый контур. По окончании ночного периода, примерно с 6:00 до 7:00 резко подняли до самого верха блок стержней 11-й группы (Н11) и приподняли блок стержней 12-й группы (Н12) (применяют УРВ2).

При этом при необходимости можно понижать концентрацию борной кислоты для подачи в первый контур. Таким образом, добившись снижения концентрации ксенона, осуществляют управление восходящей фазой ксеноновых колебаний, переходя на дневной режим работы реакторной установки. Далее, в оставшийся период (примерно с 7:00 до 24:00) осуществляют незначительное перемещение блока стержней 12-й группы (Н12) для стабилизации восходящей фазы ксеноновых колебаний и сохранения мощности работы реакторной установки в оставшийся дневной период до перехода на ночной режим работы (применяют УРВ3). При этом, при необходимости осуществляли незначительное повышение концентрации борной кислоты для подачи в первый контур.

Кроме того, при проведении испытаний осуществляли комбинации управления нисходящей и восходящей фазами ксеноновых колебаний, в частности, вместо перемещения соответствующих блоков стержней соответствующих групп стержней при переходе на ночной режим работы осуществляли сначала незначительное повышение концентрации борной кислоты для подачи в первый контур (с достижением требуемой нисходящей фазы ксеноновых колебаний), затем плавное понижение концентрации борной кислоты (с достижением сохранения требуемой нисходящей фазы ксеноновых колебаний), а после перехода на дневной режим работы (при распаде ксенона) осуществляли незначительное повышение концентрации борной кислоты для сохранения и стабилизации восходящей фазы ксеноновых колебаний. В данном случае при необходимости осуществляли также незначительное перемещение блоков стержней определенных групп стержней, добиваясь соответствующей нисходящей и восходящей фаз ксеноновых колебаний.

Таким образом, благодаря реализации предложенного способа с использованием нисходящей и восходящей фазы ксеноновых колебаний для управления мощностью ядерного реактора увеличивается эффективность и экономичность работы ядерной энергетической установки за счет эффективности использования топлива и увеличения ресурса органов СУЗ при циклических изменениях суточной нагрузки. Управление ксеноновыми колебаниями реализует совершенно новый принцип управления мощностью ядерного реактора, который позволяет саморегулирования мощностью реакторной установки, минимизировать управляющие реактивностные воздействия (термомеханические нагрузки), способные быстро исчерпать ресурс ОР СУЗ, тепловыделяющих элементов, тепловыделяющих сборок, а также другого оборудования, участвующего в процессе регулирования мощности реакторной установки. Регулирование мощности ядерного реактора путем управления ксеноновыми колебаниями позволяет снизить постоянные управляющие реактивностные воздействия, в частности, снизить перемещение органов регулирования системы управления и защиты, уменьшить объем водообмена борной кислотой и чистым дистиллятом, а также упростить алгоритм автоуправления реактором со стороны второго контура, что существенно уменьшает вероятность ошибки оператора. Кроме того, минимальное воздействие органами управления для регулирования мощности с использованием ксеноновых колебаний в требуемой фазе позволяет повысить безопасность эксплуатации реакторной установки, повысить надежность работы всего оборудования, а также увеличить ресурсные характеристики оборудования реакторной установки при циклических изменениях суточной нагрузки за счет того, что экономятся ресурсы, минимизируются термомеханические нагрузки и увеличивается срок службы оборудования, участвующего в процессе регулирования мощностью ядерного реактора.

Кроме того, регулирование мощности ядерного реактора путем использования ксеноновых колебаний позволяет реализовать достаточно «мягкий» характер переходных процессов ввиду использования естественных свойств саморегулирования, поскольку при регулировании достигаются не «мгновенные» значения мощности реактора, а его интегральные значения за ночной и дневной периоды регулирования [15].

Моделирование предложенного подхода

Расчетное моделирование для проверки предложенного способа реализации маневренных режимов выполнялось в отделе ядерной безопасности и надежности (ОЯБиН) Нововоронежской с помощью ПС «Имитатор реактора» (далее – ИР). ИР предназначен для проведения расчетов в проектных и исследовательских работах по усовершенствованию алгоритмов управления реактором, а также для работы в составе СВРК на действующих АЭС в качестве программного средства информационной поддержки оператора.

В качестве исходных данных, была использована 7-я топливная загрузка энергоблока №1 Нововоронежской АЭС-2. На энергоблоке эксплуатируются стационарные топливные циклы длительностью до 18 месяцев. Для расчетного моделирования использовались данные нейтронно-физических характеристик активной зоны на момент кампании ~16 эффективных суток. Энергоблок находился в стационарном состоянии на уровне мощности ~ 100.5 %, положение 12-ой группы (Н12) – 94.6 %, концентрация борной кислоты $C_{бор}=7.26 \text{ г/дм}^3$. Для создания исходного состояния перед маневрированием мощностью, было смоделировано снижение тепловой мощности до 95 % $N_{ном}$ со скоростью 0.1 %/мин (рис. 4, график б, точка 1). Снижение мощности выполнялось увеличением концентрации борной кислоты в теплоноситель первого контура, после чего положение рабочей группы составило Н12=94.6 %, а концентрация борной кислоты $C_{бор}=7.35 \text{ г/дм}^3$. Далее выполнялась выдержка времени ~12 часов для достижения стационарного состояния работы реактора, при этом поддержание мощности и компенсация ксеноновых эффектов выполнялись водообменом (рис. 4, график б, точка 2).

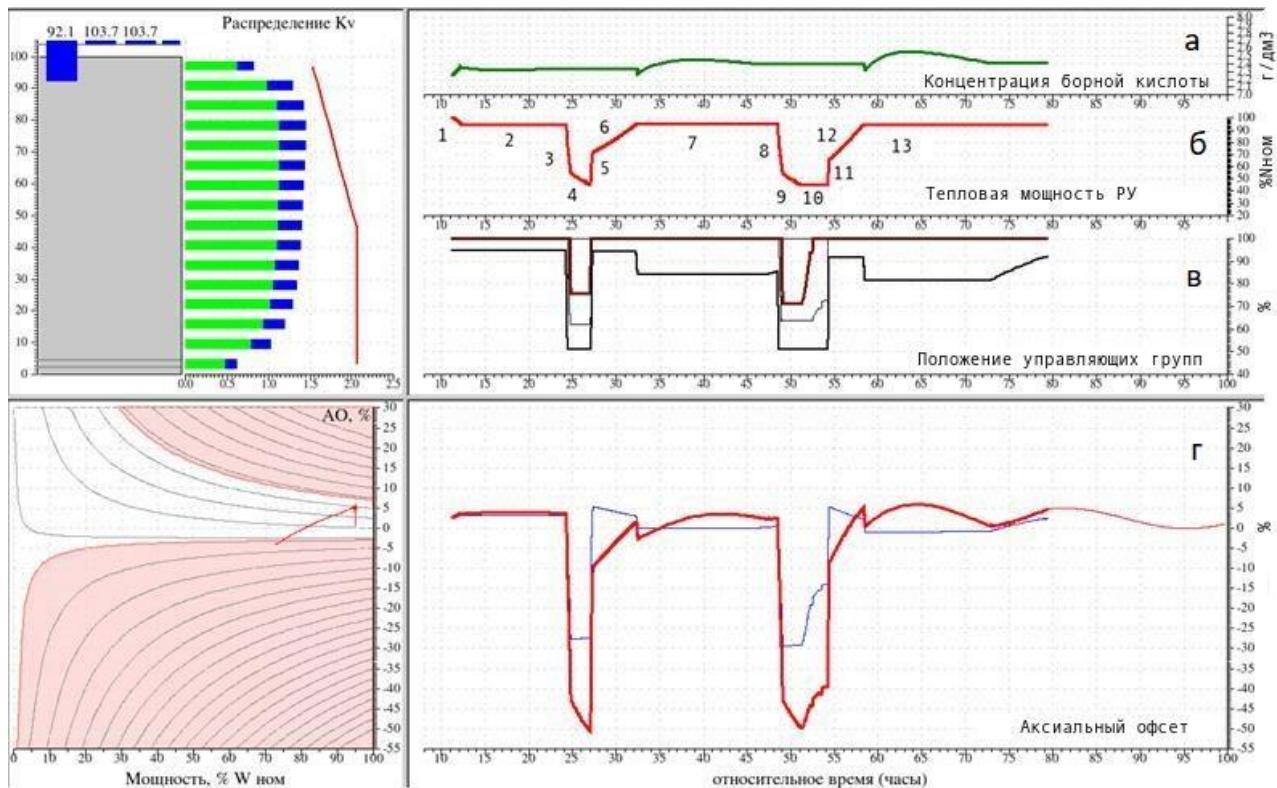


Рис. 4. Графики изменения состояния ВВЭР-1200 при моделировании маневренных режимов перехода с уровня мощности 95-45-95 %Nном
 а – концентрация борной кислоты; б – тепловая мощность;
 в – положение управляющих групп; г – аксиальный оффсет

Fig. 4. Changes in the state of WWER-1200 during simulation of load-following modes of transition from a power level of 95-45-95 %Nrated:

a) – boric acid concentration; б) – thermal power; в) – position of the control groups; г) – axial offset

В рамках минимизации управляющих воздействия, путем изменения положения управляющих групп до $H12=51.1\%$, $H11=62.2\%$, $H10=75.7\%$ была снижена тепловая мощность РУ до 55 % $N_{\text{ном}}$ со скоростью 2 %/мин. (рис. 4, график б, точка 3). В течение 140 мин тепловая мощность РУ снизилась до значения 45 % $N_{\text{ном}}$ на отравлении ксеноном (рис. 4, график б, точка 4). После достижения заданной мощности, поочередным извлечением управляющих групп с номерами № 10, 11 и 12 тепловая мощность РУ была увеличена до уровня 72.1 % $N_{\text{ном}}$ (рис. 4, график б, этап 5). Положения управляющих групп составили: $H12=94.1\%$, $H11$ -на верхних конечных выключателях (ВКВ), $H10$ на ВКВ. Далее, в течение 5 часов, за счет разотравления активной зоны, мощность РУ увеличивается до 95 % $N_{\text{ном}}$ (рис. 4, график б, этап 6). Для подавления ксеноновых колебаний и ограничения тепловой мощности, в период «дневной работы» энергоблока, рабочая группа была погружена до значения $H12=84.1\%$ (рис. 4, график б, точка 7) и выполнена коррекция концентрации борной кислоты в теплоносителе 1 контуре не величину $\sim 0.1-0.15$ г/дм³ (рис. 4, график а, точка 8).

Для определения возможности описанной выше работы в циклическом, ежедневном режиме был выполнен расчет второго суточного цикла маневрирования мощностью. При этом второй цикл выполнялся с более длинной выдержкой на «малых» уровнях мощности.

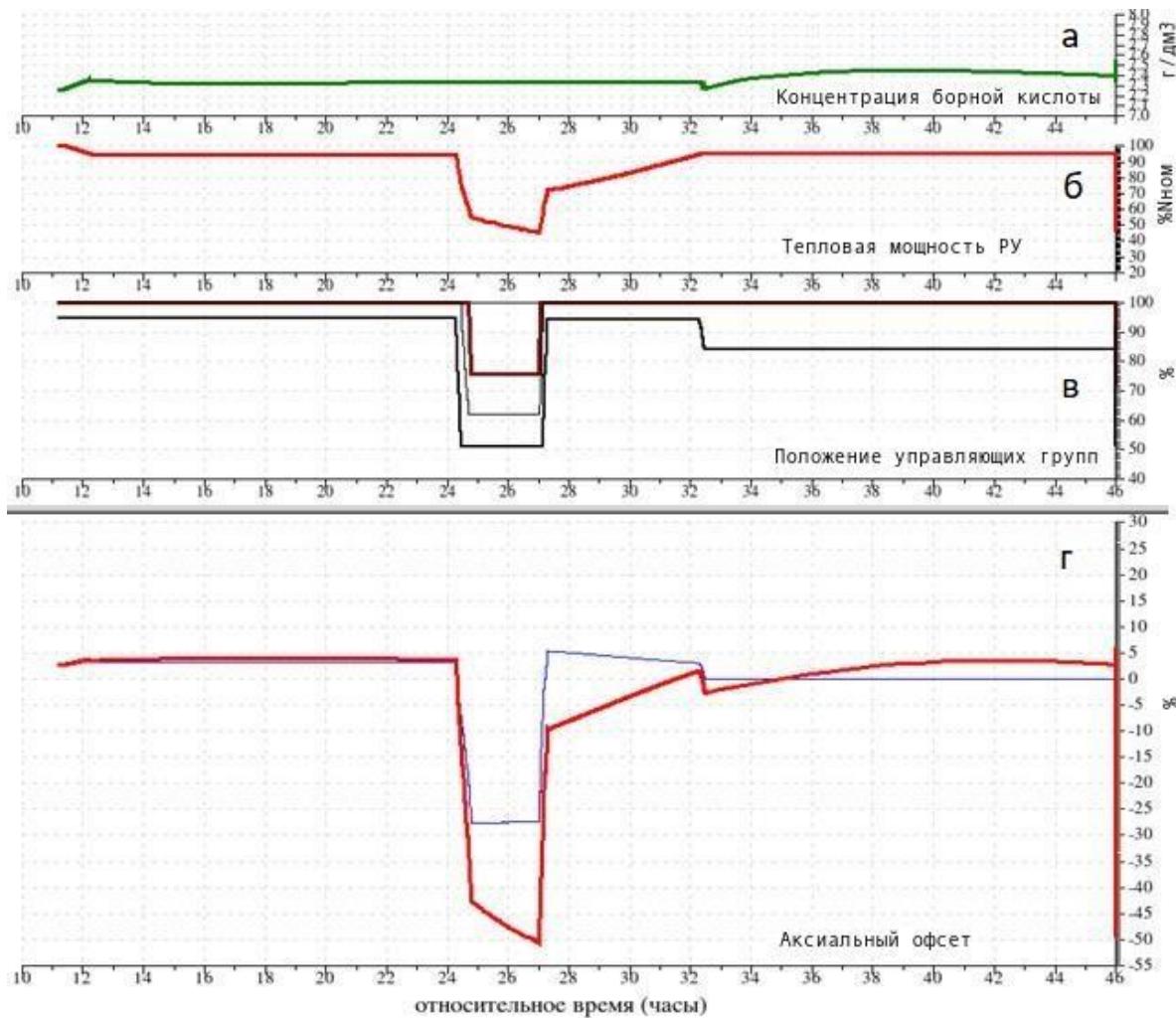


Рис. 5. Графики изменения состояния ВВЭР-1200
 при моделировании первого суточного цикла (укрупненно этапы с 1 по 7 по рис. 4)
Fig. 5. Changes in the state of WWER-1200 during the simulation of the first daily cycle
 (enlarged stages 1-7 from fig. 4)

В рамках минимизации управляемых воздействия путем, изменение положения управляемых групп до $H12=51.1\%$, $H11=62.2\%$, $H10=75.7\%$ была снижена тепловая мощность РУ до $54.6\% N_{\text{ном}}$ со скоростью $2\%/\text{мин.}$ (рис. 4, график б, точка 8). В течение 120 мин тепловая мощность РУ снизилась до значения $45.1\% N_{\text{ном}}$ на отравлении ксеноном (рис. 4, график б, точка 9). Для поддержания тепловой мощности выполнялось извлечение управляемых групп с номерами № 10 и 11 в течение 100 мин до положения $H11=72.7\%$, $H10 - \text{ВКВ}$ (рис. 4, график б, точка 10). После достижения заданного времени работы на пониженном уровне мощности, поочередным извлечением управляемых групп с номерами № 11 и 12 тепловая мощность РУ была увеличена до уровня $65.1\% N_{\text{ном}}$ (рис. 4, график б, точка 11). Положения управляемых групп составили: $H12=91.6\%$, $H11-\text{ВКВ}$, $H10-\text{ВКВ}$. Далее, в течение 4 часов, за счет разотравления активной зоны, мощность РУ увеличивается до $95\% N_{\text{ном}}$ (рис. 4, график б, точка 12).

Для подавления ксеноновых колебаний и ограничения тепловой мощности, в период «дневной работы» энергоблока, рабочая группа была погружена до значения $H12=81.6\%$ (рис. 4, график б, точка 13), затем в течение 14 часов выполнялась коррекция концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура на величину $\sim 0.2\text{ g/dm}^3$ (рис. 6, график а), с последующим подавлением амплитуды ксеноновых колебаний путем подъема 12-ой группы на нисходящей фазе оффсета до $H12=92.1\%$.

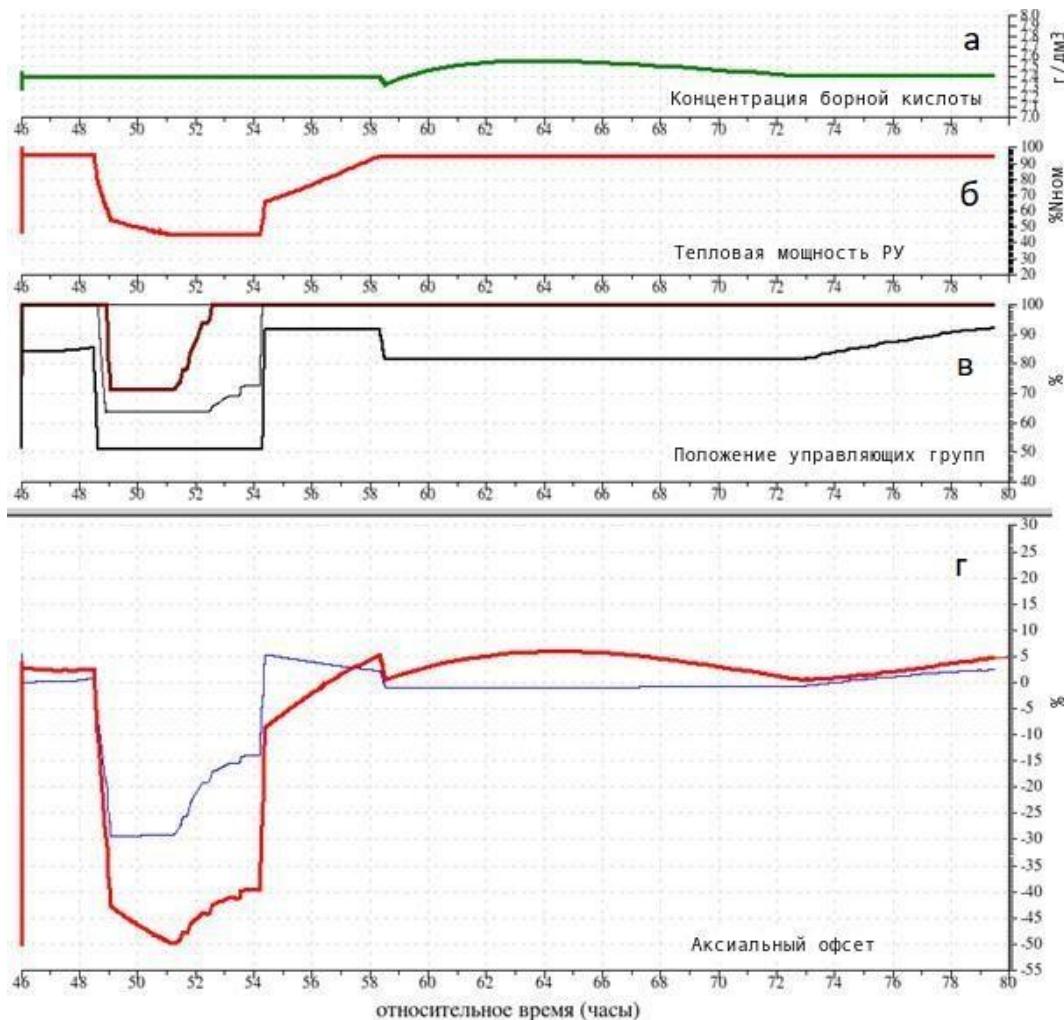


Рис. 6. Графики изменения состояния ВВЭР-1200
при моделировании второго суточного цикла (уточненно этапы с 8 по 13 по рис. 4)

Fig. 6. Changes in the state of WWER-1200 during the simulation of the second daily cycle
(enlarged stages 8-13 from fig. 4)

Представленный подход к работе АЭС в маневренном режиме заметно упрощает процедуры управления полем энерговыделения, снижает нагрузку на оператора управляющего РУ и приводит к снижению объемов водообмена.

Заключение

- Предложен новый способ управления мощностью ядерного реактора типа ВВЭР, заключающийся в том, что изменение мощности осуществляют путем управления нисходящей и восходящей фазами естественных ксеноновых колебаний с минимальным воздействием на реактивность путем, по меньшей мере, однократного перемещения органов регулирования системы управления и защиты и/или путем минимального борного регулирования с достижением интегральных значений мощности реактора за ночной и дневной периоды регулирования.
- Главное преимущество нового способа управления мощностью состоит в повышении безопасности эксплуатации реакторной установки за счет использования ксеноновых колебаний в требуемой фазе, надежности оборудования и увеличении ресурсных характеристик оборудования реакторной установки при циклических изменениях суточной нагрузки за счет минимизации термомеханических нагрузок, исчерпывающих ресурс оборудования, участвующего в процессе регулирования, уменьшение объема водообмена, а также

исключение ошибок оператора за счет упрощения алгоритма автоуправления реактором со стороны второго контура.

3. Целесообразно включить в программу испытаний маневренных режимов ВВЭР-1200 предложенный авторами метод для практической оценки его эффективности.

Библиографический список

1. **Выговский, С.Б.** Исследование алгоритмов управления ЯЭУ с ВВЭР-1200 для реализации суточных маневренных режимов на АЭС / С.Б. Выговский, М.Р. Аль Малкави, А.Г. Хачатрян // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 67-79.
2. **Аверьянова, С.П.** Исследование ксеноновых переходных процессов на Нововоронежской АЭС / С.П. Аверьянова, Н.С. Вохманина, Д.А. Злобин [и др.] // Атомная Энергия. – 2018. – Т. 124. – № 4. – С. 183-188.
3. **Аверьянова, С.П.** Ксеноновая устойчивость ВВЭР1200 / С.П. Аверьянова, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. 2009. – Т. 107. – № 6. – С. 348-351
4. **Аверьянова, С.П.** Температурное регулирование и маневренность ВВЭР1000 / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров [и др.] // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109. – № 4. – С. 198-202.
5. **Аверьянова, С.П.** Работа ВВЭР 1200/1300 в суточном графике нагрузки / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров [и др.] // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – № 5. – С. 247-252.
6. **Аверьянова, С.П.** Развитие способов управления ВВЭР1200/1300 в суточном графике нагрузки / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров [и др.] // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114. – № 5. – С. 249-253.
7. **Выговский, С.Б.** Оптимизация алгоритмов управления ЯЭУ с ВВЭР1200 для минимизации водообмена в 1-ом контуре при реализации суточных маневренных режимов / С.Б. Выговский, Р.Т. Аль Малкави [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 3 (28). – С. 49-63.
8. **Поваров, В.П.** Экспериментальные исследования нейтронно-физических процессов в активной зоне ВВЭР1200 / В.П. Поваров, В.Ф. Украинцев, Е.И. Голубев [и др.]. – Нововоронеж: ООО РПГ «Девятое облако», 2021. – 264 с.
9. **Филимонов, П.Е.** Испытания нестационарных режимов работы ВВЭР1200 на первом энергоблоке Белорусской АЭС / П.Е. Филимонов, А.А. Дубов, Ю.М. Семченков [и др.]. // Атомная энергия. – 2021. – Т. 131 – № 5. – С. 243-249.
10. **Аркадов, Г.В.** Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР1200. / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов. – М.: Наука, 2021 – 222 с.
11. **Петров, М.Б.** Модель выравнивания суточного графика нагрузки потребителями электроэнергии / М.Б. Петров, К.Б. Кожев // Вестник Гуманитарного университета. – 2023. – № 4(43). – С. 124-134.
12. **Филимонов, П.Е.** Испытания нестационарных режимов работы ВВЭР-1200 на первом энергоблоке Белорусской АЭС / П.Е. Филимонов, А.А. Дубов, Ю.М. Семченков [и др.]. // Атомная энергия. – Т. 131. – № 5. – С. 243-248.
13. **Филимонов, П.Е.** Испытания ВВЭР1200 при эксплуатации в режиме суточного графика нагрузки на 6 энергоблоке Нововоронежской АЭС / П.Е. Филимонов, Ю.М. Семченков, В.В. Малышев [и др.]. // Атомная энергия. – 2020. – Т. 129. – № 3. – С. 123-129.
14. **Крипак, В.Р.** Оперативная оценка сходимости аксиальных ксеноновых колебаний энерговыделения ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 / В.Р. Крипак, В.Р. Тиунов, Г.А. Филимонов // Атомная энергия. – Т. 137. – № 3-4. – С. 143-146.
15. **Увакин, М.А.** Развитие методики обоснования безопасности ВВЭР в маневренных режимах посредством использования нейронной сети / М.А. Увакин, А.Л. Николаев, М.В. Антипов [и др.]. // Атомная энергия. – 2024 – Т. 136. – № 3-4. – С. 102-106.

References

1. Vyigovskii S.B., Al'Malkavi M.R. and Khachatrian A.G. 2019. “Issledovanie algoritmov upravleniya IaEU s VVER-1200 dlja realizatsiiu tochnykh manevrennykh rezhimov na AES” [Research of VVER-1200 NPP Control Algorithms for Daily Load Maneuvering at Nuclear Power Plants]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Iadernaiia energetika* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Nuclear Power Engineering], no. 2: 67-79.

2. Aver'yanova S.P., Vokhmyanina N.S., Zlobin D.A. [et al.]. 2018. "Issledovanie ksenonovykh perekhodnykh protsessov na Novovoronezhskoi AES" [Xenon Transient Analysis at Novovoronezh NPP]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 124 (4): 183-188.
3. Aver'yanova S.P. and Filimonov P.E. 2009. "Ksenonovaia ustoichivost' VVER1200" [Xenon Stability of VVER-1200]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 107 (6): 348-351.
4. Aver'yanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B. [et al.]. 2010. "Temperaturnoe regulirovanie i manevrennost' VVER1000" [Temperature Control and Maneuverability of VVER-1000]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 109 (4): 198-202.
5. Aver'yanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B. [et al.]. 2012. "Rabota VVER 1200/1300 v sutochnom grafike nagruzki" [Operation of VVER-1200/1300 in Daily Load Schedule]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 113 (5): 247-252.
6. Aver'yanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B. [et al.]. 2013. "Razvitie sposobov upravlenii VVER1200/1300 v sutochnom grafike nagruzki" [Development of VVER-1200/1300 Control Methods in Daily Load Schedule]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 114 (5): 249-253.
7. Vygovskii S.B. Al'Malkavi R.T. [et al.]. 2018. "Optimizatsiiia algoritmov upravleniiia IaEU s VVER1200 dlia minimizatsii vodoobmena v 1-om konture pri realizatsiiutochnykh manevrennykh rezhimov" [Optimization of VVER-1200 NPP Control Algorithms for Minimizing Coolant Exchange in the Primary Circuit During Daily Load Maneuvering]. *Global'naia iadernaia bezopasnost'* [Global Nuclear Safety], no. 3 (28): 49-63.
8. Povarov V.P., Ukrantsev V.F., Golubev E.I. [et al.]. 2021. "Eksperimental'nye issledovaniia neitronnofizicheskikh protsessov v aktivnoi zone VVER1200" [Experimental Studies of Neutron-Physical Processes in the VVER-1200 Core]. Novovoronezh: OOO RPG "Deviatoe oblako".
9. Filimonov P.E., Dubov A.A., Semchenkov Yu.M. [et al.]. 2021. "Ispytaniia nestatsionarnykh rezhimov raboty VVER1200 na pervom energobloke Belorusskoi AES" [Testing of Non-Stationary Operation Modes of VVER-1200 at the First Power Unit of the Belarusian NPP]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 131 (5): 243-249.
10. Arkadov G.V., Pavelko V.I. and M.T. Slepov. 2021. *Shumovoi monitoring v prilozheniakh k reaktornoi ustanovke VVER1200* [Noise Monitoring in Applications to the VVER-1200 Reactor Plant]. Moscow: Nauka.
11. Petrov M.B. and Kozhov K.B. 2023. "Model' vyravnivaniia autochnogo grafika nagruzki potrebiteliami elektroenergii" [A Model for Leveling the Daily Load Schedule by Electricity Consumers]. *Vestnik Gumanitarnogo universiteta* [Bulletin of the Humanitarian University], no. 4 (43): 124-134.
12. Filimonov P.E., Dubov A.A., Semchenkov Yu.M. [et al.]. 2021. "Ispytaniia nestatsionarnykh rezhimov raboty VVER-1200 na pervom energobloke Belorusskoi AES" [Testing of Non-Stationary Operation Modes of VVER-1200 at the First Power Unit of the Belarusian NPP]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 131 (5): 243-248.
13. Filimonov P.E., Semchenkov Yu.M., Malyshev V.V. [et al.]. 2020. "Ispytaniia VVER1200 pri ekspluatatsii v rezhime autochnogo grafika nagruzki na 6 energobloke Novovoronezhskoi AES" [VVER-1200 Testing During Operation in Daily Load Schedule Mode at Unit 6 of Novovoronezh NPP]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 129 (3): 123-129.
14. Kripak V.R., Tiunov V.R. and Filimonov G.A. 2023. "Operativnaia otsenka skhodimosti aksial'nykh ksenonovykh kolebanii energovydeleniiia VVER-1000 i VVER-1200" [Operational Assessment of Convergence of Axial Xenon Oscillations of Power Distribution in VVER-1000 and VVER-1200]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 137 (3-4): 143-146.
15. Uvakin M.A., Nikolaev A.L., Antipov M.V. [et al.]. 2024. "Razvitie metodiki obosnovaniia bezopasnosti VVER v manevrennykh rezhimakh posredstvom ispol'zovaniia neironnoi seti" [Development of a Methodology for VVER Safety Justification in Maneuvering Modes Using Neural Networks]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 136 (3-4): 102-106.

**Дата поступления
в редакцию: 24.07.2025**

**Дата принятия
к публикации: 05.11.2025**

ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ТРОЙНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ С ТУПИКОВЫМИ ОТВЕТВЛЕНИЯМИ МЕТОДАМИ PIV И LDV

Д.А. Дедов

ORCID: 0009-0008-6727-6358 e-mail: dedovdda@yandex.ru

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова
Нижний Новгород, Россия

А.В. Логинов

ORCID: 0009-0007-8167-2341 e-mail: loginov_av@okbm.nnov.ru

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова
Нижний Новгород, Россия

В.А. Семашко

ORCID: 0009-0002-3781-7172 e-mail: semashko_va@okbm.nnov.ru

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова
Нижний Новгород, Россия

В.П. Крепков

ORCID: 0009-0003-1288-1810 e-mail: krepkovvp@okbm.nnov.ru

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова
Нижний Новгород, Россия

А.В. Будников

ORCID: 0000-0002-5305-6134 e-mail: avbudnikov@okbm.nnov.ru

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова
Нижний Новгород, Россия

Проведены комплексные исследования в развитие международного бенчмарка 2023 г. по изучению теплогидравлических процессов, протекающих в тройниковых соединениях с тупиковыми ответвлениями, подверженных термопульсациям, отрицательно сказывающимся на надежности и долговечности конструкций и ведущим к термической усталости материалов трубопроводов. Целью бенчмарка было получение валидационной базы данных для проведения CFD-расчетов. Для получения более полной картины процессов в соединении использованы бесконтактные методы – PIV (Particle Image Velocimetry), LDV (Laser Doppler Velocimetry) и тепловизор. По результатам испытаний получены осредненные по времени поля скорости в исследуемом объеме, а также профили вертикальной компоненты скорости V_y в сечениях ответвления. Результаты исследования планируется использовать для верификации CFD-кодов.

Ключевые слова: термическая усталость; термопульсации; Т-образные соединения; PIV и LDV методы; поле скорости; профили скорости.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дедов, Д.А. Измерение гидродинамических характеристик в тройниковых соединениях с тупиковыми ответвлениями методами PIV и LDV / Д.А. Дедов, А.В. Логинов, В.А. Семашко, В.П. Крепков, А.В. Будников // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 57-67. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_57
EDN: AABHFK

PIV & LDV HYDRODYNAMIC MEASUREMENTS IN DEAD LEG T-JUNCTIONS

D.A. Dedov

ORCID: **0009-0008-6727-6358** e-mail: **dedovdda@yandex.ru**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering

Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Loginov

ORCID: **0009-0007-8167-2341** e-mail: **loginov_av@okbm.nnov.ru**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering

Nizhny Novgorod, Russia

V.A. Semashko

ORCID: **0009-0002-3781-7172** e-mail: **semashko_va@okbm.nnov.ru**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering

Nizhny Novgorod, Russia

V.P. Krepkov

ORCID: **0009-0003-1288-1810** e-mail: **krepkovvp@okbm.nnov.ru**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering

Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Budnikov

ORCID: **0000-0002-5305-6134** e-mail: **avbudnikov@okbm.nnov.ru**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents the results of comprehensive research in the development of a 2023 international benchmark for the study of thermal-hydraulic processes occurring in dead leg T-junctions subject to thermal pulsations, which negatively affect the reliability and durability of structures and lead to thermal fatigue of pipeline materials. The purpose of the benchmark was to obtain a validation database for CFD calculations. Non-contact methods – PIV (Particle Image Velocimetry), LDV (Laser Doppler Velocimetry) and thermal imaging are used to obtain a more complete picture of the processes in the junctions. Based on the test results, time-averaged velocity fields were obtained in the studied volume, as well as profiles of the vertical velocity component V_y in the branch sections. The obtained results will be used to verify CFD codes.

Key words: thermal fatigue; thermal pulsations; T-junctions; PIV and LDV methods; velocity field; velocity profiles.

FOR CITATION: D.A. Dedov, A.V. Loginov, V.A. Semashko, V.P. Krepkov, and A.V. Budnikov. PIV & LDV hydrodynamic measurements in dead leg t-junctions. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 57-67. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_57 EDN: AABHFK

Введение

Тройниковые соединения с тупиковыми ветками (Dead Leg T-junctions) широко распространены на атомных и тепловых станциях. Каждый контур теплоносителя соединен со множеством вспомогательных контуров систем, которые при нормальной эксплуатации не используются и перекрыты клапанами. Наглядными примерами являются система аварийного охлаждения реактора и система аварийного ввода бора.

Особенностью соединений данного типа является разность скоростей между потоками основного и тупикового участков. Она приводит к формированию проникающих вихрей,

направленных вдоль оси ответвления и переносящих теплоноситель основного потока вглубь глухого ответвления. При значительной разнице температур между теплоносителем и водой в ответвлении на стенках трубопровода в соединении возникают термические пульсации. Если при этом тупиковое ответвление расположено сверху основного участка, данные пульсации незначительны, так как в результате конвективного теплообмена горячая вода теплоносителя поднимается в глухой участок, выравнивая температуры потоков. Более важным для изучения является случай Т-образного соединения, в котором ответвление расположено снизу от оси основного потока. При такой геометрии в нижней части глухого участка формируется застойная зона с холодной водой, и разность температур между потоками сохраняется. Так, например, во втором контуре реактора *Phenix* в период с 1987 по 1990 гг. наблюдались случаи утечки натрия через сквозные трещины в соединениях типа *Dead Leg*. Последующий анализ показал, что причиной этих повреждений стала именно термическая усталость материала стенки трубопровода, накопленная под действием описанных выше термопульсаций [1].

Для изучения термической усталости, возникающей в Т-образных соединениях, в 2023 г. был проведен международный бенчмарк, конечной целью которого являлось получение валидационной базы данных для проведения CFD (Computational Fluid Dynamics) расчетов [2]. Работа, описанная в данной статье, проводилась в развитие бенчмарка, с целью провести более комплексные исследования с использованием бесконтактных методов – PIV (Particle Image Velocimetry), LDV (Laser Doppler Velocimetry) и тепловизора. Для этого была разработана особая сменная конструкция исследуемого участка, выполненного из оргстекла.

В данной статье приводятся результаты исследований, проведенных на экспериментальном стенде с использованием PIV- и LDV-систем, а также результаты кроссвалидации между этими двумя методами.

Описание экспериментального стенда и исследуемой модели

Конструктивное исполнение экспериментальной модели представлено на рис. 1.

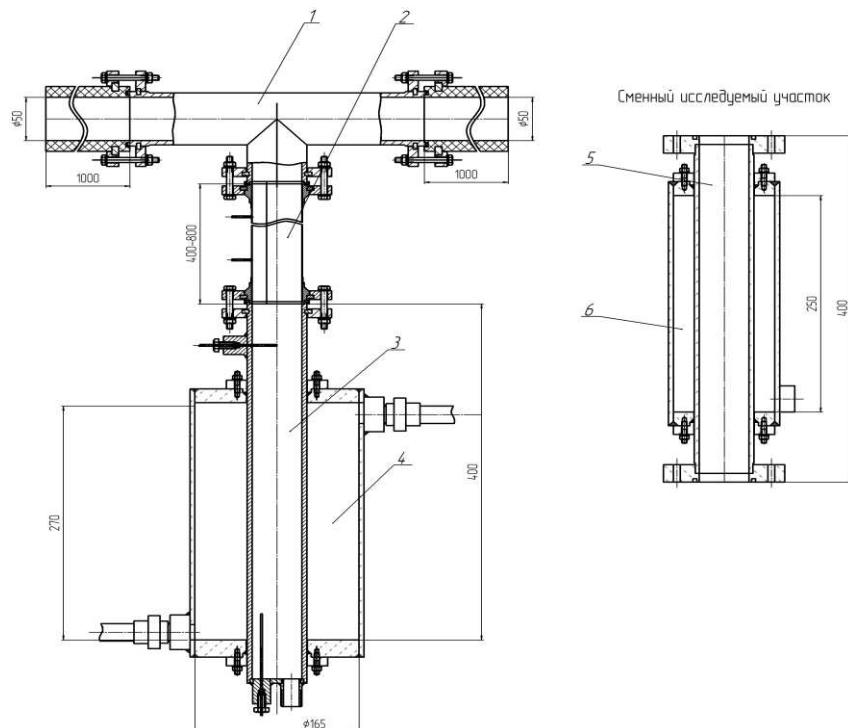


Рис. 1. Конструктивное исполнение модели

Fig. 1. Design of the model

Тройниковое соединение труб диаметром 50 мм (поз. 1) горизонтальным участком при соединено к замкнутому контуру циркуляции теплоносителя. Исследуемым каналом является вертикальный тупиковый участок с застойной водой (поз. 2) – он стыкуется с охлаждающим участком (поз. 3), к которому в бак-холодильник (поз. 4) подводится вода температурой 10-11 °C. Применением методик PIV и LDV обусловлены некоторые особенности конструкции исследуемого участка. В целях уменьшения оптических искажений и повышения удобства при калибровке лазерных систем, участок, выполненный из оргстекла (поз. 5), помещен в прозрачную прямоугольную камеру (поз. 6), заполненную технической водой. Сменное исполнение позволяет разместить прозрачный участок в горизонтальной части модели для предварительного изучения профилей скорости потока, поступающего в тройниковое соединение.

Испытания проводились при расходах 10 м³/ч, 21 м³/ч и 40 м³/ч, температурах $T_e = 60$ °C для движущегося потока горизонтального участка, и $T_x = 17$ °C для стоячей воды тупикового вертикального ответвления. Допустимые отклонения параметров расхода и температуры при измерениях методом PIV составляли 0,05 м³/ч и 0,5 °C соответственно. Метод LDV требует больше времени для получения информации о скорости в каждой точке выбранного сечения – по этой причине допустимые отклонения по температуре для него составили около 2 °C.

Описание систем измерений

Для исследования гидродинамики протекающих в модели процессов применены методы лазерной анемометрии PIV и LDV. Метод PIV использовался для получения осредненной по времени картины поля скорости в исследуемом участке, а также вертикальных и горизонтальных профилей осредненной во времени вертикальной компоненты скорости (V_y). Для проведения исследований использована система LaVision на основе импульсного лазера NANO L PIV 135-15 с полиамидными частицами размером 10-30 мкм в качестве трассера. Метод LDV, реализованный лазерной доплеровской измерительной системой ЛАД-05 производства ИТ СО РАН, дублировал измерения скорости для подтверждения работоспособности PIV – системы и обеспечения возможности кроссвалидации.

По причине ограниченности рабочего поля камеры, используемой в методе PIV, модель была условно разделена на две исследуемые зоны: $y = 145$ -220 мм и $y = 195$ -270 мм от центральной оси тройникового соединения. Ниже $y = 270$ мм начинается зона стоячей воды с практически полным отсутствием тепло- и массопереноса. Вертикальные профили V_y строились с шагом $\Delta x = 5$ мм, начиная от левой стенки модели $x = 0$ мм. Горизонтальные профили V_y строились с шагом $\Delta y = 5$ мм, начиная от верхней границы первой зоны $y = 145$ мм, с увеличением шага до $\Delta y = 10$ мм, начиная с $y = 175$ мм, где осевые вихри становятся менее интенсивными. На рис. 2 изображена исследуемая модель с отмеченными на ней зонами измерений и линиями, проводимыми для построения профилей сечений. Центр тройникового соединения, таким образом, имеет координаты $x = 25$ мм, $y = 0$ мм.

Результаты измерений

Перед проведением исследований непосредственно в соединении типа *Dead Leg* необходимо произвести предварительное измерение для определения профилей скорости и СКО на входе в канал. Для этого сменный исследуемый участок был размещен горизонтально – по оси течения горячего потока. Измерения выполнялись методом PIV, для построения профилей была выбрана линия сечения на расстоянии $\Delta x = 450$ мм от центра тройникового соединения. Профили скорости и СКО в вертикальном сечении на входе в канал приведены на рис. 3. Видно, что при всех выбранных расходах профиль скорости близок к равномерному практически по всей высоте канала.

Далее представлены осредненные по времени поля скорости для участков $y = 145$ -220 мм и $y = 195$ -270 мм при параметрах температуры $T_e = 60$, $T_x = 17$ °C. Рис. 4 и 5 соответствуют расходу 10 м³/ч, рис. 6 и 7 соответствуют расходу 40 м³/ч.

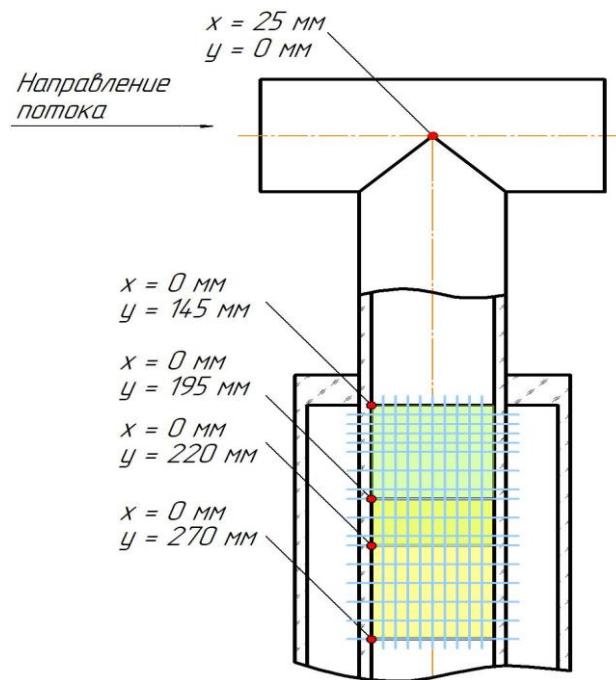


Рис. 2. Расположение рабочих зон и линий сечений

Fig. 2. Location of work areas and section lines

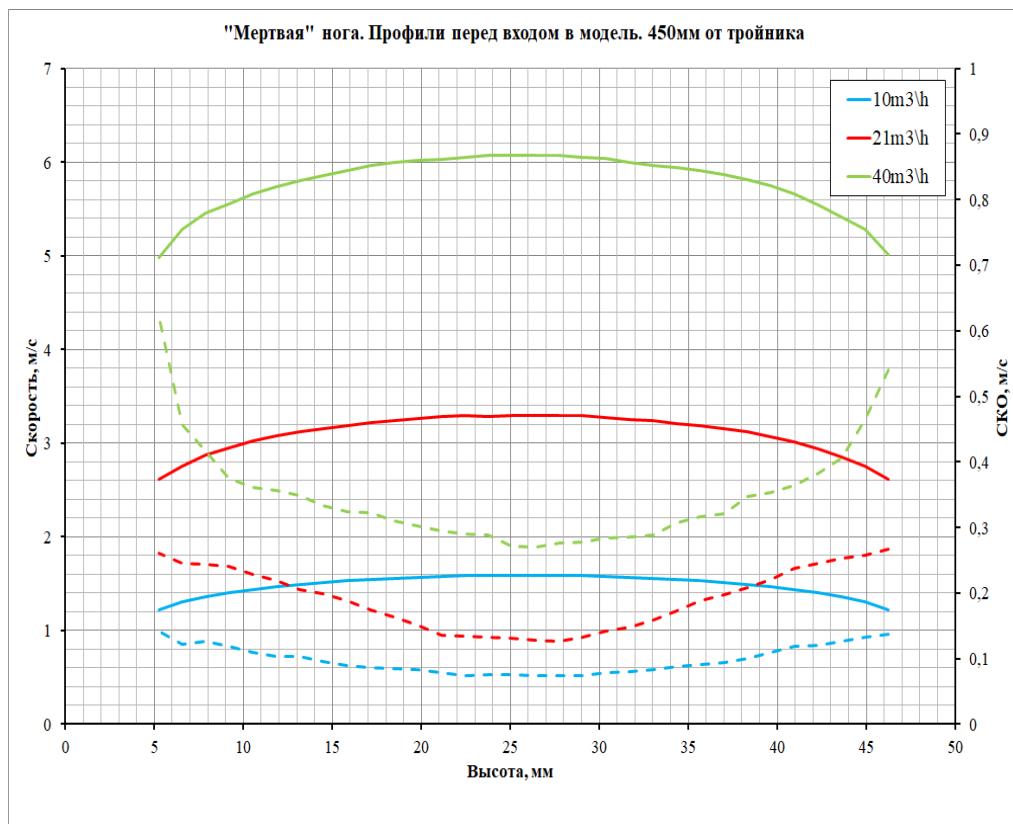


Рис. 3. Профили скорости и СКО на входе в горизонтальный участок

Fig. 3. Velocity profiles and standard deviation at the entrance to the horizontal section

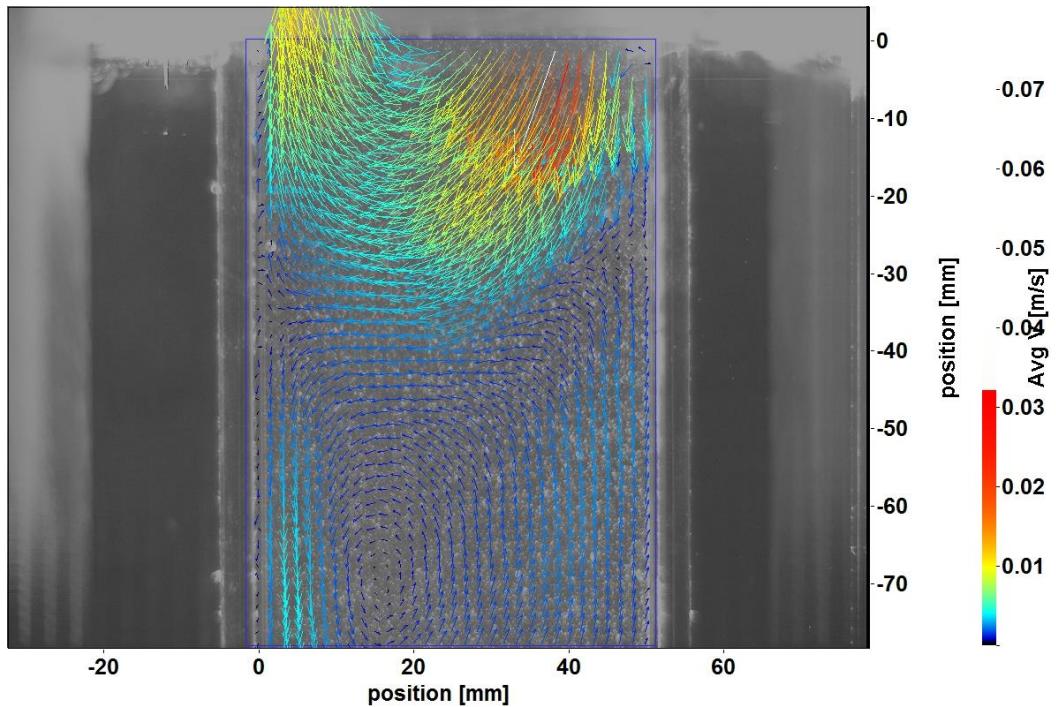


Рис. 4. Осредненное поле скорости: $y = 145\text{--}220$ мм; $T_g = 60$ °C, $T_x = 17$ °C; $Q = 10$ м³/ч

Fig. 4. Average velocity field: $y = 145\text{--}220$ mm; $T_g = 60$ °C, $T_x = 17$ °C; $Q = 10$ m³/h

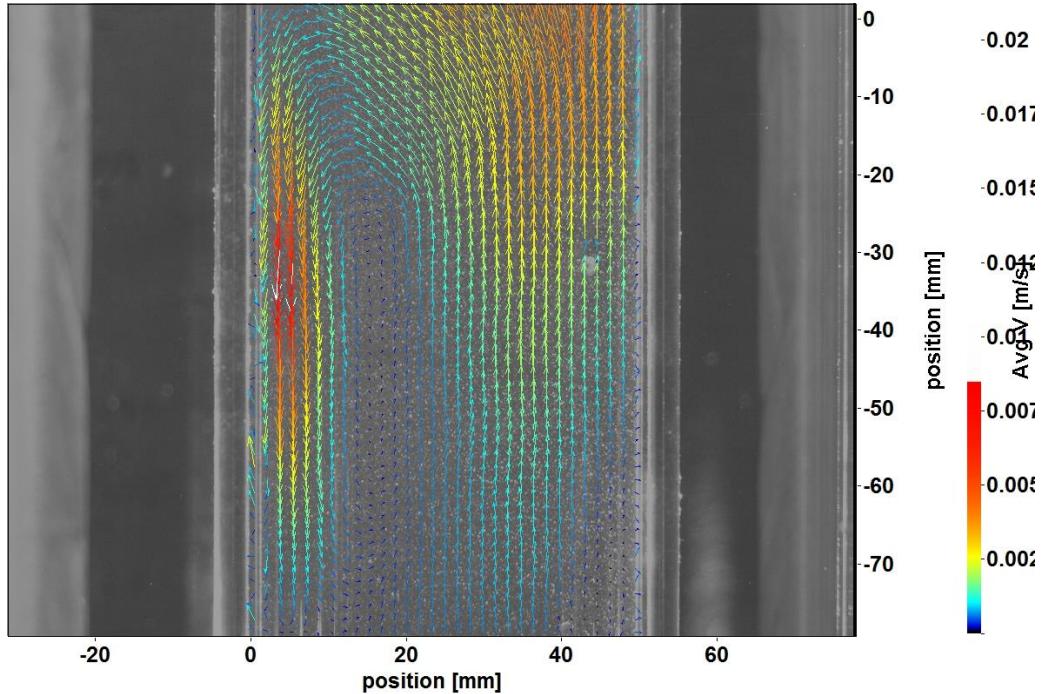


Рис. 5. Осредненное поле скорости: $y = 195\text{--}270$ мм; $T_g = 60$ °C, $T_x = 17$ °C; $Q = 10$ м³/ч

Fig. 5. Average velocity field: $y = 195\text{--}270$ mm; $T_g = 60$ °C, $T_x = 17$ °C; $Q = 10$ m³/h

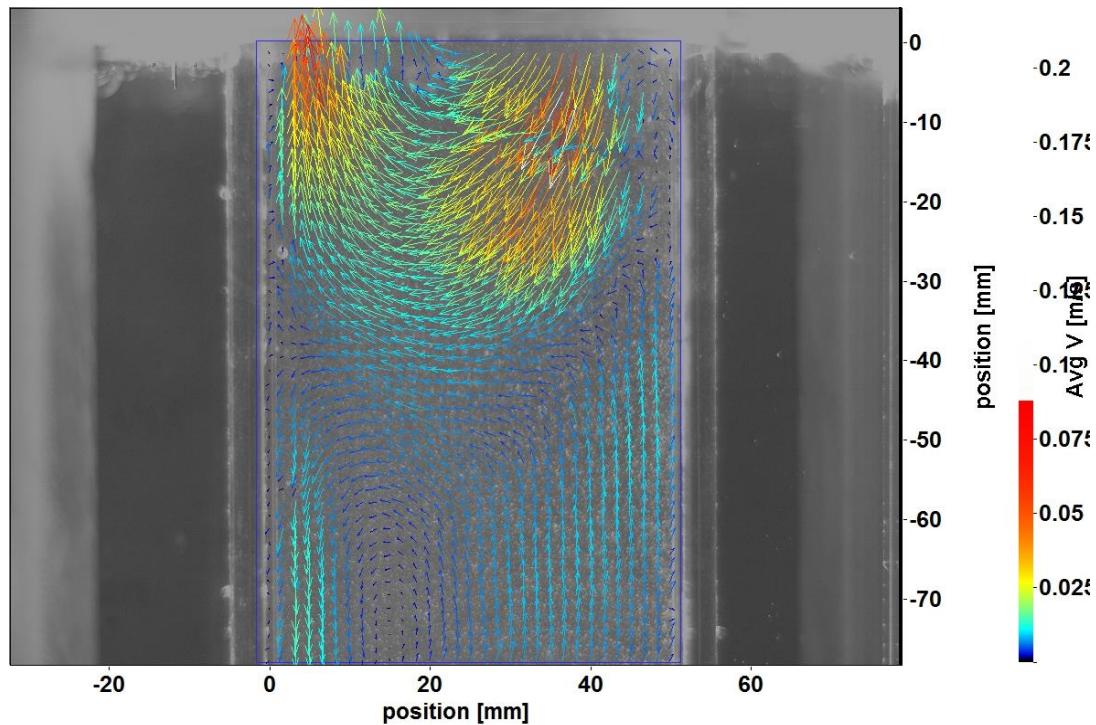


Рис. 6. Осредненное поле скорости: $y = 145-220$ мм; $Tr = 60$ °C, $Tx = 17$ °C; $Q = 40$ м³/ч

Fig. 6. Average velocity field: $y = 145-220$ mm; $Tr = 60$ °C, $Tx = 17$ °C; $Q = 40$ m³/h

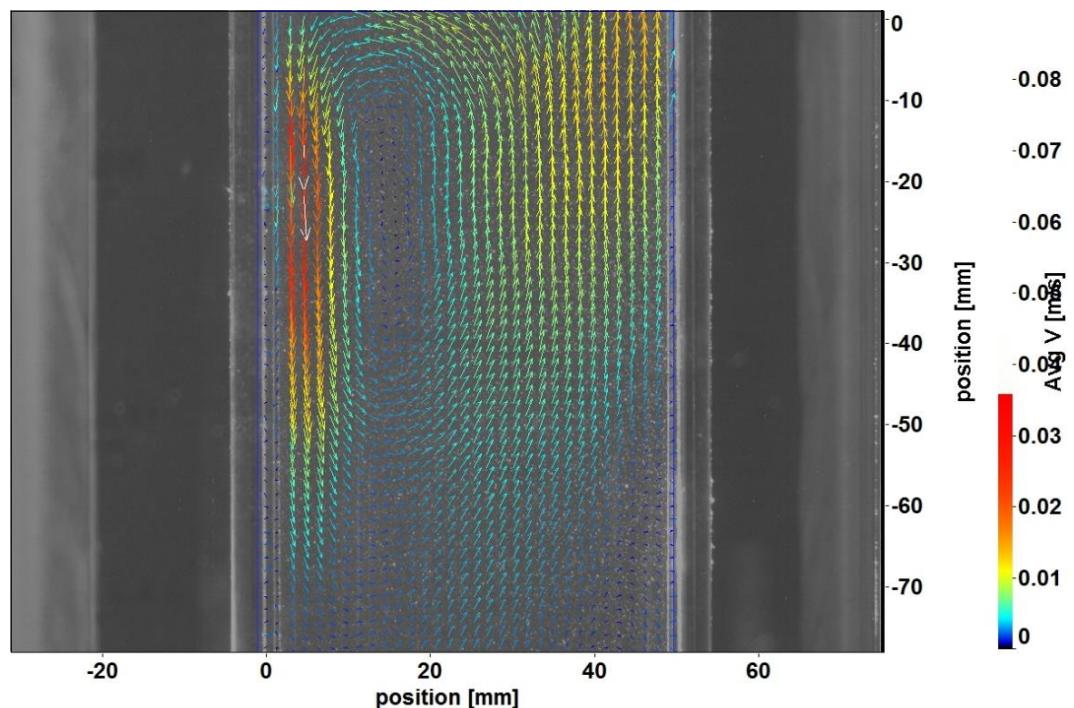


Рис. 7. Осредненное поле скорости: $y = 195-270$ мм; $Tr = 60$ °C, $Tx = 17$ °C; $Q = 40$ м³/ч

Fig. 7. Average velocity field: $y = 195-270$ mm; $Tr = 60$ °C, $Tx = 17$ °C; $Q = 40$ m³/h

На рис. 4 и 6, соответствующих съемкам в верхней зоне исследуемого участка, отчетливо видно завершение осевого вихря, переносящего среду с повышенными параметрами из горизонтального потока. В нижней же зоне наблюдается некоторый «вторичный» вихрь, возникающий в стоячей воде ответвления под воздействием основного. Дальнейшие рис. 8-11 представляют собой построенные с осредненным по времени поля скорости горизонтальные и вертикальные профили на каждом участке для обоих выбранных расходов.

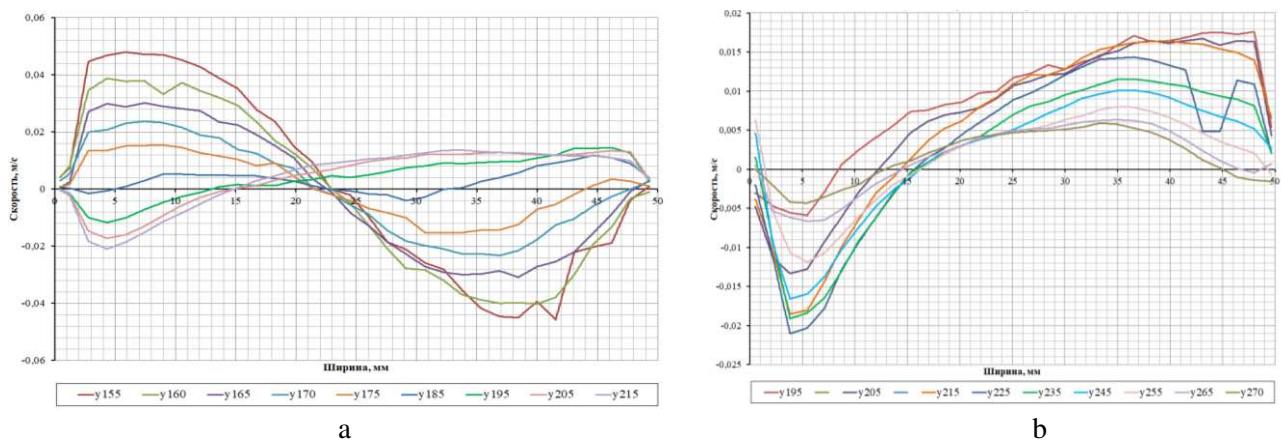


Рис. 8. Горизонтальные профили V_y : $Q = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$; $y = 145-220 \text{ мм}$ (а); $y = 195-270 \text{ мм}$ (б)

Fig. 8. Horizontal profiles V_y : $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$; $y = 145-220 \text{ mm}$ (a); $y = 195-270 \text{ mm}$ (b)

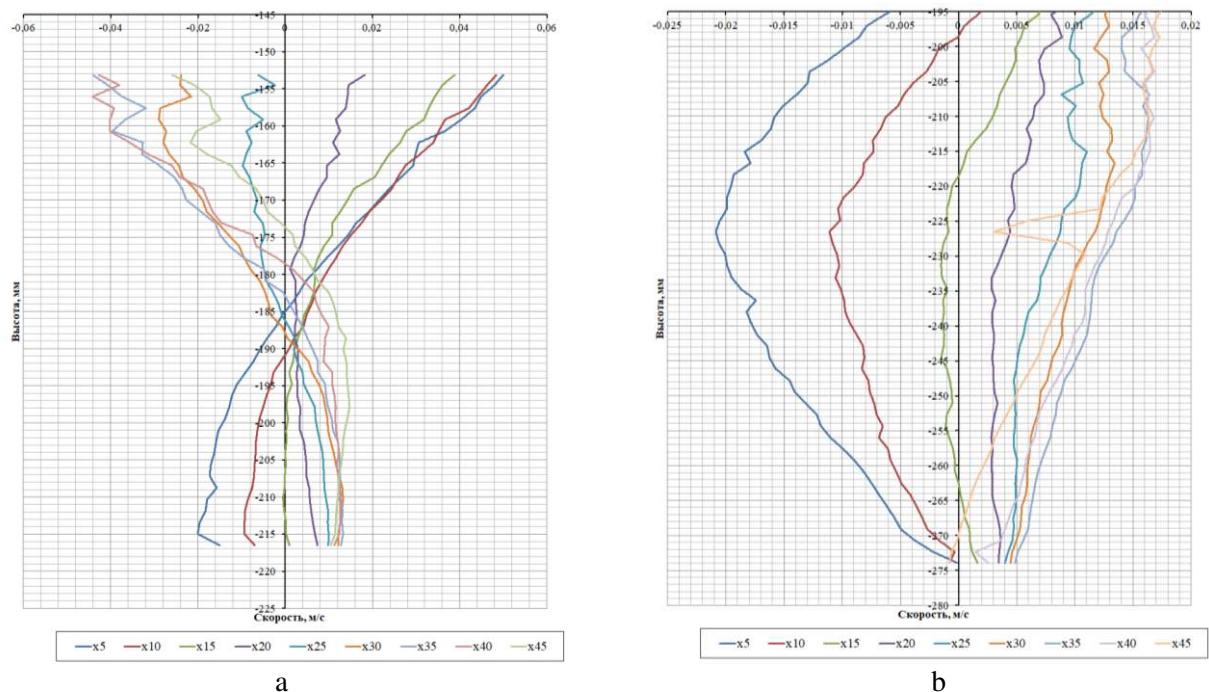


Рис. 9. Вертикальные профили V_y : $Q = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$; $y = 145-220 \text{ мм}$ (а); $y = 195-270 \text{ мм}$ (б)

Fig. 9. Vertical profiles V_y : $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$; $y = 145-220 \text{ mm}$ (a); $y = 195-270 \text{ mm}$ (b)

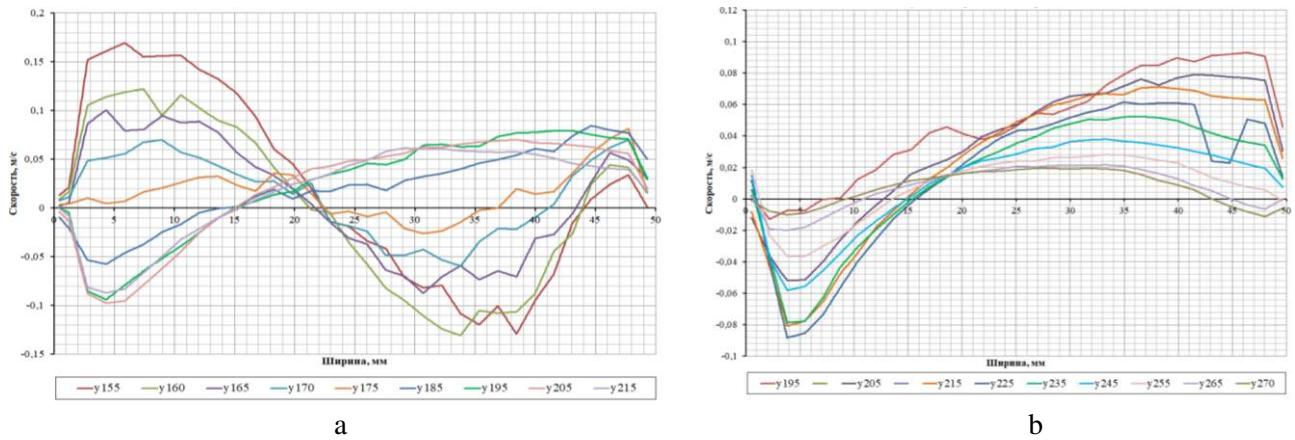


Рис. 10. Горизонтальные профили V_y : $Q = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$; $y = 145-220 \text{ мм}$ (а); $y = 195-270 \text{ мм}$ (б)

Fig. 10. Horizontal profiles V_y : $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$; $y = 145-220 \text{ mm}$ (a); $y = 195-270 \text{ mm}$ (b)

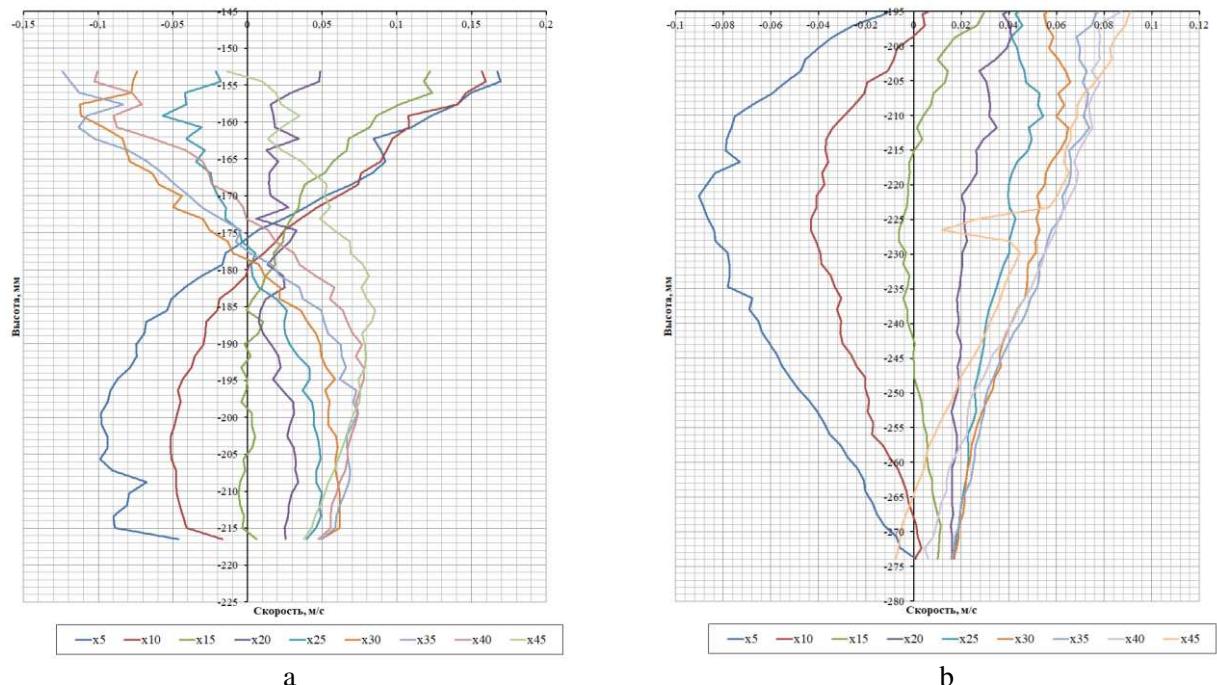


Рис. 11. Вертикальные профили V_y : $Q = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$; $y = 145-220 \text{ мм}$ (а); $y = 195-270 \text{ мм}$ (б)

Fig. 11. Vertical profiles V_y : $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$; $y = 145-220 \text{ mm}$ (a); $y = 195-270 \text{ mm}$ (b))

Для проверки полученных результатов и подтверждения работоспособности метода PIV в условиях исследуемой модели были проведены дополнительные измерения вертикальных профилей V_y методом LDV. Результаты представлены на рис. 12. Данный метод не требует разбиения исследуемого участка на рабочие зоны, однако он не позволяет получить картину поля скорости, предоставляя только значения в конкретных точках. Этим частично объясняется некоторое различие при сравнении результатов, полученных методами PIV и LDV. Сравнение производилось по всем исследуемым точкам: на рис. 13 представлены сечения на расстояниях $\Delta x = 5 \text{ мм}, 10 \text{ мм}, 35 \text{ мм}$ – наиболее показательные, охватывающие оба осевых вихря.

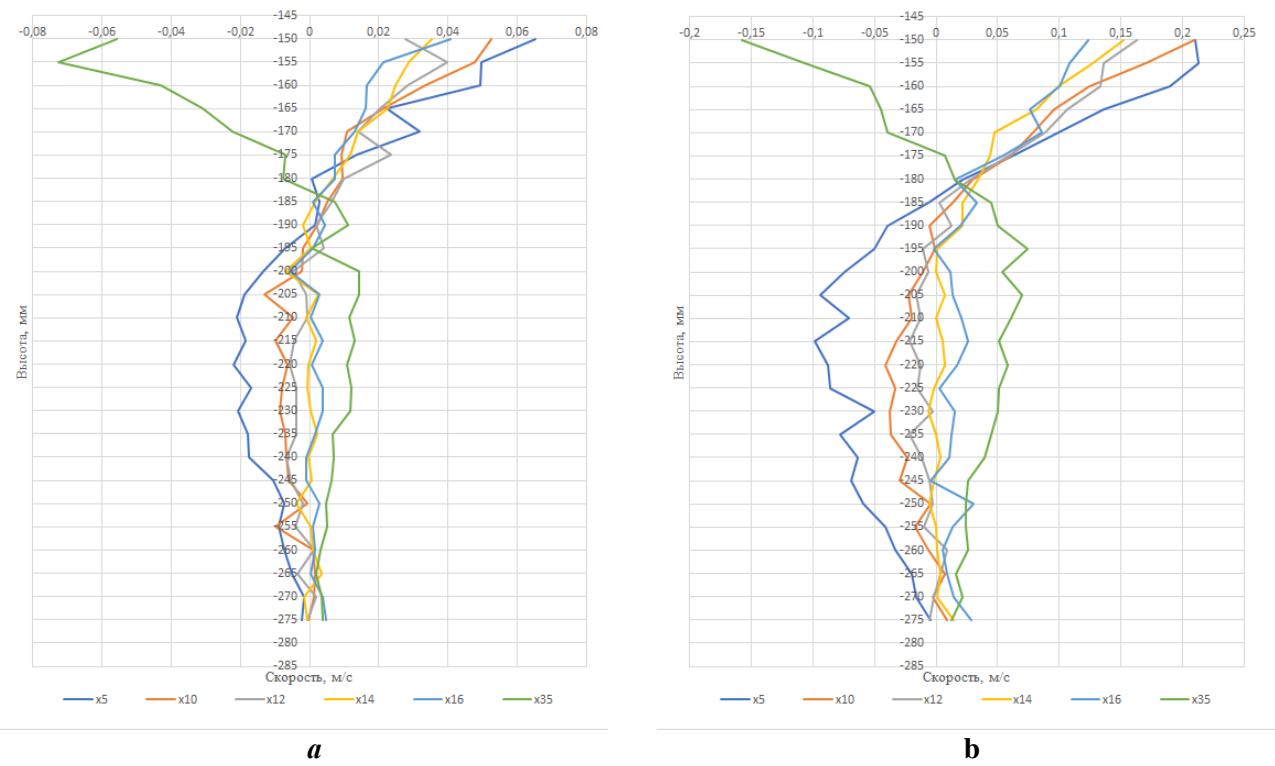


Рис. 12. Вертикальные профили V_y (LDV): $y = 145$ - 275 мм; $Q = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ (а); $Q = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ (б)

Fig. 12. Vertical profiles V_y (LDV): $y = 145$ - 275 mm; $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ (a); $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ (b)

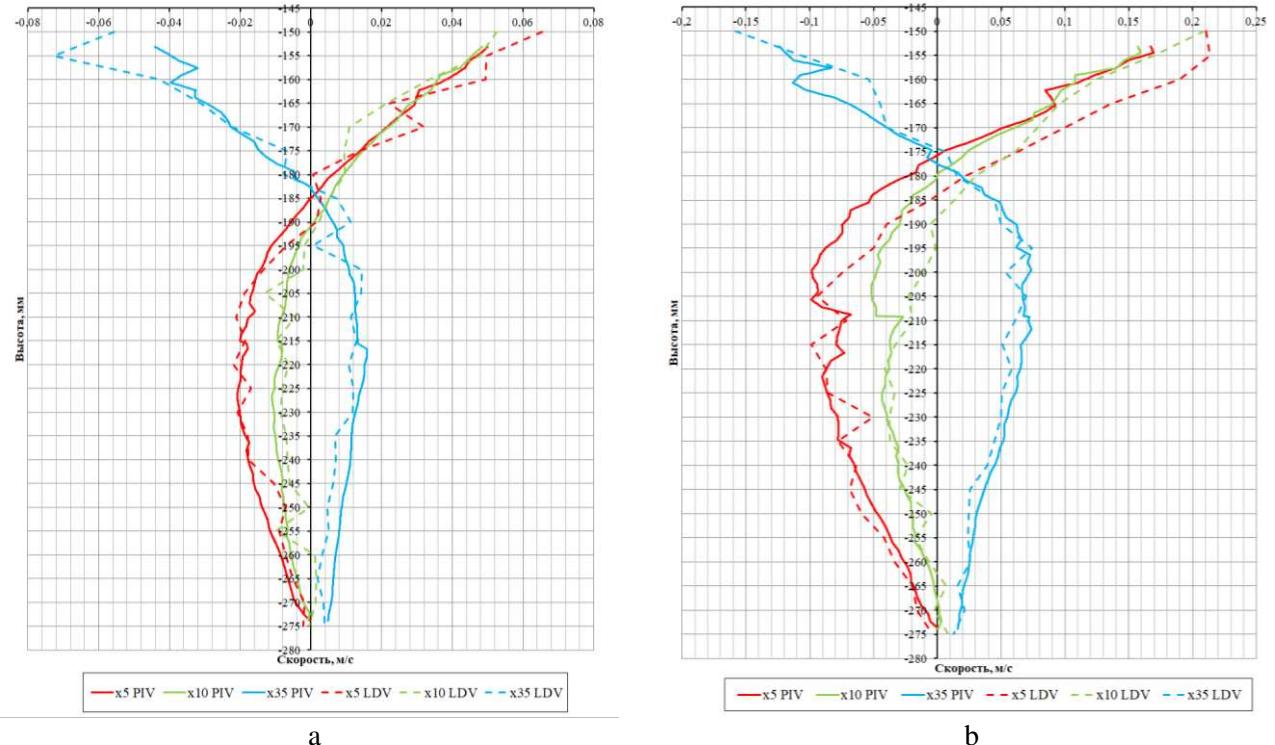


Рис. 13. Сравнение вертикальных профилей V_y , полученных методами PIV и LDV: $Q = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ (а); $Q = 40 \text{ м}^3/\text{ч}$ (б)

Fig. 13. Comparison of vertical profiles V_y , obtained by PIV and LDV methods: $Q = 10 \text{ m}^3/\text{h}$ (a); $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ (b)

Заключение

Представлены результаты исследования гидродинамических характеристик процессов, протекающих в тройниковых соединениях с тупиковым ответвлением. Конструктивное исполнение сменного исследуемого участка позволило применить системы лазерной анемометрии для определения скоростей в различных сечениях как вертикального, так и горизонтального каналов. На основе экспериментальных данных метода PIV получены осредненные по времени поля скорости для различных зон тупикового ответвления. Построены вертикальные и горизонтальные профили вертикальной компоненты скорости V_y при различных режимах. Достоверность полученных данных проверена проведением дублирующих измерений методом LDV. Наблюдаемые расхождения могут быть объяснены различиями в принципе действия и количестве предоставляемых для построения профилей данных. Полученные данные планируется использовать для валидации CFD-расчетов при дальнейшем изучении процессов в соединениях типа *Dead Leg*.

Библиографический список

1. **Rahmani, L.** SPX significant events and whether it would have happened on EFR / L. Rahmani, S. Dechelette, C. Bandini // Unusual occurrences during LMFR operation: Proceedings of a Technical Committee meeting held in Vienna, 9-13 November 1998. – 1998. – Pp. 57-100.
2. **Angele, K.** NEA/OECD benchmark-experiment for the validation of CFD for mixing and thermal fatigue in T-junction dead leg flows / K. Angele, R. Howard, P. Veber [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2024. – Vol. 417. – Article 112813. – DOI 10.1016/j.nucengdes.2024.112813.

References

1. Rahmani L., Dechelette S. and Bandini C. 1998. “SPX Significant Events and Whether It Would Have Happened on EFR”. In Unusual Occurrences during LMFR Operation: Proceedings of a Technical Committee Meeting Held in Vienna, 9-13 November, 1998, 57-100.
2. Angele, K., Howard R., Veber P. [et al.]. 2024. “NEA/OECD Benchmark-Experiment for the Validation of CFD for Mixing and Thermal Fatigue in T-Junction Dead Leg Flows”. *Nuclear Engineering and Design* 417: 112813. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.112813>.

Дата поступления
в редакцию: 20.06.2025

Дата принятия
к публикации: 09.09.2025

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
СТРУЙНОГО СМЕШЕНИЯ В УПРОЩЕННОЙ ГЕОМЕТРИИ
НИЖНЕГО СОБИРАЮЩЕГО КОЛЛЕКТОРА ВТГР**

Д.Д. Курицин

ORCID: **0000-0001-9384-6950** e-mail: **d.d.kuritsin@yandex.ru**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.А. Добров

ORCID: **0000-0001-7363-8791** e-mail: **dobrov@nntu.ru**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Д.В. Доронков

ORCID: **0000-0003-0668-4215** e-mail: **nevid000@mail.ru**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.А. Маринин

ORCID: **0009-0000-7166-067X** e-mail: **marini.01@mail.ru**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Д.С. Николаев

ORCID: **0000-0003-2244-4780** e-mail: **nikolaevdanil_ft@mail.ru**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

А.В. Рязанов

ORCID: **0000-0002-4951-8930** e-mail: **a_v_ryazanov@mail.ru**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

М.А. Легчанов

ORCID: **0000-0002-6195-3804** e-mail: **legchanov@nntu.ru**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлены расчетно-экспериментальные исследования смешения параллельных струй в упрощенной модели нижнего собирающего коллектора высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР). Проведена валидация RANS-моделей турбулентности с использованием экспериментальных данных, полученных методом лазерной допплеровской анемометрии на модели с пятью подводящими каналами. Численное моделирование выполнено в ANSYS CFX при стационарной постановке с применением четырех моделей турбулентности: SST, SSG, BSL RSM и BSL EARSM. Расчетная сетка создавалась автоматически из тетраэдрических элементов с локальным сгущением в областях высокого градиента скорости и вихревого течения, что обеспечило необходимое разрешение потоковых структур. Экспериментальные данные позволили построить картограммы скоростей и провести сравнение с численными результатами. Модели BSL EARSM и BSL RSM продемонстрировали

наилучшее совпадение с экспериментом по величине и структуре вертикальных и горизонтальных компонент скорости, обеспечив относительную погрешность менее 20 %. Модели SST и SSG показали значимые отклонения в ряде зон.

Полученные результаты подтверждают высокую прогностическую способность моделей BSL EARSM и BSL RSM при воспроизведении структур смешения и рециркуляции струй в нижнем коллекторе ВТГР и могут быть рекомендованы для дальнейшего применения в численных расчетах.

Ключевые слова: высокотемпературный газоохлаждаемый реактор; нижний собирающий коллектор; струйное смешение; численное моделирование; валидация; модель турбулентности; лазерная доплеровская анометрия.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Курицын, Д.Д. Расчетно-экспериментальные исследования струйного смешения в упрощенной геометрии нижнего собирающего коллектора ВТГР / Д.Д. Курицын, А.А. Добров, Д.В. Доронков, А.А. Маринин, Д.С. Николаев, А.В. Рязанов, М.А. Легчанов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 68-78. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_68 EDN: VRSEJT

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF JET MIXING IN SIMPLIFIED GEOMETRY OF HIGH-TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR

D.D. Kuritsin

ORCID: **0000-0001-9384-6950** e-mail: **fomius.kisik@gmail.com**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Dobrov

ORCID: **0000-0001-7363-8791** e-mail: **dobrov@nntu.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

D.V. Doronkov

ORCID: **0000-0003-0668-4215** e-mail: **nevid000@mail.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Marinin

ORCID: **0009-0000-7166-067X** e-mail: **marini.01@mail.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

D.S. Nikolaev

ORCID: **0000-0003-2244-4780** e-mail: **nikolaevdaniel_ft@mail.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Ryazanov

ORCID: **0000-0002-4951-8930** e-mail: **a_v_ryazanov@mail.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.A. Legchanov

ORCID: **0000-0002-6195-3804** e-mail: legchanov@nntu.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper presents numerical and experimental investigations of parallel jet mixing in a simplified model of the lower plenum of a high-temperature gas-cooled reactor (HTGR). The aim of the study was to verify RANS turbulence models using experimental data obtained by laser Doppler anemometry on a physical model with five inlet channels. Numerical simulations were performed in ANSYS CFX under steady-state conditions using four turbulence models: SST, SSG, BSL RSM and BSL EARSM. The computational grid was generated automatically using tetrahedral elements with local refinement in regions of high velocity gradients and vortex structures to ensure sufficient resolution of flow features. Experimental data enabled the construction of velocity maps and comparison with numerical results. The BSL EARSM and BSL RSM models demonstrated the best agreement with experimental data in both magnitude and structure of vertical and horizontal velocity components, providing relative errors below 20%. The SST and SSG models showed significant deviations in several zones.

The results confirm the high predictive capability of the BSL EARSM and BSL RSM models in reproducing mixing and recirculation structures in the HTGR lower plenum and support their application in further CFD studies.

Key words: high-temperature gas-cooled reactor; lower plenum; jet mixing; numerical modeling; validation; turbulence model; laser Doppler anemometry.

FOR CITATION: D.D. Kuritsin, A.A. Dobrov, D.V. Doronkov, A.A. Marinin, D.S. Nikolaev, A.V. Ryazanov, and M.A. Legchanov. Numerical and experimental investigation of jet mixing in simplified geometry of high-temperature gas-cooled reactor. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 68-78.

DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_68 EDN: VRSEJT

Введение

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) все чаще рассматриваются как универсальный источник тепла для задач, выходящих за рамки традиционной электроэнергетики. Благодаря возможности работы при температурах свыше 800 °C, такие установки подходят для промышленных процессов, включая водородное производство и тепловое обеспечение химических циклов [1-2].

Одной из приоритетных задач при создании проекта ВТГР является расчетно-экспериментальное обоснование теплотехнической надежности и ресурсных характеристик конструктивных элементов реакторной установки [3]. Особое внимание при этом необходимо уделять нижнему собирающему коллектору, в котором происходит смешение потоков гелиевого теплоносителя, выходящих из активной зоны.

В типовой схеме ВТГР теплоноситель перемещается сверху вниз: из верхней камеры через активную зону, образованную призматическими графитовыми тепловыделяющими сборками (ТВС), и далее в нижний собирающий коллектор, откуда поступает в главный газоход [4]. Неравномерность энерговыделения по радиусу приводит к тому, что в коллектор поступают струи гелия с различной температурой. При ограниченном объеме и времени перемешивания в нижнем собирающем коллекторе формируется тепловая стратификация – температурная неравномерность, способная вызывать термические напряжения и снижать ресурс элементов конструкции. Для прогнозирования гидродинамической картины в подобных условиях широкое распространение получил метод вычислительной гидродинамики (CFD), позволяющий численно моделировать течения в реакторных системах. Основанный на численном решении уравнений Навье-Стокса, метод CFD позволяет получить гидродинамическую картину течения в моделируемой области.

Точность и достоверность CFD-моделирования во многом зависят от комплекса расчетных параметров, среди которых критическую роль играет выбор модели турбулентности. Поскольку каждая модель ориентирована на описание определенного класса течений, ее при-

менение в условиях сложного струйного взаимодействия, характерного для нижнего собирающего коллектора, требует обоснования. Для этого необходима валидация на основе экспериментальных данных, позволяющая оценить степень соответствия численных результатов реальной картине течения.

Эффективным подходом в данном случае является использование упрощенной геометрии – она позволяет локализовать исследуемый эффект и исключить влияние побочных факторов, что облегчает интерпретацию данных и сопоставление результатов [5-6].

Таким образом, целью данной работы является валидация моделей турбулентности в условиях струйного смешения, характерного для нижнего собирающего коллектора ВТГР, на основе сопоставления результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными на упрощенной масштабной модели.

Геометрическая модель объекта исследования

Объектом исследования в настоящей работе является область нижнего собирающего коллектора ВТГР. С целью упрощения была модифицирована исходная геометрия: сокращено число подводящих вертикальных каналов до пяти, исключены опорные элементы активной зоны, а также уменьшена глубина модели до 40 мм, что допустимо с учетом плоской постановки экспериментов. Исключение опорных колонн на данном этапе позволяет провести валидацию модели турбулентного течения, минимизировав влияние локальных зон отрыва потока и дополнительной турбулизации, генерируемых конструкционными элементами. После успешной валидации базовой физики следующим этапом является переход к модели повышенной сложности с включением опорных колонн для оценки их специфического влияния.

Модифицированная геометрия модели имеет следующие габариты: высота – 505 мм, длина – 850 мм. Пять подводящих каналов выполнены с внешним диаметром 54 мм и равномерно расположены с межосевым шагом 72 мм (рис. 1). Конфигурация обеспечивала устойчивое формирование параллельных струй, поступающих в общий объем, что позволяло воспроизвести основные характеристики струйного взаимодействия, характерного для нижнего собирающего коллектора ВТГР.

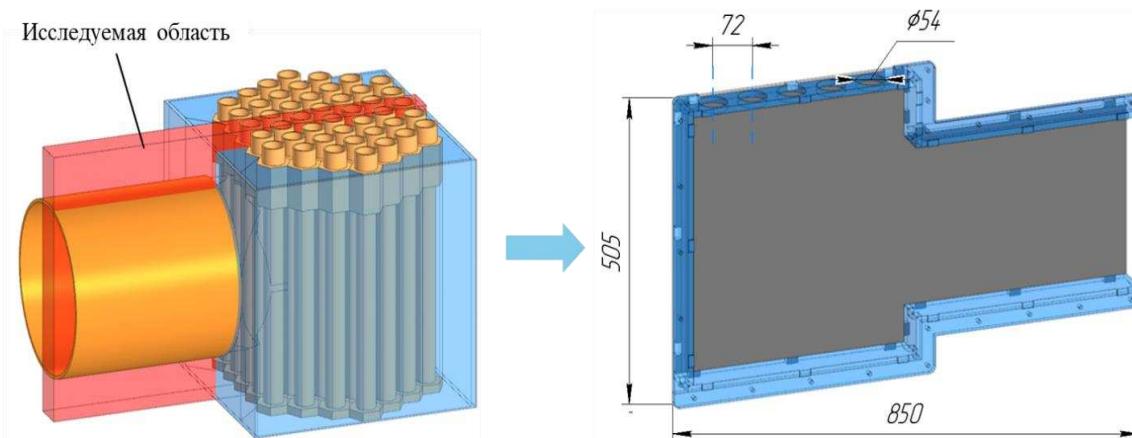


Рис. 1. Геометрическая модель объекта исследования

Fig. 1. Geometric model of the research object

Геометрия данной модели использовалась как в численном моделировании, так и в физическом эксперименте, что обеспечивает корректное сопоставление результатов и достоверность валидации.

Описание методики численного моделирования

Численное исследование процессов струйного взаимодействия в упрощенной модели нижнего собирающего коллектора ВТГР выполнено с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Расчеты проводились в трехмерной постановке на стационарной расчетной сетке. Основное внимание было уделено анализу влияния выбора модели турбулентности на воспроизведение структуры течения и оценку возможности сопоставления с экспериментальными данными. В рамках работы рассмотрены широко применяемые модели турбулентности, основанные на уравнениях, усредненных по Рейнольдсу (RANS): SST (Shear-Stress Transport), SSG, BSL RSM и BSL EARSM. Каждая из моделей использует различные физико-математические подходы к описанию турбулентного потока, что обуславливает вариативность результатов моделирования.

Для расчетного моделирования были выбраны четыре модели турбулентности, различающиеся по сложности и учету анизотропии турбулентного течения. SST-модель основана на гибридизации подходов $k-\epsilon$ и $k-\omega$ и предполагает изотропное перемешивание (гипотеза Буссинеска), что ограничивает ее применимость в зонах рециркуляции, однако обеспечивает стабильность расчета и невысокую вычислительную нагрузку. Модели BSL RSM и BSL EARSM относятся к классу RANS-моделей с расчетом тензора Рейнольдсовых напряжений, что позволяет описывать анизотропные эффекты, характерные для зон взаимодействия струй. В BSL EARSM применяется алгебраическая аппроксимация, тогда как BSL RSM решает полный набор уравнений, обеспечивая более высокую точность. SSG-модель аналогична BSL RSM, но дополнительно включает уточненное моделирование давления-деформации, что повышает точность в условиях сильных градиентов, однако требует больших ресурсов и аккуратного выбора расчетных параметров.

Генерация расчетной сетки выполнена автоматизированным методом с использованием тетраэдрических элементов. По результатам предварительных расчетов были выделены области с интенсивными градиентами скорости и вихревыми структурами, в которых впоследствии была произведена локальная детализация расчетной сетки. Основные характеристики итоговой расчетной сетки приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Параметры расчетной сетки
Table 1.
Computational grid parameters

Характеристика	Величина
Базовый размер элементарной ячейки, м	$4 \cdot 10^{-3}$
Толщина первого призматического слоя, м	$2 \cdot 10^{-5}$
Максимально число призматических слоев	15
Коэффициент роста толщины по слоям	1,2
Базовый размер элементарной ячейки в области измельчения, м	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Суммарное количество расчетных узлов	3131086
Суммарное количество расчетных элементов	10009412

Серия CFD-расчетов была выполнена в стационарной постановке без учета нагрева рабочей среды по мере ее прохождения через экспериментальную модель. Параметры воздуха были взяты при температуре 22°C и атмосферном давлении ($\rho = 1,195 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\mu = 1,831 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$).

Описание исследовательского стенда и методики экспериментальных исследований

Для валидации численной модели использовались экспериментальные данные, полученные на лабораторной установке (рис. 2). В качестве рабочей среды использовался воздух.

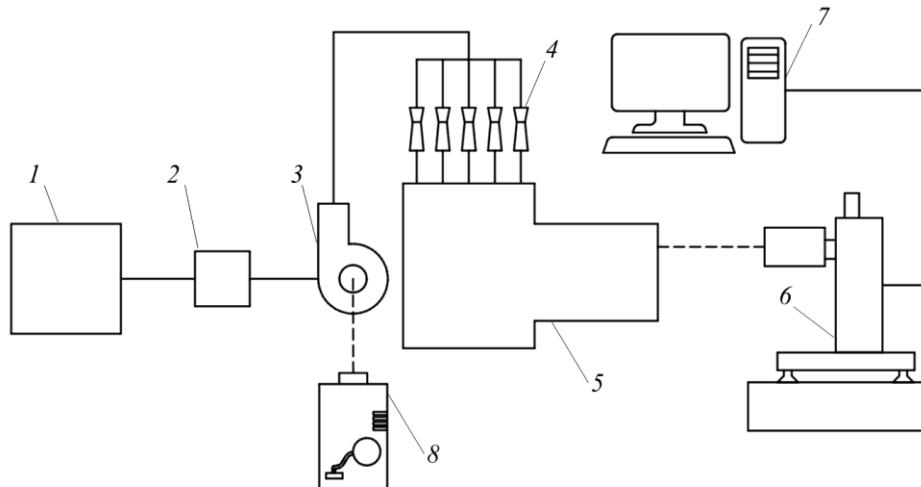


Рис. 2. Схема исследовательского стенда для изучения смешения параллельных струй с выходом в общий коллектор:
 1 – источник трехфазной сети; 2 – преобразователь частоты; 3 – вентилятор;
 4 – трубы Вентури; 5 – экспериментальная модель;
 6 – лазерная доплеровская измерительная система; 7 – ЭВМ; 8 – генератор дыма

Fig. 2. Schematic diagram of a research facility for studying the mixing of parallel jets with an outlet into a common plenum:
 1 – three-phase source; 2 – frequency converter; 3 – fan; 4 – Venturi tubes; 5 – experimental model;
 6 – laser Doppler measurement system; 7 – computer; 8 – smoke generator

Контроль расхода в подводящих каналах осуществлялся с помощью расходомеров, сконструированных по принципу трубы Вентури. Измерительные элементы были изготовлены методом послойной FDM-печати и прошли индивидуальную тарировку. Конструкция включала входной участок, сужающуюся горловину с отбором статического давления и диффузор, обеспечивающий восстановление потока с минимальными потерями. Сравнение результатов, полученных с использованием поверенного анемометрического расходомера VA 520 CS INSTRUMENTS и трубок Вентури, показало расхождение, не превышающее 3 %.

Для получения данных о гидродинамической структуре струйного взаимодействия в области перемешивания применялась лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС) «ЛАД-08А», обеспечивающая бесконтактные измерения локальных компонент скорости с высокой точностью. Метод основан на регистрации доплеровского сдвига частоты света, рассеянного частицами-трассерами в зоне пересечения когерентных лазерных пучков. Засев потока трассирующими частицами осуществлялся с использованием генератора аэрозольного дыма, установленного на входе вентилятора. В качестве трассеров использовались частицы диаметром до 5 мкм, формируемые из глицеринсодержащей жидкости.

Для исследования процесса смешения струй рабочей среды в упрощенной модели нижнего собирающего коллектора была разработана сетка измерительных точек, расположенных в плоскости симметрии экспериментальной модели. Каждая точка предусматривала измерение двух компонент скорости. Шаг расположения точек измерения составил 10 мм, что обеспечило возможность фиксации вихревых структур, формирующихся при взаимодействии потоков. Для оптимизации обработки экспериментальных данных точки были сгруппированы в ячейки трех типов с различной конфигурацией: 10×10, 10×13 и 10×7. Общее количество ячеек

достигло 25, а суммарное число измерительных точек – 2720. Такое разделение позволило систематизировать данные без потери детализации, сохранив информацию о пространственном распределении скорости.

Сопоставление численных и экспериментальных результатов

В качестве определяющего критерия подобия при выборе расхода использовалось число Фруда. Численные и экспериментальные исследования выполнялись при одинаковой среднерасходной скорости 13,4 м/с, заданной во всех пяти подводящих каналах модели.

По результатам экспериментальных и численных исследований были построены картограммы распределения вертикальной и горизонтальной проекции скорости потока рабочей среды в среднем сечении модели (рис. 3-4).

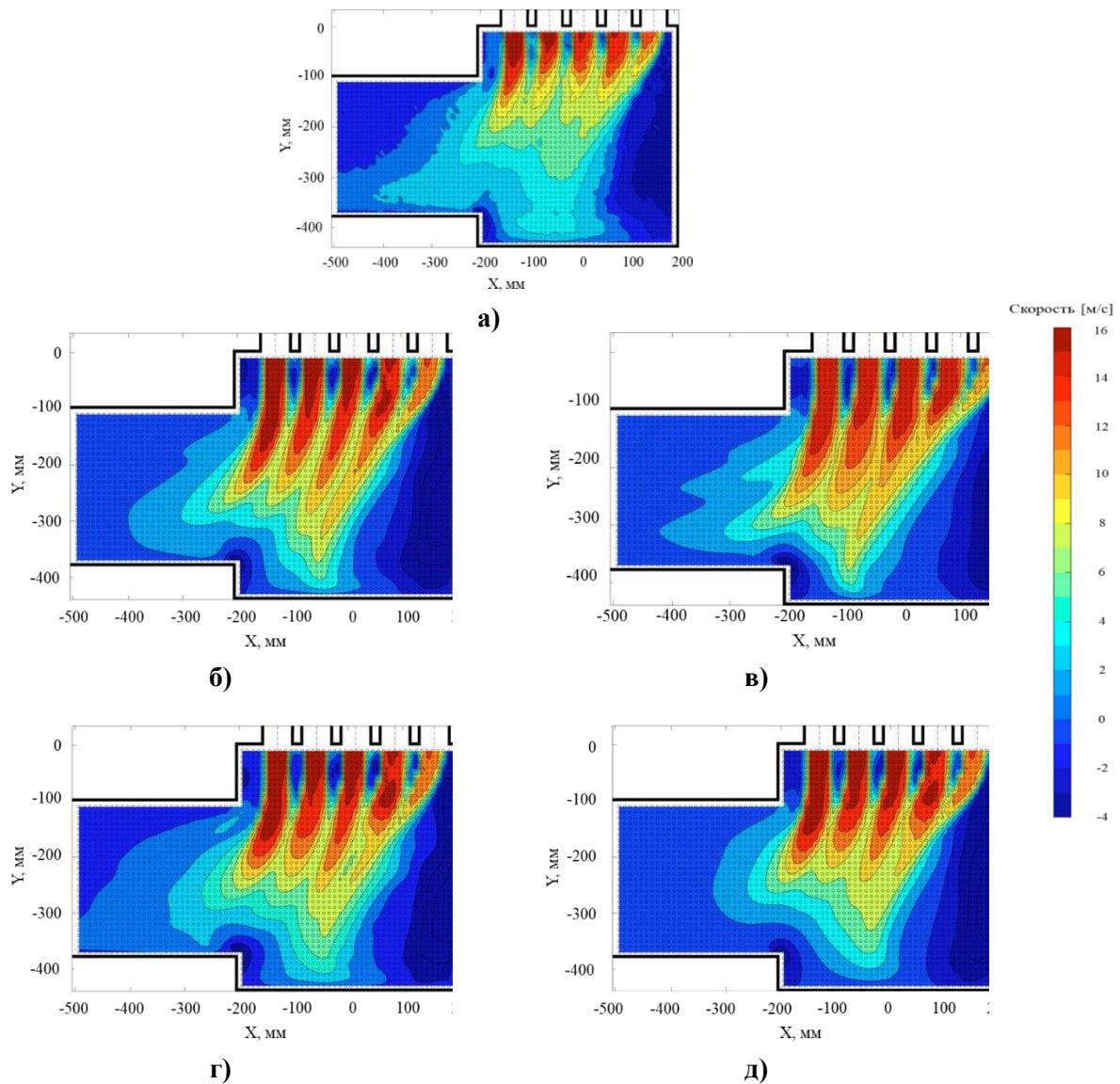


Рис. 3. Распределение вертикальной проекции скорости:
а) эксперимент; б) SST-модель; в) SSG-модель; г) BSL RSM-модель; д) BSL EARSM-модель

Fig. 3. Distribution of the vertical projection of velocity:
a) experiment; б) SST model; в) SSG model; г) BSL RSM model; д) BSL EARSM model

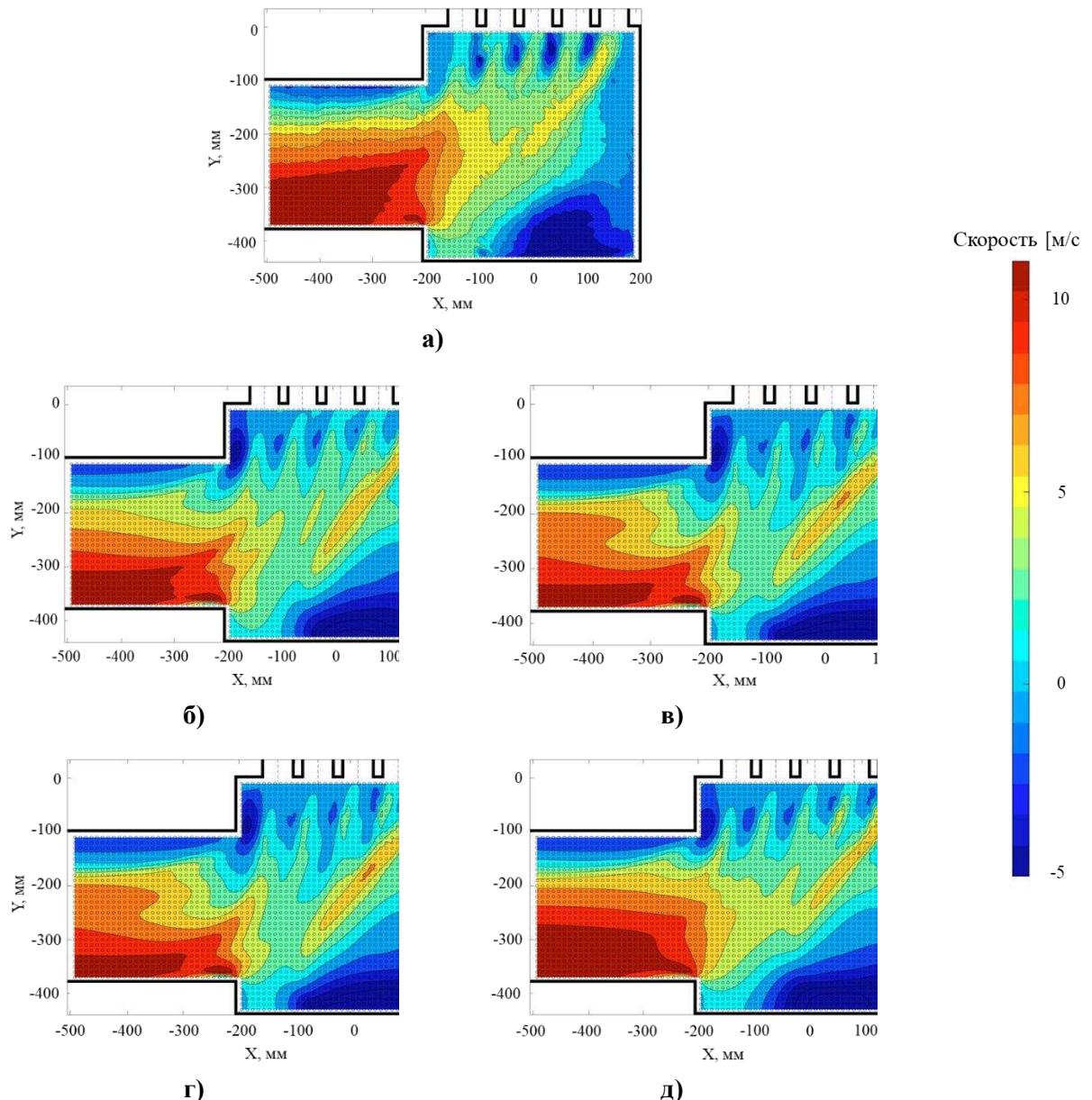


Рис. 4. Распределение горизонтальной проекции скорости:
 а) эксперимент; б) SST-модель; в) SSG-модель; г) BSL RSM-модель; д) BSL EARSM-модель

Fig. 4. Distribution of the horizontal projection of velocity:

a) experiment; б) SST model; в) SSG model; г) BSL RSM model; д) BSL EARSM model

Полученные картограммы скорости позволяют проследить явно выраженный вихрь, расположенный в нижней части коллектора. Вихревая структура в данной зоне имеет форму деформированного эллипса. Верхняя часть коллектора смешения имеет завихрения произвольной формы между осями подводящих трубопроводов. Область газохода имеет явно выраженный вихрь, расположенный в верхней его части.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что модели BSL EARSM и BSL RSM обеспечивают наилучшее совпадение как по форме, так и по величинам вертикальной и горизонтальной компонент скорости. В области взаимодействия струй вертикальная составляющая в эксперименте составляет 6-10 м/с, тогда как расчеты с использованием указанных моделей дают значения в пределах 6-12 м/с. В нижней части коллектора, где скорость направлена против основного потока, расхождения также минимальны (до ± 2 м/с).

В горизонтальной плоскости точность численного воспроизведения распределения скорости варьируется в зависимости от зоны: вблизи стенок на входе в коллектор расчетные модели переоценивают значения скорости, тогда как в центральной области наблюдается хорошее соответствие с экспериментальными данными. Наилучшее совпадение с экспериментом демонстрируют модели BSL EARSM и SST. В газоходе расчетные данные в целом соответствуют эксперименту. Все модели правильно описывают нисходящий градиент скорости, однако наилучшее количественное соответствие по вертикальной и горизонтальной компонентам достигается при использовании BSL RSM. Для количественной оценки точности численного моделирования проведен сопоставительный анализ значений результирующей скорости, определенной на основе горизонтальной и вертикальной составляющих потока, в ряде контрольных точек, распределенных по характерным зонам течения (рис. 5).

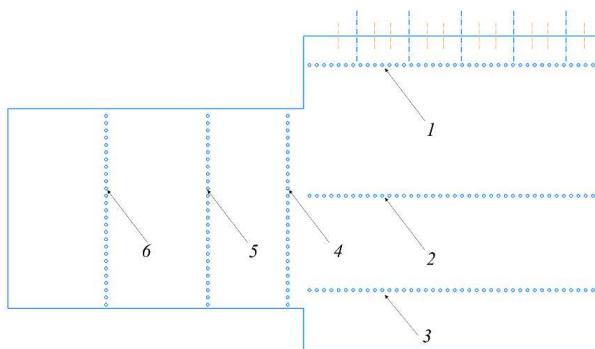


Рис. 5. Контрольные точки сравнения значений результирующей скорости:

- 1) область входа струй в коллектор;
- 2) область смешения струй;
- 3) область нижней части коллектора;
- 4) область входа потока в газоход;
- 5) область середины газохода;
- 6) область выхода потока из газохода

Fig. 5. Control points for comparison of resulting velocity values:

- 1) area of jet entry into the plenum;
- 2) jet mixing area;
- 3) lower part of the plenum area;
- 4) flow entry area into the gas duct;
- 5) gas duct middle area;
- 6) gas duct outlet area

В зоне ввода струй (рис 6 а) расчетные значения скорости, как правило, хорошо согласуются с экспериментальными вдоль осей подводящих каналов. При этом в межструйных областях большинство моделей, особенно SST и SSG, демонстрируют систематическое занижение результирующих скоростей. В зоне активного смешения (рис. 6 б) наименьшие отклонения от экспериментальных данных показали модели BSL EARSM и BSL RSM. В рециркуляционных областях (например, в диапазоне координат $X = 150-200$ мм) все модели завышают значения результирующей скорости, что указывает на ограниченность их способности точно воспроизводить вихревую структуру течения.

В нижней части коллектора (рис. 6 в) наблюдаются наибольшие расхождения между экспериментом и расчетами. Все модели демонстрируют завышенные значения скорости, однако наименьшие отклонения вновь отмечены при использовании моделей BSL EARSM и BSL RSM. В зоне газохода (рис. 6 г-е) расчетные данные в целом достоверно описывают структуру потока. Наиболее точное воспроизведение входной области газохода обеспечивается моделью BSL EARSM. В средней и выходной частях газохода адекватное согласование с экспериментом демонстрируют все модели, за исключением SSG, которая показала наибольшее среднеквадратичное отклонение.

Среднее относительное отклонение по всем расчетным точкам составило 16,72 % для модели BSL EARSM и 19,64 % для BSL RSM. Для моделей SST и SSG оно оказалось выше – 20,92 и 22,17 % соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о более высокой прогностической способности моделей BSL EARSM и BSL RSM при численном моделировании струйного смешения и рециркуляционных течений, характерных для нижнего собирающего коллектора ВТГР.

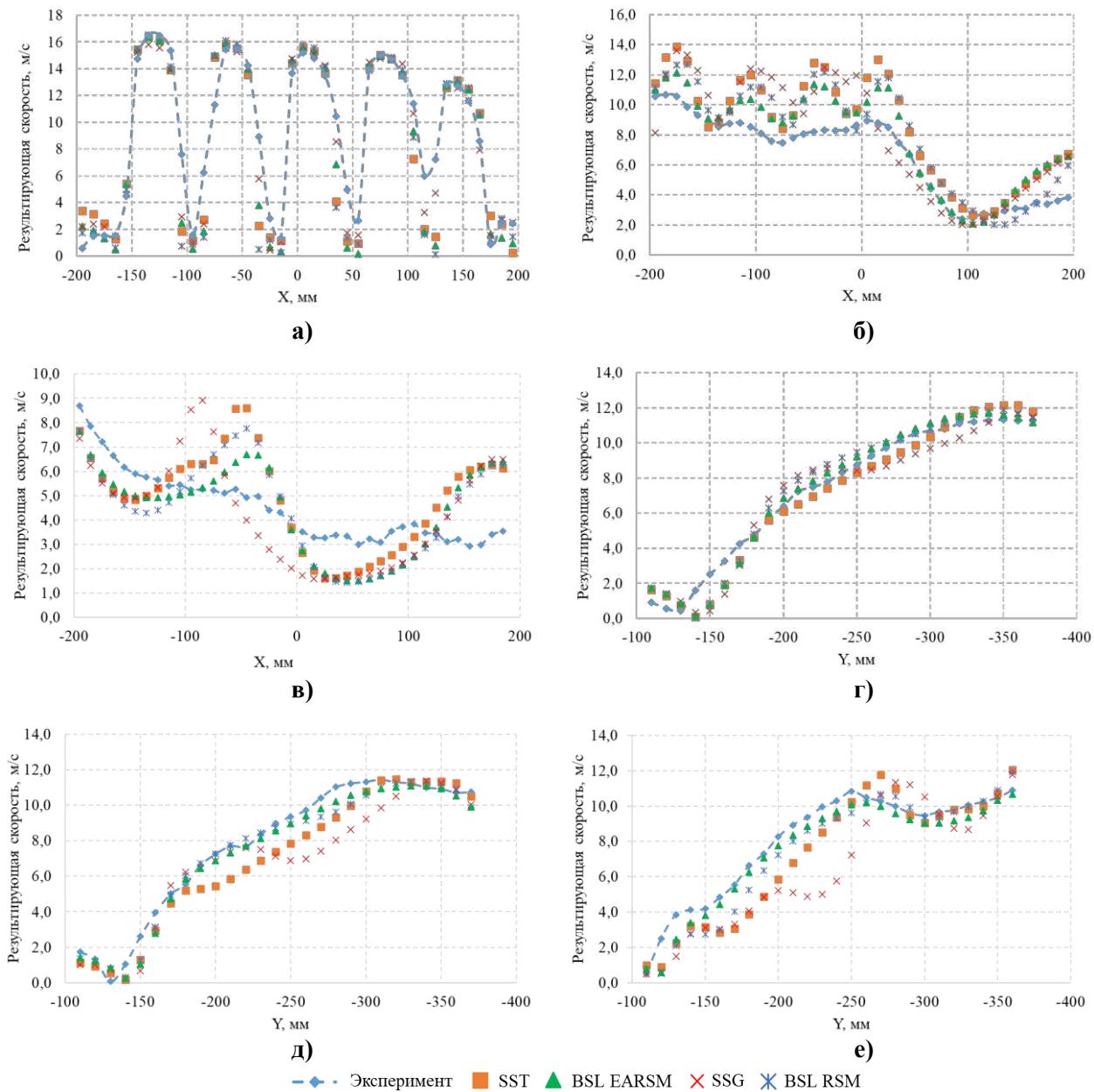


Рис. 6. Значения результирующей скорости по характерным областям:

а) область входа струй в коллектор; б) область смешения струй

в) область нижней части коллектора; г) область входа потока в газоход;

д) область середины газохода; е) область выхода потока из газохода

Fig. 6. Values of the resulting velocity for characteristic areas:

a) area of jet entry into the plenum; б) jet mixing area; в) lower part of the plenum area;

г) gas duct entry area; д) gas duct middle area; е) gas duct outlet area

Заключение

Полученные результаты подтверждают применимость моделей BSL EARSM и BSL RSM для воспроизведения характерных особенностей струйного взаимодействия в нижнем собирающем коллекторе ВТГР, включая формирование вихревых структур и областей со встречным движением потока. Представленные данные могут быть использованы проектными и расчетными подразделениями АО «ОКБМ Африкантов» при моделировании теплогидравлических процессов в элементах активной зоны и нижнего собирающего коллектора ВТГР.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2024-0003).

Библиографический список

1. **Головко, В.Ф.** Выбор конфигурации ядерного энергоисточника на основе ВТГР для технологического применения / В.Ф. Головко, И.В. Дмитриева, А.В. Рязанов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2022. – № 2 (137). – С. 44 -57.
2. **Гребенник, В.Н.** Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы – инновационное направление развития атомной энергетики / В.Н. Гребенник, Н.Е. Кухаркин, Н.Н. Пономарев-Степной – М.: Атомэнергоиздат, 2008. – 135 с.
3. **Фатеев, С.А.** Развитие технологий атомно-водородной энергетики в Госкорпорации «Росатом» / С.А. Фатеев, В.В. Петрунин, Г.Н. Кодочигов [и др.] // Атомная энергия. – 2022. – Т. 133. Вып. 5-6. – С. 243-250.
4. **Петрунин, В.В.** Ядерные энергетические установки с высокотемпературными модульными газоохлаждаемыми реакторами. В 2-х т. Под общей ред. Н.Н. Пономарева-Степного / В.В. Петрунин, Н.Г. Кодочигов, С.М. Дмитриев [и др.]. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – 745 с.
5. **Landfried, D.T.** Design of a Unit Cell Facility for Studies of the Prismatic VHTR Lower Plenum / D.T. Landfried [et al.] // Department of Mechanical Engineering and Material Science. – 2015. – P. 13.
6. **Hugh, M.** Measurement of Flow Phenomena in a Lower Plenum Model of a Prismatic Gas-Cooled Reactor / M. Hugh, Jr. McIlroy [et al.] // Proceedings of the 16th International Conference on Nuclear Engineering. – Idaho National Laboratory, Idaho. – 2008. – Pp. 10.

References

1. Golovko V.F., Dmitrieva I.V. and Riazanov A.V. 2022. “Vybor konfiguratsii iadernogo energoistochnika na osnove VTGR dlja tekhnicheskogo primeneniia” [Selection of a Nuclear Power Source Configuration Based on HTGR for Technological Application]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University], no. 2 (137): 44-57.
2. Grebennik V.N., Kukharkin N.E. and Ponomarev-Stepnoi N.N. 2008. *Vysokotemperaturnye gazookhlaždaemye reaktory – innovatsionnoe napravlenie razvitiia atomnoi energetiki* [High-Temperature Gas-Cooled Reactors – An Innovative Direction for Nuclear Power Development]. Moscow: Atomenergoizdat.
3. Fateev S.A., Petrunin V.V., Kodochigov G.N. [et al.]. 2022. “Razvitiie tekhnologii atomno-vodorodnoi energetiki v Goskorporatsii “Rosatom”” [Development of Nuclear-Hydrogen Energy Technologies in the State Corporation “Rosatom”]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 133 (5–6): 243-250.
4. Petrunin, V. V., Kodochigov, N. G., Dmitriev S. M. [et al.], eds. 2018. *Iadernye energeticheskie ustanovki s vysokotemperaturnymi modul'nymi gazookhlaždaemyimi reaktorami* [Nuclear Power Plants with High-Temperature Modular Gas-Cooled Reactors]. 2 vols. Nizhnii Novgorod: NGTU im. R.E. Alekseeva.
5. Landfried, D.T. [et al.]. 2015. “Design of a Unit Cell Facility for Studies of the Prismatic VHTR Lower Plenum”. *Department of Mechanical Engineering and Material Science*, 13.
6. McIlroy, Hugh M., Jr. [et al.]. 2008. “Measurement of Flow Phenomena in a Lower Plenum Model of a Prismatic Gas-Cooled Reactor”. In *Proceedings of the 16th International Conference on Nuclear Engineering*, 10. Idaho National Laboratory, Idaho.

*Дата поступления
в редакцию: 24.07.2025*

*Дата принятия
к публикации: 27.09.2025*

ВАРИАНТЫ СИСТЕМЫ ОТВОДА ТЕПЛА РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК С ТЯЖЕЛЫМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Р.В. Сумин

ORCID: 0009-0005-3003-8784 e-mail: rom.sumin@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

М.Д. Погорелов

ORCID: 0009-0004-7325-6805 e-mail: md.pogorelov@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Т.К. Зырянова

ORCID: 0000-0002-5336-3556 e-mail: ats@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

С.В. Колосов

ORCID: 0009-0007-3238-6592 e-mail: kolosovs.nn@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Д.С. Шалина

ORCID: 0009-0009-8254-3669 e-mail: daria-sh@list.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрены варианты отвода тепла от ядерных энергетических установок с тяжелым жидкокометаллическим теплоносителем. Проведен анализ конструктивных особенностей и эксплуатационных характеристик парогенераторов ядерных паропроизводящих установок атомных подводных лодок, охлаждаемых свинец-висмутовым теплоносителем, а также перспективных реакторных установок со свинцовым теплоносителем типа БРЕСТ, предназначенных для генерации электроэнергии. Предложена конструкция и схема водо-воздушного теплообменника, работающего при давлении, близком к атмосферному, и теплообменника для экспериментальных контуров. Данная конструкция не требует применения сложных систем с водой под давлением, а также исключает затвердевание жидкокометаллического теплоносителя. Показаны характеристики теплообменных поверхностей, а также параметры греющей (жидкий металл) и рабочей (вода/пар, воздух) сред для систем отвода тепла от активных зон реакторов. Изложенный опыт проектирования данных видов теплообменников может стать основой для дальнейшего проектирования и совершенствования систем теплоотвода в ядерных энергетических установках нового поколения.

Ключевые слова: реактор; быстрые нейтроны; тяжелый жидкокометаллический теплоноситель; теплообмен; свинцовый теплоноситель; свинец-висмутовый теплоноситель; парогенератор; отвод тепла; поверхность теплообмена; первый контур.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сумин, Р.В. Варианты системы отвода тепла реакторных установок с тяжелым жидкокометаллическим теплоносителем / Р.В. Сумин, М.Д. Погорелов, Т.К. Зырянова, С.В. Колосов, Д.С. Шалина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 79-92. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_79 EDN: APGPGT

HEAT REMOVAL SYSTEM OPTIONS FOR HEAVY LIQUID METAL COOLANT REACTOR PLANTS

R.V. Sumin

ORCID: **0009-0005-3003-8784** e-mail: rom.sumin@yandex.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.D. Pogorelov

ORCID: **0009-0004-7325-6805** e-mail: md.pogorelov@yandex.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

T.K. Zyryanova

ORCID: **0000-0002-5336-3556** e-mail: ats@nntu.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

S.V. Kolosov

ORCID: **0009-0007-3238-6592** e-mail: kolosovs.nn@yandex.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

D.S. Shalina

ORCID: **0009-0009-8254-3669** e-mail: daria-sh@list.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article discusses options for heat removal from nuclear power plants with heavy liquid metal coolant. The design features and operational characteristics of steam generators of nuclear steam-producing plants of nuclear submarines with lead-bismuth coolant, as well as promising BREST type reactor plants with lead coolant for electricity generation, are analyzed. The design and diagram of a water-air heat exchanger operating at a pressure close to atmospheric pressure and a heat exchanger for experimental circuits are proposed. This design does not require the use of complex pressurized water systems and also eliminates the solidification of the liquid metal coolant. The characteristics of heat exchange surfaces, as well as the parameters of the heating (liquid metal) and working media (water/steam, air) for reactor cores heat removal systems are shown. The presented experience in designing these types of heat exchangers can become the basis for further design and improvement of heat removal systems in new generation nuclear power plants.

Key words: reactor; fast neutrons; heavy liquid metal coolant; heat exchange; lead coolant; lead-bismuth coolant, steam generator; heat removal; heat exchange surface; first circuit.

FOR CITATION: R.V. Sumin, M.D. Pogorelov, T.K. Zyryanova, S.V. Kolosov, and D.S. Shalina. Heat removal system options for heavy liquid metal coolant reactor plants. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 79-92. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_79 EDN: APGPGT

Введение

Реакторные установки с тяжелым жидкокометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) имеют ряд преимуществ по сравнению с существующими реакторными установками. Свинцовый и свинец-висмутовый теплоносители являются химически неактивными по отношению к воздуху и воде. Также они не могут кипеть в реакторных условиях, что исключает аварии с пустотным эффектом реактивности. Эти и другие факторы составляют естественную безопасность реакторной установки в целом. Атомные электростанции с реакторами, активные зоны которых охлаждаются жидкокометаллическими теплоносителями, в общем слу-

чае обладают более высоким коэффициентом полезного действия по сравнению с реакторами с водой под давлением, имея при этом более низкое давление первого контура. Отсутствие сложных систем безопасности, уменьшенная металлоемкость и высокий коэффициент полезного действия реакторных установок с ТЖМТ позволяют достичь более высоких экономических показателей при создании данных типов реакторных установок.

Сегодня в мире уделяется большое внимание разработке реакторов IV поколения, активные зоны которых охлаждаются свинцовыми или свинец-висмутовыми теплоносителями [1]. Парогенераторы являются одним из наиболее важных узлов любой реакторной установки, от характеристик которых зависят безопасность и эффективность в целом. Наша страна имеет большой опыт создания парогенераторов с тяжелым жидкокометаллическим теплоносителем для атомных подводных лодок. В настоящей статье рассмотрены конструкции и параметры парогенераторов с ТЖМТ для атомных подводных лодок и проектируемого на данный момент реактора БРЕСТ-ОД-300. Отдельно рассмотрен теплообменник стенда со свинцовыми теплоносителями ФТ-4, созданного в НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Конструктивные схемы парогенераторов транспортных реакторных установок

Парогенератор МП-2 (рис. 1) состоял из трех автономных секций, отключаемых арматурой как по реакторному контуру, так и по пароводяному контуру. Каждая петля теплообмена включала в себя парогенерирующий теплообменник, сепаратор пара, насос многократной принудительной циркуляции (МПЦ), трубопроводы. Характеристики парогенератора МП-2 показаны в табл. 1.

Таблица 1.
Проектные характеристики парогенератора МП-2 в номинальном режиме

Table 1.
Design characteristics of MP-2 steam generator in nominal mode

Характеристика	Значение
Паропроизводительность, кг/с	26,8
Давление пара в сепараторе, МПа	4,1
Температура перегретого пара, °С	355
Температура питательной воды после подогревателя, °С	100
Температура котловой воды, °С	173
Кратность циркуляции	2
Расход свинец-висмутового теплоносителя, м ³ /с	0,258
Температура теплоносителя, °С	
- на входе	473
- на выходе	254

Конфигурация труб в трубной доске имеет треугольную форму, с шагом между трубами 18 мм. По длине испарительного пучка установлено пять дистанционирующих решеток. По результатам испытаний на заводе-изготовителе ПГ МП-1 было заглушено 25 периферийных труб испарителя. Вокруг испарителя были расположены 122 U-образных труб наружным диаметром 19 мм и толщиной стенки 1,5 мм пароперегревателя в три ряда по окружности с шагом 25 мм. По длине пароперегревательных труб устанавливались три дистанционирующие решетки.

Камера ТЖМТ разделена перегородкой на входную и выходную части. К перегородке примыкала разделительная обечайка, которая образовывала пароперегревательную и испарительную полости свинец-висмутового теплоносителя. В верхней части камеры приваривалась трубная доска и пароводяная камера. Пароводяная камера состояла из наружной и внутренней обечаек, разделенных перегородкой, которые образовывали полости: котловой воды, пароводяной смеси, насыщенного пара, перегретого пара. Уплотнение полостей пароводяной

камеры производилось съемными промежуточными крышками и сильфонными вставками. Пароводяная камера уплотнялась силовой крышкой на никелевой прокладке.

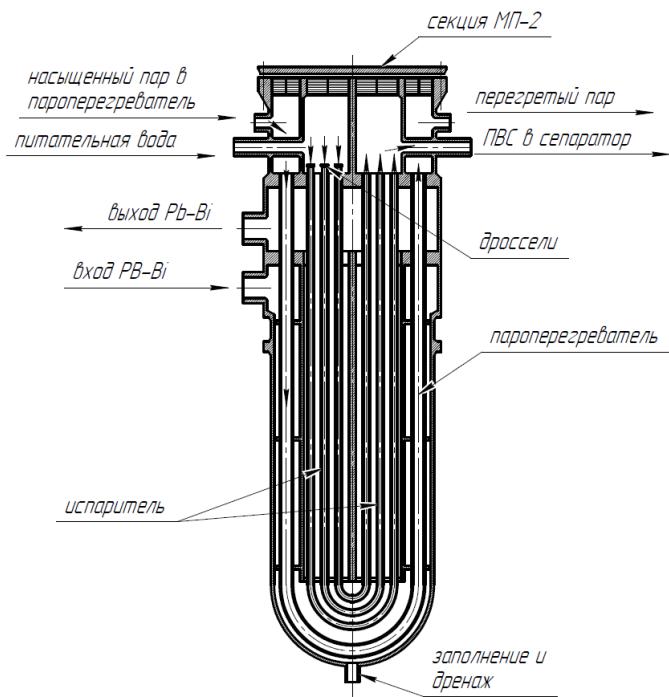


Рис. 1. Конструктивная схема парогенератора МП-2

Fig. 1. Structural diagram of MP-2 steam generator

При эксплуатации ПГ МП-1 на стенде 27/ВТ была обнаружена межконтурная неплотность в периферийных трубах испарителя. Как показал расчетный анализ, причиной течи в трубах была нестабильность гидродинамических характеристик испарительных труб вследствие недостаточного их дросселирования. На основании расчетного анализа, учитывавшего различное тепловосприятие и гидравлическое сопротивление, было внедрено трехзонное дросселирование испарительных труб. Такое же дросселирование было внедрено в парогенераторах МП-2. В последующей эксплуатации течей в трубах испарителя не было.

Для выравнивания температуры трубной доски в конструкции секции под трубной доской был установлен сферический вытеснитель, а со стороны пара (воды) трубная доска защищалась тепловой изоляцией в виде труб наружным диаметром 14 мм, толщиной стенки 1 мм и длиной 440 мм, образующих застойные зоны пара. Во входных участках труб пароподогревателя были установлены чехлы в виде труб наружным диаметром 14 мм, толщиной стенки 1 мм и длиной 1820 мм. Секция МП-2 была изготовлена из стали 1Х18Н9Т. В состав контура МПЦ МП-2 входил сепаратор пара центробежного типа с центральными жалюзи в виде цилиндрического сосуда диаметром 720 мм и высотой 2500 мм. В его верхней части была расположена разделительная камера с тангенциальным подводом пароводяной смеси. Сопловое устройство направляло поток пароводяной смеси на внутренние стенки корпуса. За счет центробежных сил влага стекала по стенкам корпуса вниз, а отсепарированный пар через вертикальные жалюзи попадал в центральную часть и, пройдя через дополнительные жалюзи в верхней части, поступал в пароподогреватель секции МП-2. Сопловое устройство состояло из направляющих лопаток с фигурным профилем, расположенным под углом 25° к горизонту. Вертикальные жалюзи состояли из вертикальных профильных листов, установленных с шагом 3° по окружности. Парогенератор МП-4А (рис. 2) включал в себя три одинаковых секции, каждая из которых состояла из теплообменника – секции МП-4А, сепаратора пара, насоса МПЦ, конденсатора расхолаживания, соединяющих их трубопроводов и арматуры.

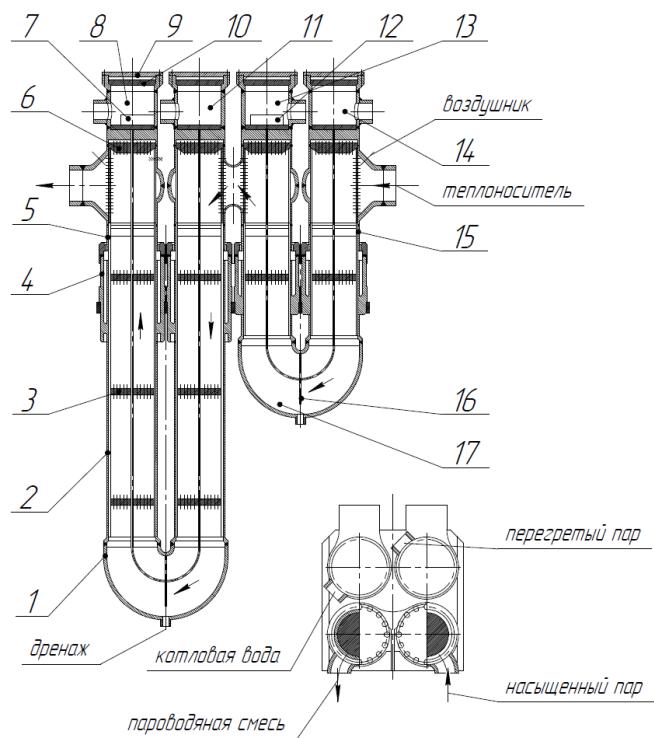


Рис. 2. Конструктивная схема парогенератора МП-4А:

1 – днище испарителя; 2 – вытеснитель; 3 – решетка дистанционирующая; 4 – опора;
 5 – корпус испарителя; 6 – вытеснитель; 7 – дроссельное устройство; 8 – камера котловой воды;
 9 – крышка силовая; 10 – блок биологической защиты; 11 – камера пароводяной смеси;
 12 – тепловая защита; 13 – камера насыщенного пара; 14 – камера перегретого пара;
 15 – корпус пароперегревателя; 16 – дистанционирующая решетка; 17 – днище пароперегревателя

Fig. 2. Structural diagram of MP-4A steam generator:

1 – evaporator bottom; 2 – displacer; 3 – spacer grid; 4 – evaporator body; 6 – displacer;
 7 – throttle device; 8 – boiler water chamber; 9 – power cover; 10 – biological protection unit;
 11 – steam-water mixture chamber; 12 – thermal protection; 13 – saturated steam chamber;
 14 – superheated steam chamber; 15 – superheater body; 16 – spacer grid; 17 – superheater bottom

Секция МП-4А – вертикальный теплообменник, состоящий из двух U-образных корпусов с размещенными в них теплообменными трубами. Один корпус является испарителем, другой – пароперегревателем. Испаритель и пароперегреватель имеют принципиально одинаковую конструкцию и отличаются, в основном, габаритными размерами по высоте. В МП-4А в испарителе были применены трубы наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 2 мм. Шаг между трубами составлял 17 мм. В пароперегревателе трубы наружным диаметром 16 мм и толщиной стенки 2 мм располагались по сторонам равностороннего треугольника с шагом 23 мм. Диаметр корпусов испарителя и пароперегревателя одинаков. Размещение теплообменных поверхностей в двух отдельных U-образных корпусах испарителя и пароперегревателя, соединенных общей камерой теплоносителя, позволило реализовать противоточную схему движения нагревающих и нагреваемых сред. По сравнению с секцией МП-2 увеличилась скорость теплоносителя, применена более теплопроводная сталь для теплообменных труб. Благодаря этому, при тех же параметрах сред, характеристики парогенератора были оптимизированы: получены меньшие поверхности теплообмена, массы сухой и заполненной теплоносителем секции. Масса сухой секции МП-4А составила 5900 кг, а с заполняющими теплоносителем – около 11150 кг. Масса секции МП-2 соответственно была 8360 и 17450 кг. Для шести секций МП-4А уменьшение массы составило около 38000 кг. Теплооб-

менные трубы секции МП-4А заключены в корпусе, состоящем из камер ТЖМТ, цилиндрических корпусов, полуторовых днищ и трубных досок, в которых закреплены трубы. Камеры теплоносителя сферической формы имеют патрубки и горловины, к которым сверху приварены трубные доски пароводяных камер, а снизу цилиндрические корпуса. Камеры теплоносителя имеют горизонтальный разъем, и соединяют при сварке камеры корпуса испарителя и пароперегревателя. Штампованные днища устанавливаются после сборки трубного пучка и соединяют цилиндрические корпуса. В корпусах установлены пластиначатые дистанционирующие решетки, разделяющие трубы в горизонтальной плоскости. Планки перекрещиваются под углом 60° и образуют ромбическую решетку. На гибовых участках труб в днищах дистанционирование выполнено плоскими пластинами в горизонтальном направлении, обеспечивая возможность термических перемещений гибов труб в вертикальном направлении.

Для предотвращения перетечек теплоносителя, помимо трубного пучка и уменьшения его объема, по высоте цилиндрических корпусов установлены вытеснители. На вертикальных участках корпусов вытеснители повторяют наружную конфигурацию трубного пучка. Для предохранения трубной доски от термического воздействия ТЖМТ в верхней части камер под трубными досками установлены вытеснители, выполненные в виде перфорированных дисков. Они создают застойные зоны теплоносителя, которые термостатируют трубные доски, благодаря чему температура трубных досок по всей их толщине соответствует температуре сред, проходящих по теплообменным трубам. В полости, образованной дисками вытеснителей и трубными досками, имеются воздушники камер. На камерах теплоносителя под вытеснителями установлены штуцеры к системе сигнализаторов межконтурной неплотности парогенерирующих труб.

Для удаления эвтектики свинец-висмут из корпусов секции предусмотрены дренажные штуцеры в нижней части днищ. В пароводяных камерах имеются резьбовые отверстия для шпилек крепления силовых крышек. Герметизация камеры осуществляется никелевыми прокладками. Наличие съемных силовых крышек обеспечивает доступ к трубным доскам и внутренним полостям теплообменных труб для проведения работ по диагностике состояния труб и их ремонту. Закрепление труб в трубных досках производилось вальцеванием энергией взрывчатых веществ на всю толщину трубных досок и последующей приваркой к ним труб аргонодуговой сваркой. Для раздачи котловой воды по трубам испарителя, обеспечивающей беспульсационный режим работы испарительных труб осуществлено их дросселирование. Дроссели установлены в каждую трубу через паронитовые прокладки, облицованые фольгой из нержавеющей стали. Ввиду незначительного различия в длинах труб в секции МП-4А выполнено однозонное дросселирование. Корпусные детали секции МП-4А выполнялись из перлитной стали 12Х1МФ. Для теплообменных труб была применена сталь ЭП-79. Характеристики парогенератора МП-4А показаны в табл. 2.

Таблица 2.
Проектные характеристики парогенератора МП-4А в номинальном режиме

Table 2.
Design characteristics of MP-4A steam generator in nominal mode

Характеристика	Значение
Паропроизводительность, кг/с	26,8
Давление пара в сепараторе, МПа	4,1
Температура перегретого пара, °C	350
Температура питательной воды после подогревателя, °C	100
Температура котловой воды, °C	181
Кратность циркуляции	2,1
Температура теплоносителя, °C	
– на входе	430
– на выходе	242

В состав реакторной установки (РУ) атомных подводных лодок проекта 705К входили два парогенератора МП-8М, каждый из которых состоял из теплообменника – секции МП-8М, сепаратора пара, насоса МПЦ, конденсатора расхолаживания, охладителя продувки, соединяющих их трубопроводов и арматуры.

Разработке парогенератора МП-8М предшествовал проект парогенератора МП-7 для реакторной установки проекта 705. В ней применялись три парогенератора, суммарная производительность и параметры пара которых соответствовали парогенератору МП-8М. Первый опытный парогенератор МП-7 был изготовлен и установлен вместе с парогенератором МП-4А на стенде 27/ВТ-5. От штатного парогенератора опытный образец МП-7 отличался конфигурацией корпусов испарителя и пароперегревателя. Штатный парогенератор МП-7 был установлен и эксплуатировался на атомных подводных лодках. Во время эксплуатации парогенератора МП-7 были выявлены конструктивные недостатки, связанные, в основном, с недостаточной вибропрочностью теплообменных труб в условиях высокоскоростных характеристик теплоносителя, ранее не применявшихся в конструкциях, и «слабыми» дистанционирующими элементами. Поэтому в конструкции МП-7 и МП-8 были введены новые специально разработанные дистанционирующие решетки труб, изменены параметры устройств, распределяющих поток теплоносителя по периферии трубных пучков. Внедрено новое надежное уплотнение пароводяных камер.

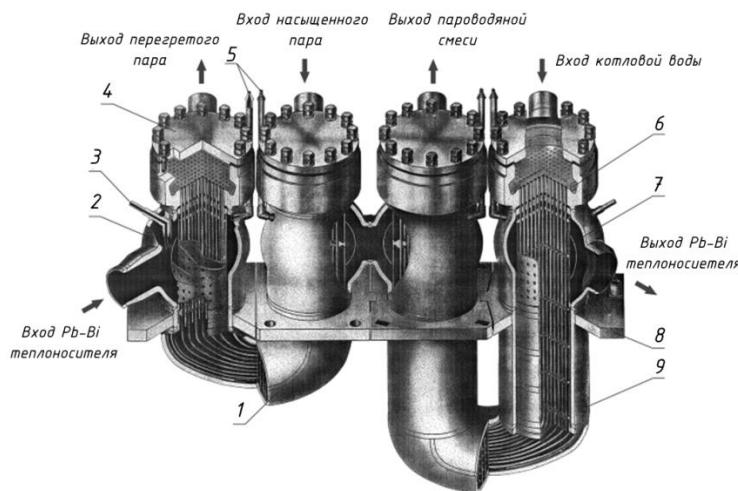


Рис. 3. Конструктивная схема парогенератора МП-8М:

1 – пароперегреватель; 2 – камера теплоносителя; 3 – дренаж; 4 – силовая крышка; 5 – воздушник; 6 – дроссельное устройство; 7 – труба теплообменная; 8 – опора; 9 – испаритель

Fig. 3. Structural diagram of MP-8M steam generator:

1 – superheater; 2 – coolant chamber; 3 – drainage; 4 – power cover; 5 – air release valve; 6 – throttle device; 7 – heat exchange pipe; 8 – support; 9 – evaporator

Модернизированные конструкции парогенераторов получили наименование МП-7М и МП-8М (рис. 3). Они отличались в основном паропроизводительностью, которая была в 1,5 раза больше чем в МП-7М, закреплением корпусов испарителя и пароперегревателя на каркасах их крепления. Принципиальный облик трубных пучков и их крепления, устройств, распределяющих поток теплоносителя, конструкция пароводяных камер, трубопроводов дренажа одинаковы в секциях МП-7М и МП-8М. Характеристики парогенератора МП-8М показаны в табл. 3.

Таблица 3.
Проектные характеристики парогенератора МП-8М в номинальном режиме
Table 3.
Design characteristics of MP-8M steam generator in nominal mode

Характеристика	Значение
Паропроизводительность, кг/с	25
Давление в сепараторе, МПа	4,8
Температура, °C	
– перегретого пара;	420
– питательной воды.	60
Температура теплоносителя, °C	
– на входе в парогенератор;	456
– на выходе из парогенератора.	270
Расход теплоносителя, м ³ /с	0,26

Секция МП-8М – вертикальный теплообменник, состоящий из двух U-образных корпусов с размещенными в них теплообменными трубами. Один корпус является испарителем, другой – пароперегревателем. Испаритель и пароперегреватель имеют аналогичную конструкцию и отличаются, в основном, габаритными размерами по диаметру и высоте. Теплообменные трубы заключены в корпусе, состоящем из камер теплоносителя, цилиндрических корпусов, полуторового днища и трубных досок, в которых закреплены трубы. Камеры теплоносителя сферической формы имеют патрубки и горловины, к которым сверху приварены трубные доски пароводяных камер, а снизу – цилиндрические корпуса. Патрубок выхода теплоносителя пароперегревателя и патрубок входа теплоносителя испарителя камеры соединены сваркой и объединяют оба корпуса секции. Штампованные полуторовые днища устанавливаются после сборки трубного пучка и соединяют цилиндрические корпуса.

Для более равномерного распределения теплоносителя по периметру трубного пучка ось камер теплоносителя смещена относительно оси цилиндрических корпусов в сторону патрубка, а вокруг трубных пучков в камере установлены перфорированные обечайки с профилированными отверстиями. Эти меры снижают скорость теплоносителя на входе в трубный пучок и, соответственно, вибрацию труб от набегающего потока. В пароперегревателе на входе теплоносителя установлены две коаксиальных перфорированных обечайки, в которых для предотвращения прямого воздействия струй теплоносителя на трубы, оси отверстий смещены в горизонтальной плоскости. В корпусах установлены дистанционирующие решетки, выполненные фрезерованием пазов на диске-заготовке для образования планок, разделяющих трубы в горизонтальной плоскости. Пазы фрезеруются с обеих плоскостей диска на глубину более половины его толщины. В плане пазы перекрещиваются под углом 60° и образуют ромбическую решетку, в которой планки соединены в каждом месте перекрещивания. Такие решетки обеспечивают точное и жесткое крепление теплообменных труб в горизонтальной плоскости и свободу взаимных перемещений в вертикальном направлении. Две решетки, помещенные одна над другой, образуют шестигранные ячейки, которые создают дополнительную фиксацию труб в горизонтальной плоскости. Эти решетки установлены на участках входа теплоносителя в корпусах пароперегревателя и испарителя. На участках гиба труб в днищах дистанционирование выполнено плоскими пластинами, которые дистанционируют трубы в горизонтальном направлении, и обеспечивают возможность термических перемещений гибов труб в вертикальном направлении.

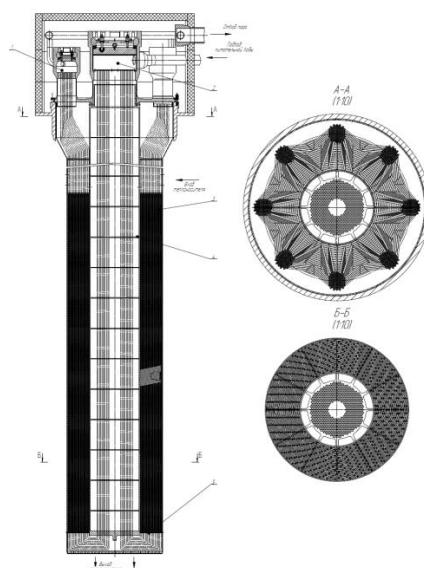
Для предотвращения перетечек свинец-висмутового теплоносителя, помимо трубного пучка и уменьшения его объема, по высоте цилиндрических корпусов установлены вытеснители. На вертикальных участках корпусов вытеснители повторяют наружную конфигурацию трубного пучка. Для снижения воздействия потока на трубный пучок пароперегревателя

часть потока, минуя пучок, поступает через периферийные отверстия в корпусных вытеснителях. Для предохранения трубной доски от термокачек и термоударов теплоносителя в верхней части камер под трубными досками установлены вытеснители, выполненные из двух дисков. Эти вытеснители создают застойные зоны жидкого металла, которые термостатируют трубные доски, благодаря чему температура трубных досок по их толщине соответствует температуре сред, проходящих по теплообменным трубам. Из полости, образованной дисками вытеснителя, теплоноситель отводится в воздушники камер. В случае межконтурной неплотности пар выводится из парогенератора через воздушник, удаляясь затем из контура циркуляции и из объема эвтектики.

Парогенераторы реакторной установки БРЕСТ-ОД-300

В настоящее время в Российской Федерации ведется строительство АЭС с реактором БРЕСТ-ОД-300 на площадке АО «Сибирский химический комбинат» (СХК) в г. Северск Томской области. Проект призван продемонстрировать возможность создания реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем, а также новую технологию по замыканию ядерного топливного цикла на базе смешанного нитридного уран-плутониевого топлива. В дальнейшем планируется создание коммерческого энергоблока БР-1200 на основе опыта создания и эксплуатации данного реактора.

В проекте установки БРЕСТ-ОД-300 [3] применено восемь парогенераторов. Каждый из них входит в состав одной из четырех петель теплообмена реактора БРЕСТ-ОД-300 (рис. 4). В состав каждой петли теплообмена входит два парогенератора.



**Рис. 4. Конструктивная схема прямоточного парогенератора
реакторной установки БРЕСТ-ОД-300:**

1 – камера перегретого пара; 2 – камера питательной воды; 3 – труба теплообменная;
4 – решетка дистанционирующая; 5 – решетка выходная

Fig. 4. Structural diagram of the direct-flow steam generator of the BREST-OD-300 reactor plant:

1 – superheated steam chamber; 2 – feedwater chamber; 3 – heat exchange pipe;
4 – spacer grid; 5 – outlet grid

Компоновка реактора БРЕСТ-ОД-300 включает в себя наличие специальных модулей, в которые объединены различные виды оборудования. При этом каждый модуль имеет поперечные связи с соседними модулями, что за счет перетоков теплоносителя позволяет компенсировать теплоотвод по элементам реакторной установки в аварийных режимах. Пароген-

нератор реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 – это вертикальный прямоточный змеевико-вый теплообменник с относительно малым углом навивки. В межтрубном пространстве находится греющий теплоноситель – жидкий свинец. В трубном пространстве циркулирует питательная вода, переходящая в результате нагрева в пар критических параметров, который поступает на турбоустановку. Для обеспечения безопасной и непрерывной работы реакторной установки в случае течи предусмотрено наличие секционирования теплообменной поверхности.

На элементы любого оборудования с ТЖМТ действуют повышенные вибрационные нагрузки в связи с большой плотностью теплоносителя, поэтому имеется необходимость в фиксации этих элементов. В парогенераторе БРЕСТ-ОД-300 для этих целей выполнена фиксация теплообменных трубок за счет использования дистанционирующих решеток.

Преимуществом змеевикового типа парогенератора являются наличие самокомпенсации температурных расширений конструкционных материалов, а также компактность теплообменника из-за развитой теплообменной поверхности. В табл. 4 показаны характеристики парогенератора реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 [3].

Таблица 4.
Характеристики парогенератора реакторной установки БРЕСТ-ОД-300
Table 4.
Characteristics of the steam generator of the BREST-OD-300 reactor plant

Характеристика	Значение
Тепловая мощность, МВт	175
Паропроизводительность, кг/с	52
Давление пара, МПа	17,0
Температура рабочего тела, °С	
- перегретого пара	505
- питательной воды	340
Температура свинцового теплоносителя, °С	
- на входе в парогенератор	535
- на выходе из парогенератора, около	420

Развитая теплообменная поверхность вдоль вертикальной оси может спровоцировать следующий аварийный сценарий. В результате течи воды в толще свинца происходит резкое вскипание и образование пузырьков пара. Из-за резкого увеличения объема пузырька на конструкции парогенератора действуют ударные нагрузки, при этом на пузырьки пара действует выталкивающая сила, заставляющая их разгоняться. Чем ниже свободного уровня свинца происходит течь, тем выше будет конечная скорость пара на выходе из толщи свинца. Резкое всплытие пузырьков пара может повлечь за собой резкий удар по верхним конструкциям реакторной установки. При этом дистанционирующие решетки теплообменных труб могут разбивать образующиеся паровые пузыри на более мелкие, что уменьшает потенциальную ударную нагрузку. Возможным решением данной проблемы может стать изменение конструкции парогенератора и развитие теплообменной поверхности вдоль горизонтальной оси, что снизит высоту всплытия потенциально образующихся при течи пузырьков пара. На данный момент подробно изучен вопрос возможного волнообразного разрушения теплообменных трубок в результате течи парогенератора. Показано, что волнообразного разрушения трубок парогенератора в результате течи не происходит [4].

На данный момент проведены экспериментальные исследования на 18-трубной модели на стенде «СПРУТ» ГНЦ РФ ФЭИ в обоснование проектных характеристик парогенератора БРЕСТ-ОД-300 [5]: исследованы различные переходные режимы циркуляции, показаны пульсации расхода воды на входе в имитатор парогенератора, изменение коэффициента теплопередачи от времени работы парогенератора, а также распределения температур теплооб-

менных трубок. В НГТУ были проведены исследования теплообмена на стенде ФТ-2Б для модели парогенератора БРЕСТ-ОД-300 в виде коридорного пучка труб [6]. Показаны распределения температур теплообменных трубок, поля скоростей свинца в межтрубном зазоре, зависимости числа Нуссельта от числа Пекле при различных кислородных режимах теплоносителя. В НГТУ также проведены работы по исследованию износостойкости защитных оксидных покрытий стали при большой течи парогенератора [7]. Установлено, что вблизи места течи происходит разрушение оксидных покрытий.

Конструктивные схемы теплообменников для экспериментальных стендов

При работе экспериментальных стендов с ТЖМТ (свинец или свинец-висмут), включающих различные источники тепла (циркуляционные насосы, участки с прямым токовым нагревом и др.), вносимая оборудованием тепловая энергия превышает тепловые потери с поверхности циркуляционного контура в окружающую среду, что создает необходимость в создании специальных теплообменников, отводящих тепло от тяжелого жидкокометаллического теплоносителя. Такие теплообменники могут иметь различную конструкцию, однако усложнение поверхности теплообмена (оребрения, змеевики и др.) ведет к удорожанию конструкции. При этом важной проблемой является выбор теплоносителя и сам способ отвода энергии контуром отвода тепла. Для экспериментальных стендов, задачами создания которых не является исследование теплообмена в парогенераторах, нецелесообразно создание полноценного водяного контура отвода тепла. Также нет необходимости в создании сложных систем отвода тепла с развитыми поверхностями теплообмена и введением дополнительного оборудования, если в этом нет необходимости.

При атмосферном давлении и при стандартных температурах ТЖМТ водяной теплоноситель достаточно быстро догревается до температуры насыщения и переходит в паровую фазу, что сопровождается большим значением отводимой тепловой мощности, и, следовательно, риском переохлаждения ТЖМТ до температуры кристаллизации и самой кристаллизации ТЖМТ на теплообменных поверхностях, что недопустимо. Для предотвращения кипения водяного теплоносителя необходимо повышенное давление в водяном контуре, что требует увеличения толщин стенок теплообменника из-за увеличивающихся нагрузок. Возможным решением по отводу тепла от ТЖМТ и исключением возможности его кристаллизации может быть создание воздушного теплообменника, однако из-за низкой теплоемкости воздуха и малой эффективности теплообмена требуется применение мощных воздуходувок и увеличение поверхности теплообмена, что также сопровождается усложнением конструкции стендов. Сотрудниками НГТУ предложен отвод тепла от контура ТЖМТ водо-воздушной смесью, работающей при давлении, близком к атмосферному. Суть данного метода заключается во введении в воздушный поток, циркуляция которого осуществляется компрессором, капель воды достаточно малого размера. Разбиение струи воды на капли осуществляется с помощью специального устройства (форсунки). Конструкция теплообменника представлена на рис. 5.

Теплообменная поверхность представляет собой четырьк трубы Фильда, обтекаемые потоком ТМЖТ и дистанционированные с помощью решеток. Внутри трубок Фильда осуществляется движение водо-воздушной смеси. При этом теплообменник оснащен системой регулирования расхода воды, воздуха, а также системой измерения температур. Тонкая настройка расхода воды с помощью игольчатого клапана позволяет производить регулирование мощности отвода тепла с требуемой точностью. В режиме нормальной эксплуатации в теплообменнике поддерживается свободный уровень теплоносителя. Теплообменник является разборным для осуществления ревизии стендов. Верхняя крышка уплотняется с ответным фланцем с помощью паронитовой прокладки и прижимается за счет болтовых соединений, а теплообменные трубы герметично приварены к крышке.

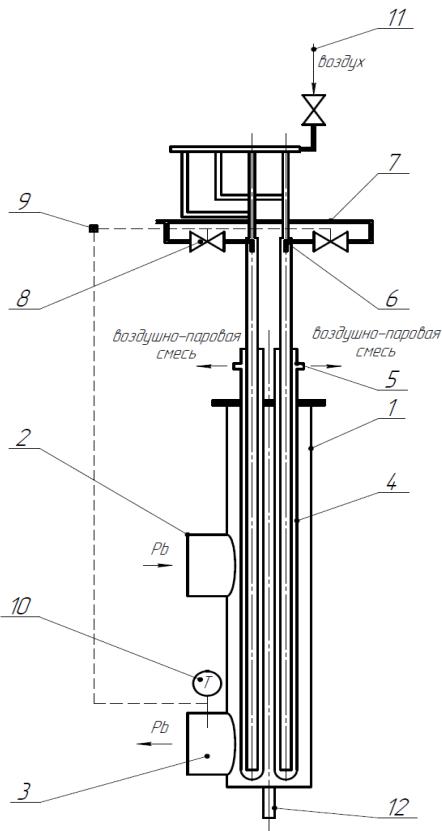


Рис. 5. Охладитель расплава жидкокометаллического теплоносителя:

1 – корпус; 2 – патрубок подвода; 3 – патрубок отвода; 4 – теплообменная поверхность;
 5 – выходной патрубок; 6 – устройство ввода капель; 7 – линия подвода; 8 – регулятор расхода воды; 9 – задатчик температуры; 10 – термопара; 11 – подвод воздуха от компрессора

Fig. 5. Cooler of liquid metal coolant melt:

1 – frame; 2 – supply pipe; 3 – branch pipe; 4 – heat exchange surface; 5 – outlet pipe; 6 – drip injector;
 7 – supply line; 8 – water flow regulator; 9 – temperature setter; 10 – thermocouple;
 11 – air supply from the compressor

К достоинствам данной конструкции и самого способа отвода тепла можно отнести: малое давление контура отвода тепла, что исключает необходимость в применении толстостенных труб; простота конструкции; отсутствие кристаллизации ТЖМТ на поверхностях теплообмена; простота регулирования отводимой мощности, а к ее недостаткам можно отнести накопление отложений со стороны паровоздушной смеси, ухудшающее теплоотдачу. Максимальная отводимая мощность данного теплообменника в ходе экспериментов составила 50 кВт, его работоспособность и эффективность обоснована многолетним опытом работы стенда ФТ-4 НГТУ, в состав которого входит данный теплообменник (стенд испытаний макетов проточной части главного циркуляционного насоса БРЕСТ-ОД-300).

Концептуально данная конструкция и способ отвода тепла могут стать основой для проектирования аварийных систем расхолаживания реакторных установок с ТЖМТ. Подача воды с малым расходом в теплообменник расхолаживания значительно увеличивает мощность отвода тепла, что позволяет уменьшить площадь теплообменной поверхности и снизить металлоемкость.

Заключение

В статье рассмотрена эволюция конструкций парогенераторов с тяжелыми жидкокометаллическими теплоносителями для судовых и стационарных ядерных паропроизводящих установок. Показаны технические характеристики данных теплообменников.

Коллективом НГТУ им. Р.Е. Алексеева предложена и испытана конструкция теплообменника для исследовательских стендов, с помощью которого отводится тепло от контура со свинцовым теплоносителем. Данный теплообменник работает при атмосферном давлении, обеспечивает отсутствие кристаллизации жидкого металла на поверхностях теплообмена, а также обеспечивает относительную простоту эксплуатации. Конструкция обладает относительно низкой металлоемкостью и проста в изготовлении. Опыт создания парогенераторов и теплообменников с тяжелым жидкокометаллическим теплоносителем может быть полезен для конструкторов новых реакторных установок IV поколения, активные зоны которых охлаждаются свинцовым или свинец-висмутовым теплоносителем.

Результаты работы получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2024-0005 «Особенности и специфика применения тяжелых жидкокометаллических теплоносителей в реакторных установках на быстрых нейтронах»).

Библиографический список

1. **Адамов, Е.** Значение новой технологической платформы для ядерной энергетики России / Е. Адамов, А. Каширский // Энергетическая политика. – 2024. – № 6(197). – С. 10-17.
2. **Безносов, А.В.** Технологии и основное оборудование контуров реакторных установок, промышленных и исследовательских стендов со свинцовыми и свинец-висмутовыми теплоносителями / А.В. Безносов, Т.А. Бокова, П.А. Боков. – Н. Новгород: Литера, 2016. – 487 с.
3. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами / под общ. ред. проф. Е.О. Адамова. – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2020. – 502 с.
4. **Абрамов, А.В.** Исследование процессов в свинцовом теплоносителе при нарушении целостности теплообменной трубы парогенератора БРЕСТ-ОД-300 / А.В. Абрамов, Е.О. Ковалев, П.А. Колесников [и др.] // Атомная энергия. – 2015. – Т. 119, № 3. – С. 164-168.
5. **Грабежная, В.А.** Экспериментальное обоснование проектных характеристик парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300 / В.А. Грабежная, А.С. Михеев, А.В. Алехин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2021. – № 2. – С. 218-235.
6. **Безносов, А.В.** Теплогидравлические характеристики потока тяжелого жидкокометаллического теплоносителя при поперечном обтекании пучка труб применительно к РУ С ТЖМТ / А.В. Безносов, М.В. Ярмонов, О.О. Новожилова [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 5(102). – С. 213-225.
7. **Волков, Н.С.** Влияние параметров истечения водяного пара на эрозионный износ оксидных покрытий трубной решетки в среде свинцового теплоносителя / Н.С. Волков, Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, Т.К. Зырянова, Р.В. Сумин, М.Д. Погорелов, С.Е. Шашков // Трение и износ. 2024. – Т. 45. № 6. – С. 541-547.

References

1. Adamov E.O. and Kashirskii A. 2024. "Znachenie novoi tekhnologicheskoi platformy dlja iadernoj energetiki Rossii" [The Significance of a New Technological Platform for Russia's Nuclear Energy]. *Energeticheskaja politika* [Energy Policy], no. 6 (197): 10-17.
2. Beznosov A.V., Bokova T.A. and Bokov P.A. 2016. *Tekhnologii i osnovnoe oborudovanie konturov reaktornyh ustanovok, promyshlennyykh i issledovatel'skikh stendov so svintsovym i svinets-vismutovym teplonositeliami* [Technologies and Main Equipment for Circuits of Reactor Plants, Industrial and Research Facilities with Lead and Lead-Bismuth Coolants]. Nizhnii Novgorod: Litera.
3. Adamov E.O., ed. 2020. *Belaia kniga iadernoj energetiki. Zamknutyi IaTs s bystryimi reaktorami* [White Paper of Nuclear Energy. Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors]. Moscow: NIKIET.
4. Abramov A.V., Kovalev E.O., Kolesnikov P.A. [et al.]. 2015. "Issledovanie protsessov v svintsovom teplonositele pri narushenii tselostnosti teploobmennoi truby parogeneratora BREST-OD-300" [Investigation of Processes in Lead Coolant During Heat-Exchange Tube Failure in the BREST-OD-300 Steam Generator]. *Atomnaia Energiia* [Atomic Energy] 119 (3): 164-168.
5. Grabezhnaya V.A., Mikheev A.S., Alekhin A.V. [et al.]. 2021. "Eksperimental'noe obosnovanie proektnykh kharakteristik parogeneratora RU BREST-OD-300" [Experimental Validation of Design Characteristics for the BREST-OD-300 Reactor Unit Steam Generator]. *Voprosy Atomnoi Nauki i*

-
- Tekhniki. Seriia: Iaderno-Reaktornye Konstanty* [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants], no. 2: 218-235.
6. Beznosov A.V., Yarmonov M.V., Novozhilova O.O. [et al.]. 2013. “Teplogidravlichekie kharakteristiki potoka tiazhelogo zhidkometallicheskogo teplonositelia pri poperechnom obtekaniii puchka trub primenitel'no k RU S TZhMT” [Thermal-Hydraulic Characteristics of Heavy Liquid Metal Coolant Flow During Cross-Flow Around a Tube Bundle Applied to Reactor Plants with HLMC]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev], no. 5 (102): 213-225.
 7. Volkov N.S., Bokova T.A., Meluzov A.G., Zyrianova T.K., Sumin R.V., Pogorelov M.D., and Shashkov S.E. 2024. “Vliianie parametrov istecheniia vodianogo para na erozionnyi iznos oksidnykh pokrytii trubnoi reshetki v srede svintsovogo teplonositelia” [Influence of Water Steam Discharge Parameters on Erosive Wear of Oxide Coatings of Tube Sheet in Lead Coolant Environment]. *Trenie i Iznos* [Journal of Friction and Wear] 45 (6): 541-547.

Дата поступления

в редакцию: 24.06.2025

Дата принятия

к публикации: 27.09.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 623.113

DOI 10.46960/1816-210X_2025_4_93

EDN BQANYJ

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЛИБРОВОЧНОГО ИСПЫТАНИЯ ШЕИ МАНЕКЕНА WORLDSID

Д.А. Жителев

ORCID: 0000-0002-8080-1419 e-mail: daniil.zhitelev@nami.ru

Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»
Москва, Россия

А.И. Рожков

ORCID: 0009-0004-6560-0864 e-mail: aleksandr.rozhkov@nami.ru

Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»
Москва, Россия

Д.Ю. Солопов

ORCID: 0009-0008-5206-327X e-mail: dmitriy.solopov@nami.ru

Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»
Москва, Россия

Представлено моделирование калибровочного испытания шеи антропоморфного манекена WorldSID, применяемого для оценки пассивной безопасности транспортных средств при боковом ударе. Проведена валидация конечно-элементной модели (КЭМ) шеи, находящейся в открытом доступе – первый шаг к созданию комплексной методики расчетов пассивной безопасности. Описана методика построения КЭМ испытательного маятникового стенда, соответствующего требованиям стандарта ISO 15830. Проведено численное моделирование испытания с использованием программных средств LS-DYNA. Результаты расчетов сопоставлены с калибровочными диапазонами и эталонной моделью LSTC. По ряду показателей достигнута сходимость, однако зафиксированы расхождения по максимальному моменту и времени затухания угла поворота головы манекена. Установлено влияние плотности сотового блока и жесткости шеи на результат. Предложены направления доработки модели для повышения соответствия нормативным критериям. Сделан вывод о необходимости дальнейших исследований в области валидации КЭМ манекенов.

Ключевые слова: манекен; калибровочные испытания; шея манекена; WorldSID; моделирование; пассивная безопасность; LS-Dyna.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Жителев, Д.А. Моделирование калибровочного испытания шеи манекена WorldSID / Д.А. Жителев, А.И. Рожков, Д.Ю. Солопов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 93-108. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_93 EDN: BQANYJ

SIMULATION OF WORLDSID DUMMY NECK CALIBRATION TEST

D.A. Zhitelev

ORCID: 0000-0002-8080-1419 e-mail: daniil.zhitelev@nami.ru

Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute NAMI
Moscow, Russia

A.I. Rozhkov

ORCID: **0009-0004-6560-0864** e-mail: aleksandr.rozhkov@nami.ru

Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute NAMI
Moscow, Russia

D.Yu. Solopov

ORCID: **0009-0008-5206-327X** e-mail: dmitriy.solopov@nami.ru

Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute NAMI
Moscow, Russia

Abstract. The article presents a simulation of the neck calibration test of the anthropomorphic WorldSID dummy used to evaluate the passive safety of vehicles in the side impacts scenarios. The first step towards the creation of a comprehensive methodology for calculating passive safety was the validation of a finite element model (FEM) of the neck, which is publicly available. The methodology for constructing a FEM of the pendulum test bench that meets the requirements of ISO 15830 is described. Numerical modeling of the test was carried out using LS-DYNA software. The calculation results are compared with the calibration ranges and the LSTC reference model. Convergence was achieved for a number of indicators, but discrepancies were recorded in the maximum moment and time of attenuation of the head rotation angle. The influence of the honeycomb block density and neck rigidity on the result was established. Directions for improving the model to improve compliance with regulatory criteria are proposed. Further research in the area of validation of dummies FEMs is needed.

Key words: dummy; calibration tests; dummy neck; WorldSID; simulation; passive safety; LS-Dyna.

FOR CITATION: D.A. Zhitelev, A.I. Rozhkov, D.Yu. Solopov. Simulation of WorldSID dummy neck calibration test. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 88-103. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_88 EDN: BQANYJ

Введение

Актуальность вопросов пассивной безопасности транспортных средств неуклонно возрастает в связи с ростом количества автомобилей. По состоянию на 2023 г. число автомобилей в мире составляет 1,4 млрд, что на 12 % больше, чем пять лет назад [1]. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), ежегодно в дорожно-транспортных происшествиях погибает около 1,19 млн чел. [2]. Для объективной оценки уровня пассивной безопасности транспортных средств применяются краш-тесты, в которых используются антропоморфные испытательные устройства – манекены. Эти устройства позволяют количественно оценивать риск получения травм водителем и пассажирами при различных сценариях аварий. Конечно-элементные модели (КЭМ) антропоморфных манекенов являются важнейшим инструментом для численного анализа систем пассивной безопасности. Тем не менее в России отсутствуют систематические исследования, посвященные применению КЭМ манекенов в данной области. Существуют модели манекенов, находящиеся в открытом доступе. Основной их проблемой является обеспечение сходимости результатов моделирования с экспериментом. В связи с этим, нашей задачей является проведение валидации модели манекена, находящейся в открытом доступе, как первого шага к созданию полноценной методологии расчетов пассивной безопасности с использованием виртуальных моделей.

Одним из наиболее широко используемых манекенов является WorldSID, предназначенный для оценки последствий бокового удара. После каждой серии физических испытаний манекен проходит калибровку – серию тестов отдельных компонентов, цель которых – убедиться в соответствии их характеристик нормативным диапазонам. КЭМ, применяемые в виртуальных испытаниях, также подлежат калибровке с целью оценки точности и воспроизведимости результатов [3]. В стандарте ISO 15830-2:2022 описаны калибровочные испытания, проводимые для манекена WorldSID: удар по голове, маятниковое испытание шеи на изгиб, удар бревном по грудной клетке, нагружение плеча, сжатие таза и деформация бедра [4]. В рамках настоящей работы моделируется испытание шеи на изгиб, поскольку данный компонент критически важен для воспроизведения кинематики головы при боковом ударе.

Излагается методика разработки КЭМ испытательного стенда, приводятся результаты численного моделирования нагружения шеи КЭМ манекена с оценкой сходимости с результатами калибровочных испытаний, а также результаты расчетов выбранной в качестве эталонной модели разработки компании LSTC.

Описание методики проведения испытаний

Объектом исследования является КЭМ манекена WorldSID, предназначенного для оценки пассивной безопасности при боковых столкновениях. На рис. 1 представлена сборка модели.

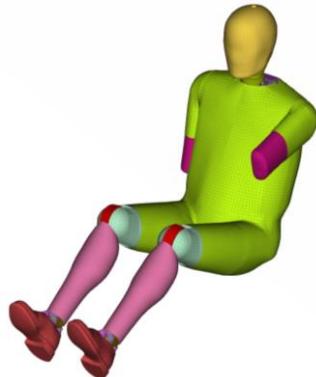


Рис. 1. КЭМ манекена для боковых ударов «WorldSID»

Fig. 1. FEM of the WorldSID side impact dummy

Для испытания по калибровке шеи используется маятниковый стенд: маятник с установленной на нем шеей ударяется о сотовый блок со скоростью 3,4 м/с (рис. 2, а). В ходе испытания фиксируются углы поворота шеи и момент, возникающий в нагрузочной ячейке (рис. 2 б). Параметры маятника (масса, геометрия, материалы) регламентированы в SAE J2856-2022 [5, с. 48]. Вместо головы манекена применяются две стальные пластины, воспроизводящие ее массово-инерционные характеристики. Точные размеры отсутствуют в ISO 15830-2, поэтому они были воссозданы по значениям, указанным в [4 с. 3]. Конструкция представлена на рис. 2.

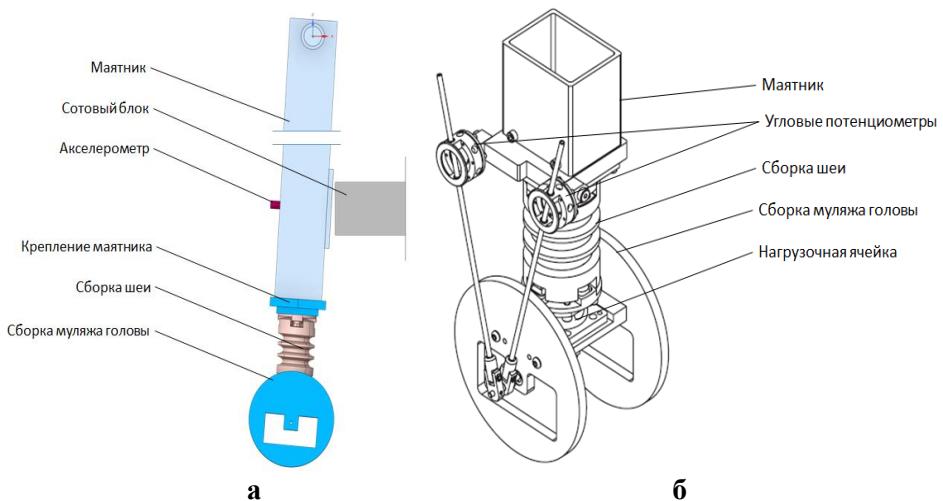


Рис. 2. Сборка маятника для испытания шеи:
а – общий вид сборки, б – шея с измерительными приборами

Fig. 2. Assembling a pendulum for neck testing:
a – general view; б – neck with measuring instruments

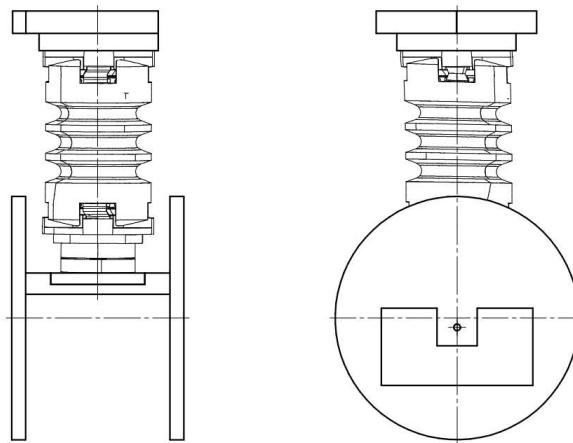


Рис. 3. Схема сборки макета головы

Fig. 3. Assembly diagram of the head dummy

Описание конечно-элементной модели манекена

Используемая в работе модель манекена WorldSID была скачана из базы данных компании LSTC (разработчик LS-DYNA, входящий в состав корпорации ANSYS) в виде общедоступного файла [6]. Она свободна для пользователей с действующей лицензией без дополнительной платы. Перед созданием сборки были извлечены компоненты шеи из полной модели манекена. В табл. 1 приведен список идентификаторов PartID, соответствующих этим компонентам.

Таблица 1.
Перечень компонентов модели шеи манекена для экспорта

Table 1.
List of dummy neck components for export

PID	Название компонента
5000004	NECK_LOADCELL
5000005	HEAD_NECK_INTERFACE_PLATE
5000011	HALF_SPHERICAL_SCREW1
5000014	HALF_SPHERICAL_SCREW2
5000015	NECK_INTERMEDIATE_PLATE1
5000016	NECK_INTERMEDIATE_PLATE2
5000017	NECK_RUBBER
5000018	NECK_TORSO_INTERFACE_PLATE
5000007	FLEXION_EXTENSION_BUFFER
5000008	FLEXION_EXTENSION_BUFFER
5000009	NECK_BUFFER1
5000010	NECK_BUFFER2
5000012	NECK_BUFFER3
5000013	NECK_BUFFER4

В исходной модели шея изогнута для имитации посадки (рис. 4, а), но для целей калибровки она выпрямляется при помощи «морфинга», а затем разворачивается в нужную ориентацию (рис. 4, б).

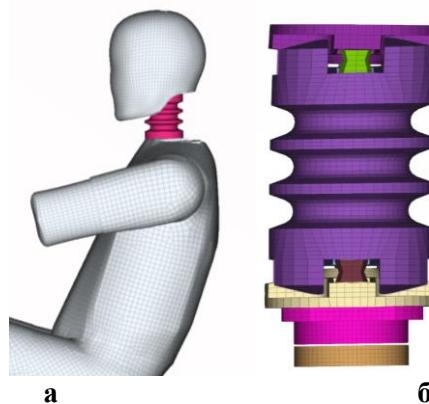


Рис. 4. Извлечение шеи из общей сборки манекена:
 а – общая сборка манекена, б – извлеченная шея

Fig. 4. Extracting the neck from the general assembly of the dummy:
 a – general assembly of the dummy; б – extracted neck

Для обеспечения корректности результатов валидации необходимо, в первую очередь, откалибровать испытательный стенд, в частности – блок энергопоглощения (сотовый блок). Согласно стандарту ISO 15830, замедление маятника стендаДолжно быть регламентировано в рамках заданного коридора и не зависит от характеристик самой шеи. Сотовые блоки часто используются в качестве элементов для контролируемого замедления при калибровочных и краш-испытаниях. Такие структуры обеспечивают необходимое энергопоглощение и позволяют достичь требуемых характеристик замедления при ударе. Применение сотовых и аналогичных энергопоглощающих элементов для обеспечения контролируемого замедления при боковых ударах подробно рассмотрено в работе [7], где приводится моделирование поведения защитных структур транспортного средства при боковом столкновении с опорой. Таким образом, на достижение заданного замедления влияет не модель шеи, а параметры сотового блока, выполняющего функцию элемента демпфирования. На начальном этапе проводится подбор характеристик материала и геометрии блока так, чтобы замедление соответствовало калибровочному диапазону. В стандарте ISO 15830 значения замедления маятника представлены в виде отдельной таблицы и рассматриваются отдельно от остальных контролируемых параметров шеи.

В качестве сотового блока принята часть деформируемого барьера *Offset Deformable Barrier* (Solid version) (рис. 5) [8]. Размеры сотового блока соответствуют регламентированным значениям SAE J2856-2022. Элементы сотового блока связаны с жесткой неподвижной пластиной основания.

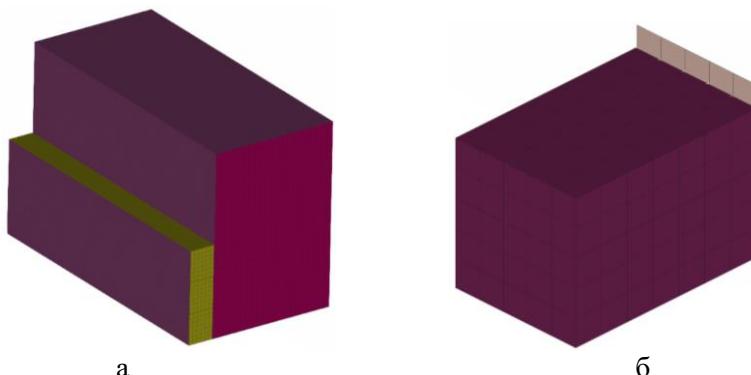


Рис. 5. Применение Offset Deformable Barrier:
 а – исходный деформируемый барьер, б – сотовый блок

Fig. 5. Offset Deformable Barrier usage:
 a – initial deformable barrier; б – honeycomb block

КЭМ испытательного стенда с шеей описывается двумя типами элементов: SECTION_SHELL и SECTION_SOLID [9]. На рис. 6 цветовая маркировка элементов соответствует типу примененного материала.

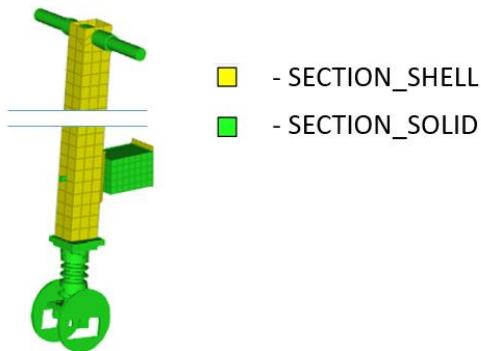


Рис. 6. Типы элементов КЭМ испытательного стенда

Fig. 6. Types of elements of the test bench FEM

В КЭМ используется три типа материалов. Абсолютно жесткий материал MAT20 MAT_RIGID – недеформируемый материал, который используется для моделирования компонентов, где важны только конструктивные особенности и массово-инерционные характеристики, поэтому в данном случае ключевым параметром для этих материалов является плотность [10, с. 2-213]. Как видно из табл. 2, для алюминиевого сплава 6061-T6 применяется две карты с различными значениями плотности. Это сделано для обеспечения заданных в ISO15830-2:2022 массово-инерционных характеристик. Два других типа материалов (MAT62 MAT_VISCOUS_FOAM и MAT126 MAT_MODIFIED_HONEYCOMB) представляют собой деформируемые модели материала. MAT126 MAT_MODIFIED_HONEYCOMB используется для моделирования сложной сотовой структуры блока и имеет нелинейную характеристику. При помощи линейного MAT62 MAT_VISCOUS_FOAM задаются характеристики неметаллических частей шеи. Подробно эти два типа материала не рассматриваются, так как их характеристики заданы в исходных моделях шеи и деформируемого барьера. На рис. 7 представлена полная КЭМ испытательного стенда в цветах, соответствующих назначенному материалу.

Таблица 2.
Список материалов КЭМ испытательного стенда

Table 2.
List of materials for the test bench

Цвет	Название материала	Плотность, т/мм ³	Тип материала
	0.342 MPa (third yield surface with hydrostatic yield)	5.12E-11	MAT126 MAT_MODIFIED_HONEYCOMB
	NATURAL RUBBER	1.1E-9	MAT62 MAT_VISCOUS_FOAM
	BLACK NITRILE RUBBER	1.1E-9	MAT62 MAT_VISCOUS_FOAM
	backplate (fixed)	7.89E-12	MAT20 MAT_RIGID
	6061-T6 ALUMINUM	2.7E-9	MAT20 MAT_RIGID
	6061-T6 ALUMINUM	3.2E-9	MAT20 MAT_RIGID
	4140 STEEL	5.5E-9	MAT20 MAT_RIGID
	080M40 STEEL	7.2E-9	MAT20 MAT_RIGID
	STEEL_BRACKET	7.85E-9	MAT20 MAT_RIGID
	303 SS	8.5E-9	MAT20 MAT_RIGID

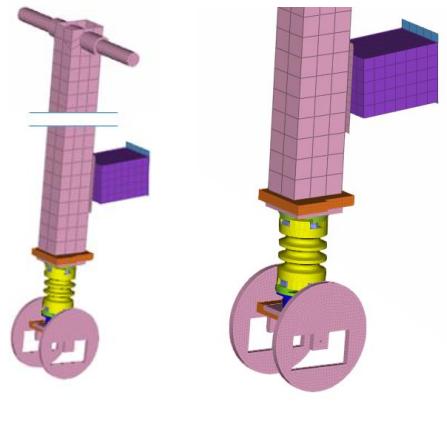


Рис. 7. Материалы КЭМ испытательного стенда

Fig. 7. Materials of the test bench FEM

В сборке маятника используется несколько видов связей: контакты, дополнительные узлы и шарниры. На рис. 8 представлен вращательный шарнир CONSTRAINED_JOINT_REVOLUTE, соединяющий маятник и его ось [9, с. 10-64]. Шарнир имеет нулевую жесткость и демпфирование.

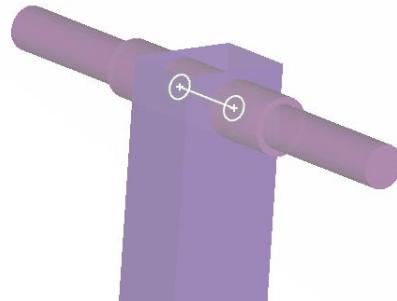


Рис. 8. Вращательный шарнир маятника

Fig. 8. Pendulum pivot joint

На рис. 9 представлены сферические шарниры CONSTRAINED_JOINT_SPHERICAL, использующие для сборки системы замера углов с потенциометрами. Для каждого стержня используется по два шарнира. Шарниры также имеют нулевую жесткость и демпфирование.

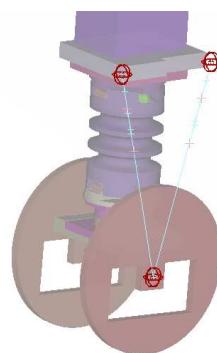


Рис. 9. Сферические шарниры маятника

Fig. 9. Spherical pendulum joints

Для соединения центра масс головы и основания шеи используются стержни. С их же помощью обеспечивается поворот потенциометров, установленных на основании. В КЭМ эти стержни моделируются при помощи **CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY** (рис.10, а) [9, с. 10-138]. В оригинальной конструкции, чтобы не ограничивать изгиб шеи при испытании, допускается продольное перемещение стержней перпендикулярно оси потенциометра. В модели применяется по два стержня на сторону, между которыми установлен цилиндрический шарнир **CONSTRAINED_JOINT_CYLINDRICAL** (рис. 10, б) [9, с. 10-65].

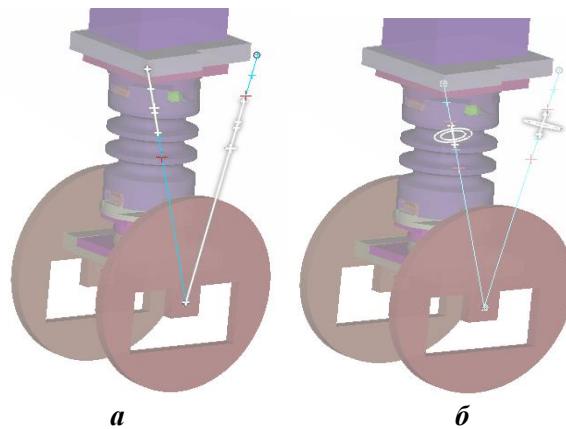


Рис. 10. Сборка КЭМ узла для измерения углов:

а – **CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY**,
б – **CONSTRAINED_JOINT_CYLINDRICAL**

Fig. 10. Assembly of the FEM of the unit for measuring angles:

а – **CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY**,
б – **CONSTRAINED_JOINT_CYLINDRICAL**

Для связи компонентов, описанных материалом типа **MAT_RIGID**, используется **CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY** (рис.11) [9, с. 10-157]. При помощи данной функции моделируется абсолютно жесткая связь между телами. Между деформируемыми элементами конструкции, ударной пластины маятника и сотовым блоком создается контакт формулировки **CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE** (рис. 12, а, с коэффициентами динамического и статического трения, равными 0,3, коэффициентом вязкого демпфирования, равным 40 [9, с. 11-157]. Для компонентов шеи создается общий контакт формулировки **CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE** (рис. 12, б) с коэффициентами динамического и статического трения, равными 0,15, коэффициентом вязкого демпфирования, равным 20 %.



Рис. 11. Применение **CONSTRAINED_RIGID_BODY**:
а – общий вид сборки, б – три пары связанных элементов

Fig. 11. **CONSTRAINED_RIGID_BODY** usage:
а – general view; б – 3 pairs of connected elements

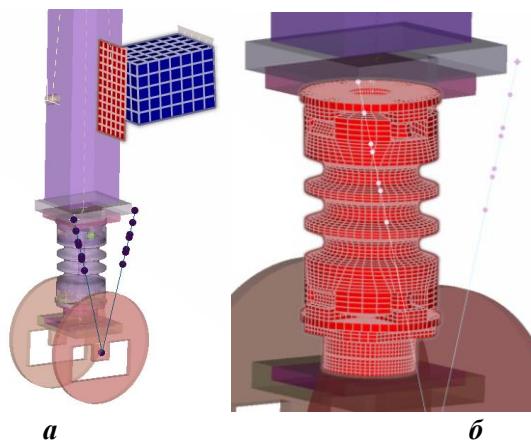


Рис. 12. Применяемые в модели контакты:

а – контакт ударной пластины и сотового блока, б – общий контакт шеи

Fig. 12. Contacts used in the model:

а – contact of the impact plate and the honeycomb block, б – general neck contact

Для контроля параметров и получения результатов моделирования используются угловые потенциометры, которые показаны на рис. 9 и 10, датчик ускорений и датчик момента. Датчик ускорений задается при помощи функции DATABASE_HISTORY_NODE_LOCAL [9, с. 16-100]. В карте обозначается узел, ускорение которого будет измеряться, а также заранее заданная локальная система координат, ось X которой со направлена оси датчика, а ось Z со направлена основной трубе маятника (рис. 13).

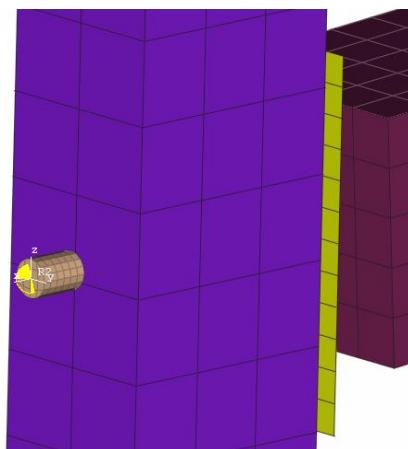


Рис. 13. Датчик ускорений

Fig. 13. Acceleration sensor

Датчик момента задается при помощи балочного элемента ELEMENT_BEAM_ELFORM_6 [9, с. 19]. В карте задаются узлы, между которыми строится элемент, PartID, а также номер узла, в направлении которого будет направлена одна из осей локальной системы координат элемента. Материал элемента – MAT_LINEAR_ELASTIC_DISCRETE_BEAM – с высокой заданной жесткостью по всем степеням свободы [10, с. 2-463]. Узлы, по которым задается балочный элемент, при помощи CONSTRAINED_EXTRA_NODES_NODE привязываются к сборке шеи и нагруженному элементу (рис.14, а) [9, с. 10-20] Результат моделирования выводится при помощи функции DATABASE_HISTORY_BEAM [9, с. 16-100]. На рис. 14, б представлен общий вид датчика для вывода результатов.

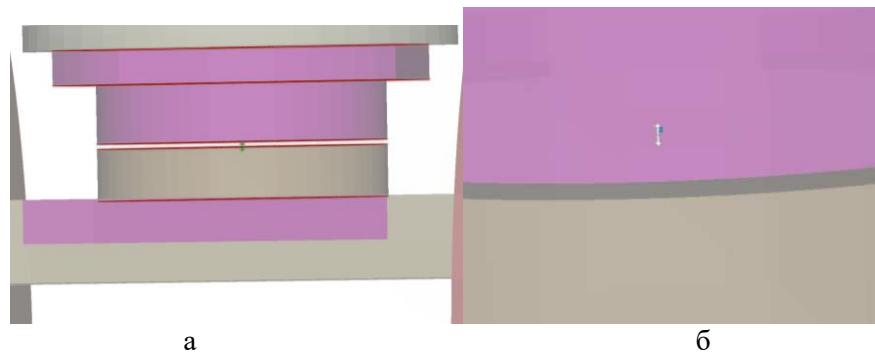


Рис. 14. Датчик момента:
 а – CONSTRAINED_EXTRA_NODES_NODE, б – общий вид датчика

Fig. 14. Torque sensor:
 а – CONSTRAINED_EXTRA_NODES_NODE, б – general view

Результаты моделирования

По результатам расчета получена картина деформированного состояния модели, а также данные с заранее обозначенных датчиков. На рис. 3 показана раскадровка удара маятника о сотовый блок.

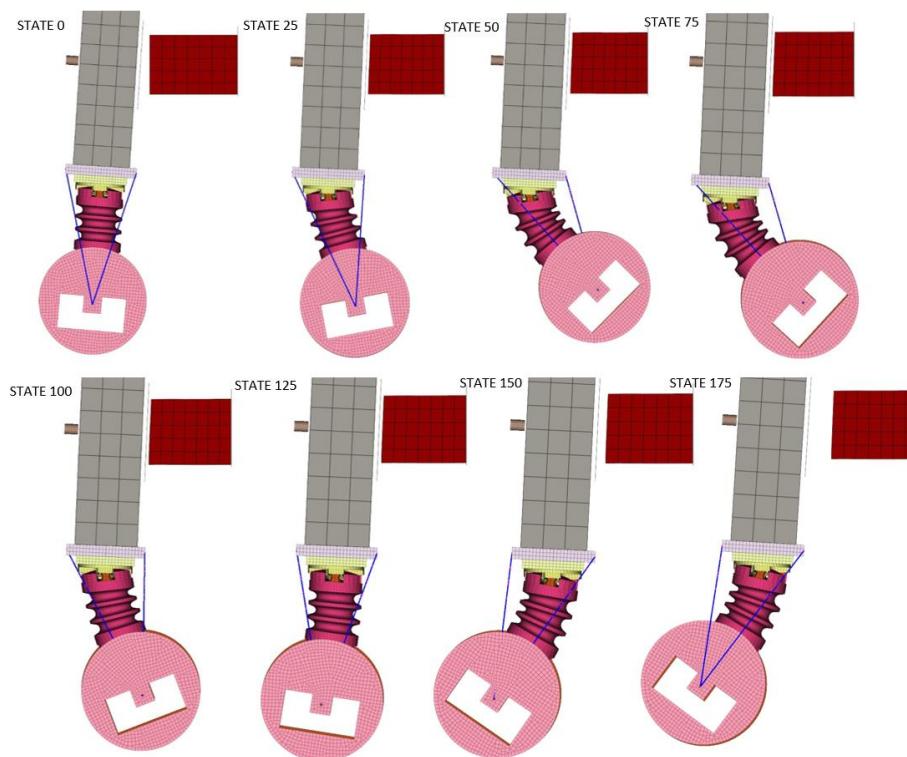


Рис. 15. Раскадровка моделирования испытания

Fig. 15. Test simulation storyboard

Результаты моделирования испытания шеи обрабатываются в соответствии с ISO15830-2:2022 [4, с. 16]. На первом этапе экспортируется ускорение узла акселерометра в направлении оси X в локальной системе координат (рис. 16). Данные значения фильтруются по CFC1000. Точка 0 мс соответствует первичному ускорению маятника 5g. Стоит отметить, что в руководстве к модели LSTC, несмотря на требования ISO15830-2:2022, указана фильтрация CFC060, что значительно сказывается на результате моделирования.

Следующим этапом график ускорения интегрируется (рис. 17). Значения скорости должны соответствовать значениям калибровочных диапазонов. В табл. 3 представлены значения скорости маятника в моменты 4, 8 и 12 мс, а также требуемый диапазон значений скорости. Все значения соответствуют калибровочным диапазонам.

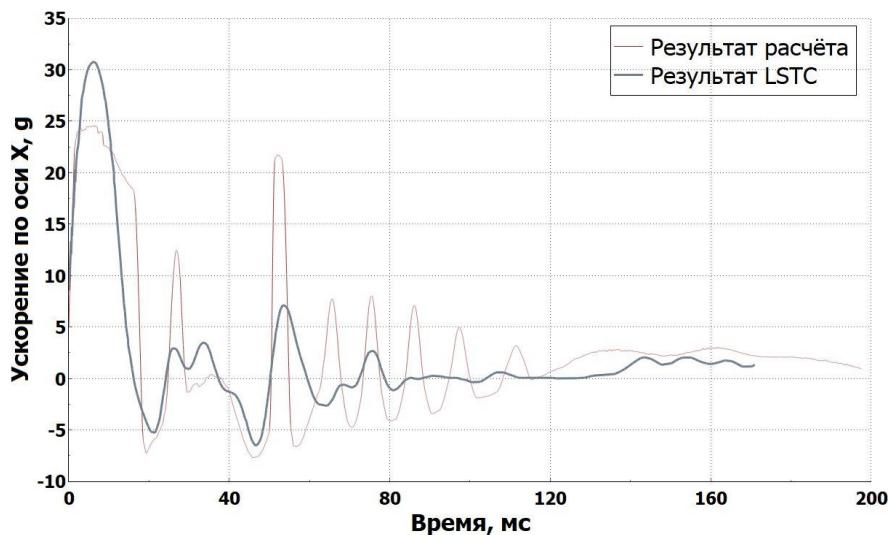


Рис. 16. Ускорение маятника

Fig. 16. Pendulum acceleration

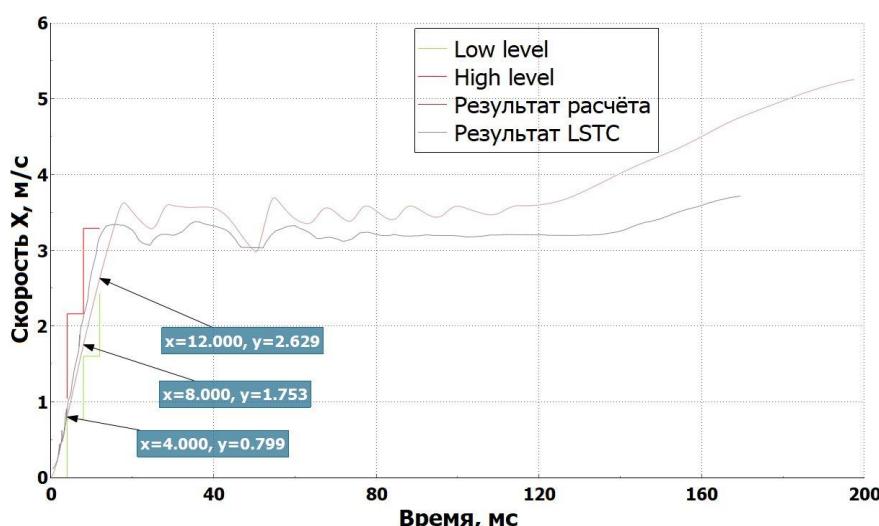


Рис. 17. Скорость маятника

Fig. 17. Pendulum speed

Таблица 3.
Сравнение расчетных значений скорости с калибровочными диапазонами

Table 3.
Comparison of calculated speed values with calibration ranges

Сравнение расчетных значений скорости с калибровочными диапазонами Переменная	Целевой диапазон	Результат LSTC	Расчетное значение
Значение скорости в 4 мс, м/с	0,77-1,04	0,870	0,799
Значение скорости в 8 мс, м/с	1,6-1,9	2,087	1,753
Значение скорости в 12 мс, м/с	2,43-3,29	3,130	2,629

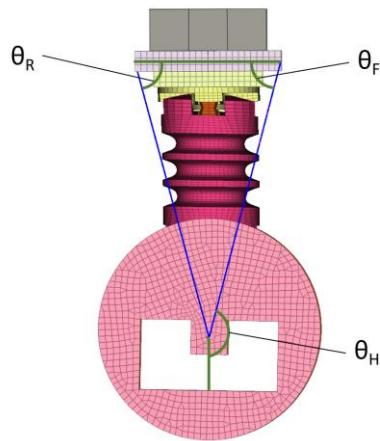


Рис. 18. Углы, замеряемые по КЭМ

Fig. 18. Angles measured by FEM

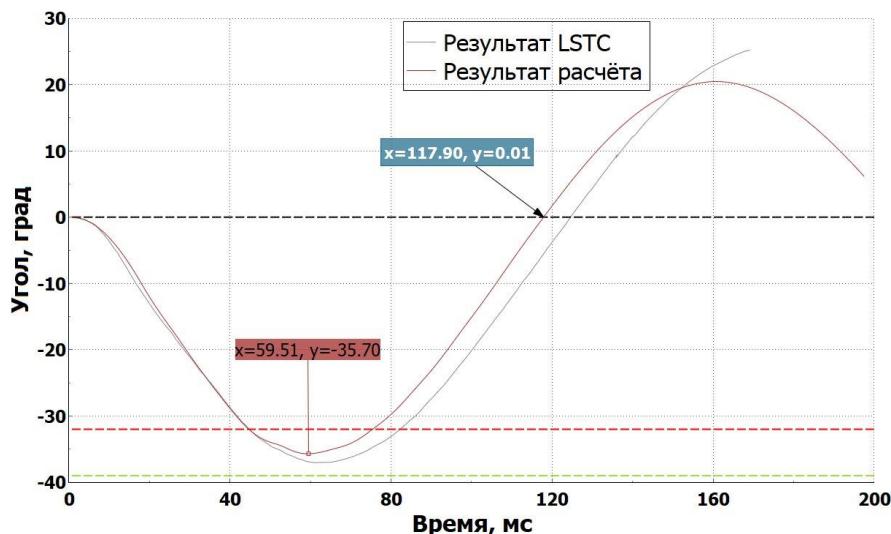


Рис. 19. Угол закручивания переднего потенциометра

Fig. 19. Front potentiometer twist angle

Далее замеряются углы поворота шеи (рис. 18). На графики выводятся изменения значения углов поворота, т.е. начало графика перемещается точку [0, 0]. На рис. 19 представлен график изменения угла переднего потенциометра θ_F . Максимальный угол закручивания составляет $35,7^\circ$, время от максимального значения угла до 0 составляет 58,4 мс, что соответствует калибровочному диапазону. На рис. 20 представлен график изменения угла заднего потенциометра θ_R . Максимальный угол закручивания составляет $31,8^\circ$, время от максимального значения угла до 0 равно 57 мс, что также соответствует калибровочному диапазону.

В расчетах фиксируются не абсолютные значения углов, а их приращения относительно начального положения. На рис. 21 представлен график угла поворота головы относительно маятника. Максимальный угол поворота головы составляет $54,49^\circ$, время от максимального значения угла до 0 составляет 55,73 мс. Значение времени затухания не соответствует калибровочному диапазону. Значение момента в затылочном мышцелке вычисляется по формуле (2):

$$M_{0Cx} = M_X + (F_y) \times (0,0195 \text{ м}), \quad (2)$$

где M_X – момент, направленный относительно сагиттальной оси головы;

F_y – сила, направленная по фронтальной оси головы.

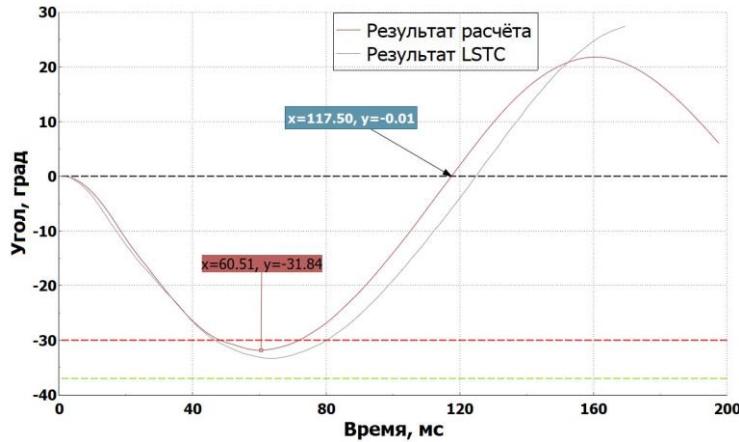


Рис. 20. Угол закручивания заднего потенциометра

Fig. 20. Rear potentiometer twist angle

Угол между головой и маятником β вычисляется по формуле (1):

$$\beta = \theta_F + \theta_H. \quad (1)$$

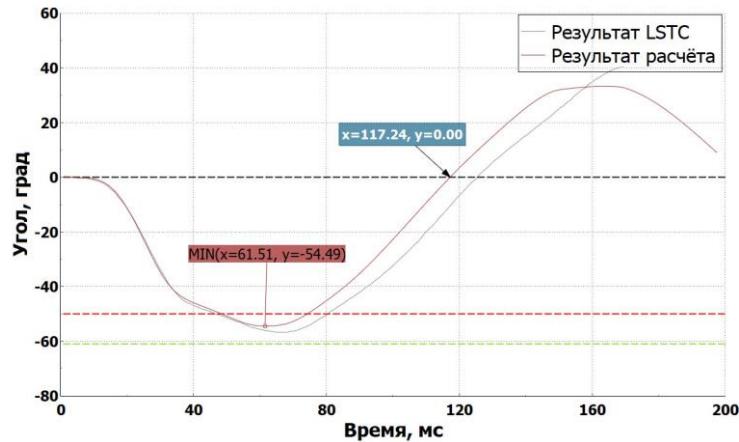


Рис. 21. Угол поворота головы относительно маятника

Fig. 21. The angle of rotation of the head relative to the pendulum

Значения момента M_X и силы F_y выгружаются из датчика момента. Перед вычислением момента в затылочном мышцелке данные фильтруются по CFC600. На рис. 224 представлен график момента в затылочном мышцелке. Необходимо отметить, что данные LSTC отфильтрованы более грубо.

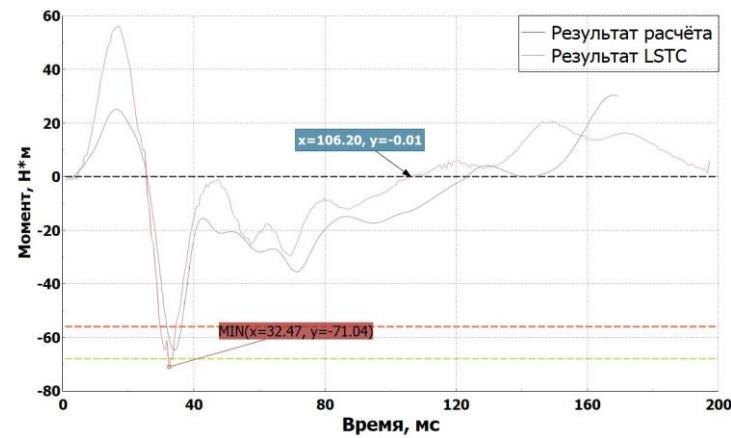


Рис. 22. Момент в затылочном мышцелке

Fig. 22. Moment in the occipital condyle

Максимальный момент составляет 51,04 Н·м, время от максимального значения момента до 0 составляет 73,73 мс. Значение максимального момента в затылочном мышцелке не соответствует калибровочному диапазону. В табл. 4 представлены результаты моделирования испытания шеи манекена.

Таблица 4.
Результат моделирования испытания шеи манекена

Table 4.
The result of the dummy neck test simulation

Переменная	Целевой диапазон	Результат LSTC	Расчетное значение
Максимальный угол между головой и маятником β , град	50-61	56,72	54,49
Время затухания от β до 0 градусов, мс	58-72	58,36	55,73
Максимальный момент в затылочном мышцелке M_{OCx} , Н·м	55-68	65,54	71,04
Время затухания от максимального момента до 0 Н·м, мс	71-87	89,60	73,73
Максимальный угол закручивания переднего потенциометра, град	32-39	37,07	35,7
Время максимального угла закручивания переднего потенциометра θ_F , мс	56-68	63,00	58,4
Максимальный угол закручивания заднего потенциометра, град	30-37	33,29	31,84
Время максимального угла закручивания заднего потенциометра θ_R , мс	56-68	64	57

Как видно из результатов, КЭМ испытательного стенда соответствует калибровочным диапазонам не по всем показателям. Модель LSTC также проходит не по всем показателям, кроме того, в модели LSTC используется некорректная фильтрация, что значительно влияет на результаты.

Способы повышения сходимости

Одной из возможных причин отсутствия сходимости по всем показателям результатов моделирования с калибровочными диапазонами является характеристика сотового блока. В реальных испытаниях именно сотовый блок обеспечивает достижение требуемых значений замедления. Соответственно, его энергоемкость в конечно-элементной модели должна быть эквивалентна энергоемкости физического образца, с которым обеспечивается соответствие калибровочным требованиям.

В SAE J2856-2022 указаны размеры блока, а также его плотность (28,8 кг/м³). В данном случае, как было сказано ранее, в качестве сотового блока используется часть деформируемого барьера плотностью 51,2 кг/м³. Таким образом, следующим этапом рекомендуется проведение валидации модели сотового блока с результатами испытаний реального образца, а также повторное моделирование испытания шеи.

Анализ графика поворота головы относительно маятника показывает, что время затухания от максимального значения угла до нуля меньше, чем требуется по калибровочному диапазону, что свидетельствует об избыточной жесткости шеи. Для достижения соответствия результатам калибровочного испытания необходимо снижение жесткости шеи путем уменьшения жесткости материала. Это может быть реализовано путем уменьшения жесткости материала.

Заключение

В статье описана разработка КЭМ шеи манекена WorldSID и ее последующая валидация с использованием калибровочных диапазонов согласно стандарту ISO 15830. Для выполнения нагружения шеи была разработана КЭМ маятникового стенда, которая также валидирована по коридору замедления, регламентированному тем же нормативным документом. Полученные результаты показали соответствие большинству калибровочных критериев, за исключением значения максимального момента и времени затухания угла поворота головы. Это свидетельствует об избыточной жесткости шеи и необходимости дальнейшей валидации модели до достижения сходимости по всем контрольным показателям. Также выявлено, что используемый для калибровки стенда сотовый блок обладает завышенной плотностью по сравнению с регламентированным значением, что может оказывать влияние на сходимость результатов моделирования с физическими испытаниями. Для повышения точности моделирования предлагается уточнение характеристик сотового блока, а также возможная модификация конструкции шеи.

На примере модели шеи установлено, что КЭМ манекена из свободного доступа не позволяет обеспечить необходимой точности расчетов, поскольку требует валидации как составных частей, так и манекена в сборе. В связи с этим, проведенный анализ подтверждает актуальность разработки и валидации конечно-элементных моделей манекенов, а также необходимость дальнейших исследований в этом направлении. После валидации всех остальных компонентов манекена их можно объединить в единую модель, пригодную для расчетов пассивной безопасности.

Библиографический список

1. World vehicles in use [Электронный ресурс] // International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA). – URL: <https://www.oica.net> (дата обращения: 02.06.2025).
2. Global status report on road safety 2023: country and territory profiles. – Geneva : World Health Organization, 2024. – Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. – 389 р.
3. Жителев, Д.А. Обоснование необходимости разработки методики создания конечно-элементных моделей манекенов для проведения виртуальных испытаний автомобилей на фронтальные и боковые удары / Д.А. Жителев, Д.Ю. Солопов // Труды НАМИ. – 2024 – № 2. – С. 78-88. <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2024-2-78-88>
4. ISO 15830-2:2022 *Дорожные транспортные средства – Спецификации конструкции и характеристик манекена бокового удара WorldSID 50-го процентиля (мужчина). Часть 2: Механическая подсистема.* Второе издание = Road vehicles – Design and performance specifications for the WorldSID 50th percentile male side impact dummy. Part 2: Mechanical subsystem. Second edition. – 2022-06. – 22 с.
5. SAE J2856_202211: Руководство пользователя для манекена Hybrid III 50-го процентиля (мужчина)* = User's Manual for the 50th Percentile Male Hybrid III Dummy. – Warrendale, PA : SAE International, 2022. – 72 с. – DOI: 10.4271/J2856_202211.
6. Dummy Models Overview and Downloads [Электронный ресурс] / Ansys Inc. – URL: <https://lsdyna.ansys.com/lstc-dummy-models-overview/> (дата обращения: 16.04.2025). – <Текст: электронный>.
7. Setiawan, R. Crashworthiness Design for an Electric City Car against Side Pole Impact / R. Setiawan, M. Salim // Journal of Engineering and Technological Sciences. – 2017. – Vol. 49, no. 5. – P. 587-603. – DOI: 10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.5.3.
8. LSTC Barrier Models [Электронный ресурс] / Ansys Inc. – URL: <https://lsdyna.ansys.com/lstc-barrier-models/> (дата обращения: 22.04.2025).
9. LS-DYNA® Keyword User's Manual. Volume I [Электронный ресурс] / Livermore Software Technology (LST), an ANSYS Company. – Version R13. – 2021. – URL: https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna_manual_volume_i_r13.pdf (дата обращения: 17.04.2025).

10. LS-DYNA® Keyword User's Manual. Volume II [Электронный ресурс] / Livermore Software Technology (LST), an ANSYS Company. – Version R13. – 2021. – URL: https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna_manual_volume_ii_r13.pdf (дата обращения: 22.04.2025).

References

1. International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA). n.d. "World Vehicles in Use". Accessed June 15, 2024. <https://www.oica.net>.
2. World Health Organization. 2024. Global Status Report on Road Safety 2023: Country and Territory Profiles. Geneva: World Health Organization. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
3. Zhitelev D.A. and Solopov D.Yu. 2024. "Obosnovanie neobkhodimosti razrabotki metodiki sozdaniia konechno-elementnykh modelei manekenov dlja provedeniia virtual'nykh ispytanii avtomobilei na frontal'nye i boko-vye udary" [Substantiation of the Need for Developing a Methodology for Creating Finite Element Dummy Models for Virtual Testing of Vehicles in Frontal and Side Impacts]. *Trudy NAMI* [Proceedings of NAMI], no. 2: 78-88. <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2024-2-78-88>.
4. International Organization for Standardization (ISO). 2022. ISO 15830-2:2022. Road Vehicles – Design and Performance Specifications for the WorldSID 50th Percentile Male Side Impact Dummy – Part 2: Mechanical Subsystem. 2nd ed. Geneva: ISO.
5. SAE International. 2022. SAE J2856_202211: User's Manual for the 50th Percentile Male Hybrid III Dummy. Warrendale, PA: SAE International. https://doi.org/10.4271/J2856_202211.
6. Ansys Inc. n.d. "Dummy Models Overview and Downloads". Accessed April 16, 2025. <https://lsdyna.ansys.com/lstc-dummy-models-overview/>.
7. Setiawan, R. and Salim M. 2017. "Crashworthiness Design for an Electric City Car against Side Pole Impact". *Journal of Engineering and Technological Sciences* 49 (5): 587-603. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.5.3>.
8. Ansys Inc. n.d. "LSTC Barrier Models". Accessed April 22, 2025. <https://lsdyna.ansys.com/lstc-barrier-models/>.
9. Livermore Software Technology (LST), an ANSYS Company. 2021. LS-DYNA® Keyword User's Manual. Volume I. Version R13. Livermore, CA: LST. Accessed April 17, 2025. https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna_manual_volume_i_r13.pdf.
10. Livermore Software Technology (LST), an ANSYS Company. 2021. LS-DYNA® Keyword User's Manual. Volume II. Version R13. Livermore, CA: LST. Accessed April 22, 2025. https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna_manual_volume_ii_r13.pdf.

**Дата поступления
в редакцию: 02.06.2025**

**Дата принятия
к публикации: 25.10.2025**

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПО ПОДВИЖНОСТИ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО БЕЗДОРОЖЬЮ С ПРИМЕНЕНИЕМ КАРТ ПОДВИЖНОСТИ

А.И. Марковнина

ORCID: 0009-0000-7971-0424 e-mail: alinomalino@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

Предлагается метод оценки эффективности транспортно-технологических средств (ТТС) по подвижности как интегральному показателю. Проанализированы подходы к построению карт подвижности и предложен более точный метод визуализации результатов расчета показателя эффективности ТТС. По предлагаемой методике проведено сравнение шести ТТС различной конфигурации. Результаты визуализированы при помощи построения карты подвижности для участка топографической карты местности. По методике проведен анализ влияния конфигурационных параметров на показатель подвижности. Найден экстремум функции, при достижении которого целесообразно не вносить изменения в существующую конфигурацию, а проектировать новую. Определены зависимости эффективности от изменения технических характеристик ТТС.

Ключевые слова: подвижность; эффективность, проходимость; транспортно-технологические средства.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Марковнина, А.И. Методика оценки эффективности по подвижности колесных транспортно-технологических средств при движении по бездорожью с применением карт подвижности // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 109-120. DOI 10.46960/1816-210X_2025_4_109 EDN TLUHNZ.

METHODOLOGY FOR EFFICIENCY ASSESSMENT OF WHEELED TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL VEHICLES IN OFF-ROAD MOVING BASED ON MOBILITY USING MOBILITY MAPS

А.И. Markovnina

ORCID: 0009-0000-7971-0424 e-mail: alinomalino@yandex.ru

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper proposes a method for assessing the efficiency of transport and technological vehicles (TTV) based on mobility as an integral indicator. Approaches to constructing mobility maps are analyzed and a more accurate method for visualizing the results of calculating the TTV efficiency indicator is proposed. A comparison of six TTV of various configurations was carried out using the proposed methodology. The results are visualized by constructing a mobility map for a section of a topographic map of the area. The methodology was used to analyze the influence of configuration parameters on the mobility indicator. An extremum of the function has been found, upon reaching which it is advisable not to make changes to the existing configuration, but to design a new one. The dependence of efficiency on changes in TTV technical characteristics has been determined.

Key words: mobility; efficiency; cross-country ability; transport and technological vehicle.

FOR CITATION: Markovnina, A.I. Methodology for efficiency assessment of wheeled transport and technological vehicles in off-road moving based on mobility using mobility maps. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 109-120. DOI 10.46960/1816-210X_2025_4_109 EDN TLUHNZ.

Колесные транспортно-технологические средства (ТТС), вездеходы, снегоболотоходы (СБХ), в том числе, колесные машины повышенной и высокой проходимости эксплуатируются в тяжелых дорожных условиях, по местности с грунтами с низкой несущей способностью для выполнения различных транспортно-технологических задач. Для эффективности движения на этапе проектирования целесообразно выбрать конфигурацию ТТС (технические и компоновочные характеристики). Оценка полного комплекса конфигурационных характеристик в рамках проектирования обеспечивает их рациональный выбор, что обуславливает актуальность настоящей работы.

Под эффективностью следует понимать отношение показателя выполненной работы к затратам на ее выполнение; эффективность по подвижности рассматривается как прогнозируемая скорость движения ТТС в определенных условиях. Для повышения эффективности ТТС необходимы: 1) совершенствование методов проектирования рациональных конфигурационных характеристик ТТС; 2) совершенствование методов планирования наиболее рационального по опасности и экономической целесообразности маршрута в зависимости от выполняемых транспортно-технологических задач; 3) адаптация конфигурационных характеристик ТТС к местности их эксплуатации. Интегральным показателем любой ТТС в условиях бездорожья является подвижность машины [1]. Данный показатель охватывает широкий спектр конфигурационных характеристик ТТС, учитывает характер взаимодействия ТТС с ландшафтом и роль человеческого фактора.

В настоящее время за рубежом активно изучаются методы построения карт подвижности местности для построения моделей движения различных ТТС. В картах подвижности отражаются ландшафтные условия движения (неделимый комплекс геоморфологических, почвогрунтовых и рельефных характеристик местности) и характеристика взаимодействия «машина-местность» (например, цветовое обозначение непроходимых участков). Отечественные исследования в этой области рассматривают вопрос подвижности не так широко, как за рубежом. Предлагаемая методика оценки эффективности по подвижности колесных ТТС может быть использована на всех этапах как конструирования, так и эксплуатации ТТС. Принципиально важно исследование процессов взаимодействия колесных ТТС, предназначенных для выполнения различных транспортно-технологических операций, в том числе, в условиях бездорожья.

Анализ данного направления исследований показал, что в настоящее время довольно глубоко проработаны вопросы, связанные с взаимодействием колесных ТТС с местностью. Получены зависимости, позволяющие оценивать подвижность колесных ТТС и их эффективность. В области изучения вопросов оценки эффективности колесных ТТС и комплексов фундаментальными работами являются труды В.Ф. Бабкова, Г.Б. Безбородовой, Я.И. Бронштейна, Н.А. Бухарина, Е.Б. Волковой, В.И. Гребенщикова, В. Диксона, Д.В. Зезюлина, Ю. Мацкерле, В.Ф. Платонова, М.Г. Bekker, J.Y. Wong и многих других [2-7]. Исследованиями в области подвижности и конкурентоспособности занимались В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, У.Ш. Вахидов, К.О. Гончаров, В. Горелов, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, Г.О. Котиев, В.И. Котляренко, В.В. Ларин, В.С. Макаров, В.Н. Наумов, Е.В. Сарач, Н.В. Чернышев, В.В. Чобиток и другие [8-12]. В области исследований проходимости колесных машин можно выделить: Я.С. Агейкина, А.С. Антонова, В.Ф. Бабкова, Е.Е. Баженова, Л.В. Барахтanova, В.В. Белякова, В.Н. Кравца, В.Е. Колотилина, Г.О. Котиева, В.С. Макарова, С.Е. Манянина, В.Н. Наумова, А.В. Папунина, С.В. Рукавишникова, В.А. Скотникова и др. [13-18]. Среди зарубежных ученых можно выделить: M.G. Bekker, K. Popp, J.Y. Wong, James P Hambleton и др. [19]. Параметры микропрофиля различных видов дорог и его влияние на колебательные процессы ТТС рассмотрены в работах Д.А. Антонова, В.Л. Афанасьева, Л.В. Барахтanova, Е.Б. Волковой, В.И. Ершова, С.В. Рукавишникова, А.А. Хачатурова, В.А. Шапкина. Методики оценки влияния геометрических особенностей рельефа на движение колесных ТТС рассматривались в исследованиях советских ученых: П.В. Аксенова, Н.А. Бухарина, А.И. Гришкевича, Д.М. Ломако, Д.А. Попова, А.А. Силаева и других. Исследованием и созданием карт

подвижности в настоящее время активно занимаются Jean M. Dasch, Paramsothy Jayakumar (США), Filip Dohna [20], Marian Rybansky (Чехия) и др.

Однако зависимости эффективности относительно условий подвижности ТТС уделялось достаточно мало внимания, а существующие методы оценки эффективности ТТС основываются на одном показателе, например, только на расходе топлива или только на затратах мощности. В результате в современных методах оценки эффективности проектируемых или модернизируемых ТТС не учитываются все их конфигурационные характеристики в целом. Их широкий спектр охватывается интегральным показателем подвижности, рассматриваемым в настоящей работе.

В широком смысле под эффективностью следует понимать степень соответствия машины ожидаемым требованиям потребителей. Подвижность – это интегральное эксплуатационное свойство ТТС, определяющее ее способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самих ТТС, т.е. возможность ТТС противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи. Проходимость – способность ТТС двигаться в любых эксплуатационных условиях безопасно и эффективно.

Критерием эффективности является отношение технической оценки ТТС к показателю его подвижности. При этом показатель подвижности рассчитывается как многокритериальная функция от технических характеристик машины, оценки территории и оценки режима движения. В общем виде показатель подвижности определяется следующим образом:

$$\Pi = \lambda_m \pm \lambda_t \pm \lambda_p, \quad (1)$$

где: λ_m – техническая оценка ТТС, λ_t – эксплуатационная оценка территории, λ_p – оценка режима движения. Знак \pm означает, что в определенных условиях характеристики территории и адекватность выбора режима движения могут как повысить показатель подвижности, так и понизить.

Эффективность по подвижности означает, насколько быстро колесное ТТС сможет преодолеть рассматриваемый участок и рассчитывается как отношение значения показателя подвижности к значению технической оценки машины:

$$\Pi_e = \frac{\Pi}{\lambda_m}, \quad (2)$$

где: Π_e – оценка эффективности по подвижности, λ_m – техническая оценка колесного ТТС, Π – показатель подвижности колесного ТТС.

Техническая оценка ТТС рассчитывается по формуле полезности – способность некоторой конфигурации ТТС удовлетворять одну или несколько потребностей, в данном случае – потребность максимально адаптироваться к изменяющимся условиям движения и рассчитывается следующим образом:

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^n Q_i \times w_i, \quad (3)$$

где n – количество учитываемых технических характеристик, Q_i – оценка частного критерия, w_i – весовой коэффициент важности частного критерия (при этом $\sum w_i = 1$).

Весовой коэффициент важности частного критерия определяется методом экспертных оценок, методом попарного сравнения критериев, как наиболее информативным. Критерии оценки группируются в зависимости от специфики (массовые, габаритные и прочие) или от назначения расчета (влияющие преимущественно на скорость, влияющие преимущественно на грузоподъемность и др.).

За показатель территории λ_t принимается оценка непроходимости территории выбранным ТТСиК. Формула полной вероятности примет вид:

$$\lambda_t = P(A) = P(H_1) * P(A/H_1) + P(H_2) * P(A/H_2) + P(H_3) * P(A/H_3), \quad (4)$$

где: $P(H_1)$, $P(H_2)$, $P(H_3)$ – вероятность проезда по препятствию с хорошим грунтом, проезда по ровному участку с любым грунтом, проезда по препятствию с плохим грунтом соответственно; $P(A/H_1)$ – вероятность остановки ТТС из-за геометрических особенностей территории и машины; $P(A/H_2)$ – вероятность остановки ТТС из-за особенностей сцеплений шин с опорой; $P(A/H_3)$ – вероятность остановки ТТС при совместном влиянии геометрических и сцепных особенностей территории.

Для адекватного выбора режима движения ТТС в условиях бездорожья расчет оценки режима движения проводится по формуле полезности:

$$\lambda_p = w_{\text{устр}} \times Q_{\text{устр}} + w_{\text{в}} \times Q_{\text{в}} \quad (5)$$

$$w_{\text{устр}} + w_{\text{в}} = 1,$$

где $w_{\text{устр}}$ – весовой коэффициент влияния установленных на ТТС дополнительных устройств повышения проходимости, $Q_{\text{устр}}$ – оценка влияния установленных на ТТС дополнительных устройств повышения проходимости, $w_{\text{в}}$ – весовой коэффициент влияния выбора водителя, $Q_{\text{в}}$ – оценка влияния выбора водителя.

Для визуализации рассчитанных показателей подвижности и эффективности по подвижности подойдет метод построения карт подвижности. Карты подвижности – это разбитая на участки с примерно однородными условиями движения карта местности, на которую нанесены отметки, соответствующие уровню подвижности на каждом таком участке для отдельно взятой машины. В зарубежных работах представлены два основных метода построения карт: 1 – распределение участков по модели NATO Reference Mobility Model (NRMM) по методу «GO – SLOW GO – NO GO» (рис. 1.а); 2 – цветовое обозначение вертикальных препятствий по модели Digital Terrain Model of the Czech Republic of the 5th generation (DMR 5G), непроходимых углов рельефа (рис. 1.б).

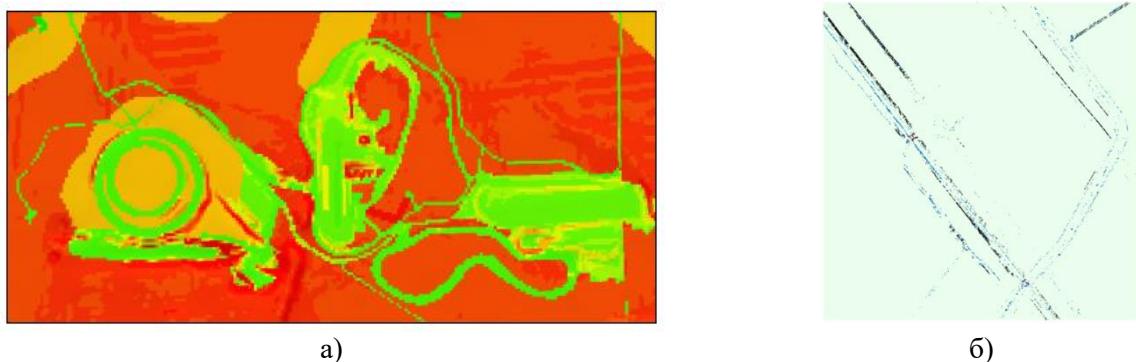


Рис. 1. Карта подвижности:
a) NRMM, б) DMR 5G

Fig. 1. Mobility map:
a) NRMM, б) DMR 5G

Предлагается построение карты подвижности, на которой разными цветами обозначается, проедет ли ТТС по участку местности и с какой прогнозируемой скоростью. Методика расчета подвижности представлена на рис. 2. По ней был произведен расчет для следующих моделей колесных ТТС: «Ункор» модель ТТС 39101, РУСАК К-8, «Алдан» модель ЗТМ 3941, «Бурлак» б6б, «Байкал» модель ЗТМ 30081-10, «Вея» ЗВМ-39083 4x4 (табл. 1, рис. 3). Расчетная местность представлена фрагментом топографической карты. Характеристики водителя были выбраны близкими к тем, которые будут соответствовать водителю, проводящему экспериментальные исследования.

Для расчетов технические характеристики ТТС были распределены по группам: 1) показатели массы, 2) геометрические показатели, 3) показатели двигателя, 4) показатели движителя, 5) колесная формула. По формуле (3) были получены значения технической оценки ТТС (рис. 2), которую также можно назвать эффективной подвижностью, т.е. по-

движностью колесной машины в эталонных условиях. Максимальным уровнем подвижности обладают восьмиколесные Алдан и Русак, за счет высокой грузоподъемности и мощности двигателя. Расчет проводится для ТТС в снаряженном состоянии, величина дорожного просвета учитывается, исходя из начальных технических характеристик.

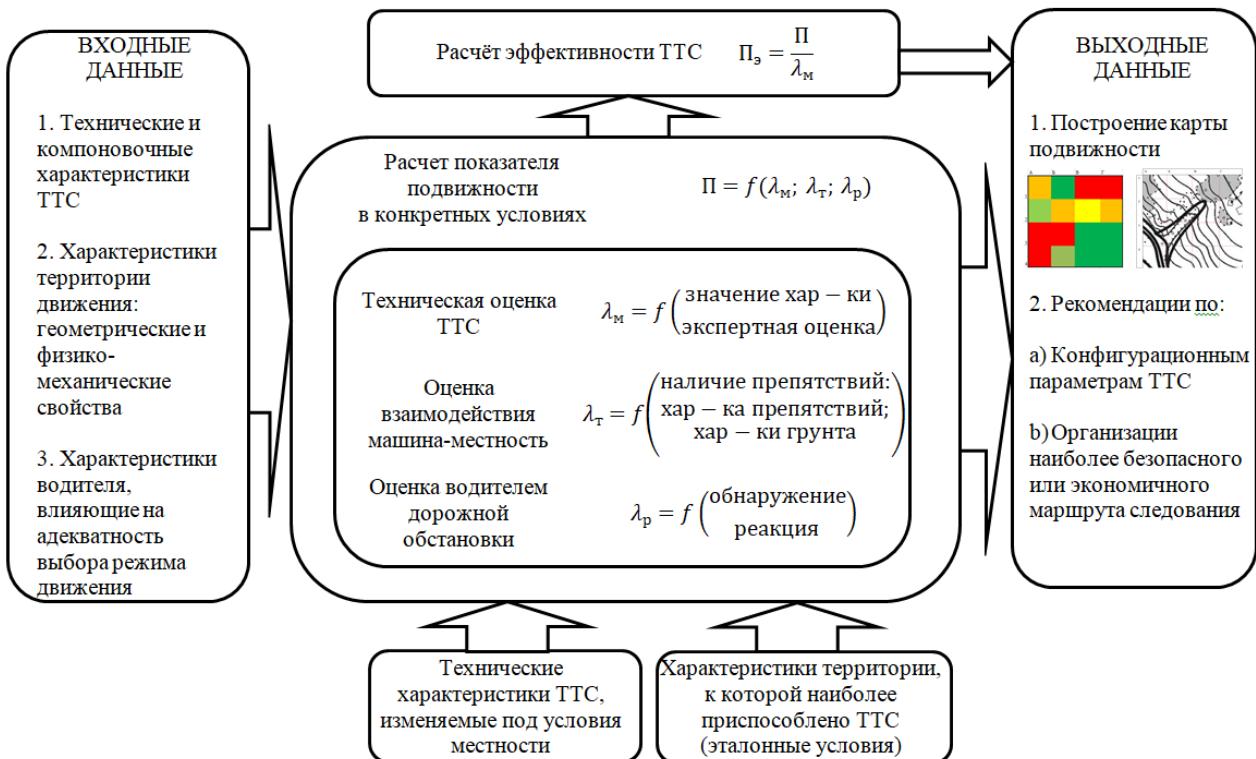


Рис. 2. Обобщенная методика расчета показателя подвижности с точки зрения проходимости колесных ТТС

Fig. 2. A generalized methodology for calculating the mobility indicator in terms of the cross-country ability of wheeled TTVs

Таблица 1.
Сравниваемые ТТС

Table 1.
Compared TTV

РУСАК К-8	«Алдан» модель ЗТМ 3941	«Бурлак» 6x6	«Байкал» модель ЗТМ 30081-10	Вея ЗВМ-39083 4x4	«Ункор» модель ТТС 39101

Для расчетов взята топографическая карта местности (рис. 4) с различными препятствиями: лес, здания, овраг. Карта условно разделена на 16 квадратов 15x15 м для детального расчета и построения карты подвижности для каждого ТТС. Для участков территории характерны: А1, А2, В1, Г1, Г2 – участки с лесом; А3, А4 – участки с водными препятствиями; А3, А4, Б2, Б3 – участки с обрывами; Б2, В2 – овраг; Г2, Г3 – строения; на остальных участках нет ярко выраженных препятствий.

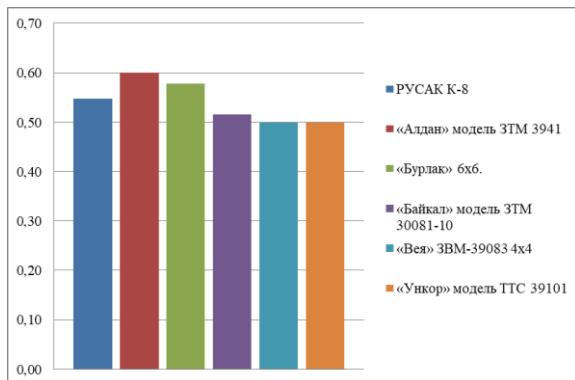


Рис. 3. Техническая оценка ТТС (эффективная подвижность)

Fig. 3. TTV technical assessment (effective mobility)

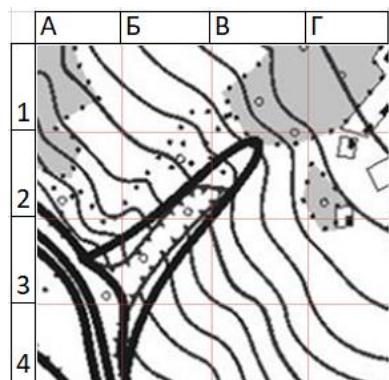


Рис. 4. Топографическая карта территории

Fig. 4. Topographic map of the territory

Оценка эффективности выбранного режима движения непосредственно зависит от водителя, которому необходимо верно оценить ситуацию при движении. Для теоретического расчета выбрано, что за рулем находится водитель в возрасте 35 лет, опыт вождения не менее 5 лет по бездорожью. Допускается, что движение происходит при хорошей погоде, в теплое время года, видимость снижена преимущественно препятствиями на местности (рельеф и растительность). Допускается, что движение происходит при хорошей погоде, в теплое время года, видимость снижена преимущественно препятствиями на местности (рельеф и растительность). По формуле (1) рассчитан показатель подвижности Π для выбранных ТТС, на участках А3 и Б3 частично, на А4, Б1, Г1 все ТТС достигают уровня критической потери подвижности. Это обусловлено наличием дискретных препятствий, расположенных недалеко друг от друга или большим и резким перепадом высот, т.е. обрывом. По формуле (2) рассчитана эффективность по подвижности, т.е. отношение показателя подвижности на территории к эффективной подвижности. В сравнении выделяются участки А4, Б1, Г1, так как все ТТС на данных участках полностью теряли подвижность, показатель $\Pi_{\text{э}}$ меньше 0. На участках А1, Б3 и Г2 $\Pi_{\text{э}}$ меньше 0 только у Ункора и Веи, на участках с подобным характеристиками их использование нерационально. На участках Б1, Б3, Б4, Г3 и Г4 показатель $\Pi_{\text{э}}$ больше 1, что означает, что ТТС может двигаться с максимальной возможной скоростью.

Построение карты подвижности основывается на сравнении эффективной и фактической подвижностей. Если есть запас по подвижности, когда $\Pi_{\text{э}} > 1$, участок окрашен темно-зеленым цветом, если эффективность по подвижности меньше 1, но больше 0.75, участок светло-зеленый, если меньше 0.75, но больше 0.25, участок желтый, если меньше 0.25 и больше 0, участок оранжевый, если показатель меньше 0, участок красный. Результаты приведены на рис. 5. Для участков с лесными массивами характерно, что наибольшей подвижностью обладают маленькие колесные ТТС с высокой маневренностью. Ровные участки без профильных препятствий также хорошо проходят небольшие легкие ТТСиК, у которых изначально высокая максимальная техническая скорость движения и небольшая максимальная масса. Участки с труднопроходимым рельефом преодолеваются только крупными восьми- или шести колесными ТТС. Участки с обрывами или сплошными лесными массивами считаются непреодолимыми. Проезд по ним может осуществляться только после анализа ситуации водителем «здесь и сейчас» (если будет принято решение не обходить кусты и молодые деревья, а разрушить их) и с использованием дополнительных средств повышения проходимости. По аналогии рассчитана и представлена карта подвижности для колесного ТТС «Байкал» модель ЗТМ 30081-10 (рис. 6).

По методике проведен анализ влияния конфигурационных параметров на показатель подвижности. Выделено три группы характеристик: 1) габаритные характеристики (длина и ширина); 2) характеристики двигателя и движителя (1 – мощность, крутящий момент, 2 –

диаметр и ширина колес, 3 – высота протектора); 3) смешанные характеристики (масса, высота, дорожный просвет, радиус поворота). В расчете учитывался тот же фрагмент местности. Показатели технической оценки и эффективности движения посчитаны в среднем для рассматриваемого фрагмента. Участки, считавшиеся непроходимыми для исходной конфигурации ТТС, остались на 96 % непроходимыми для всех модификаций, рассчитанных ниже. Результаты расчетов технической оценки и изменения параметра эффективности представлены на рис. 7-12.

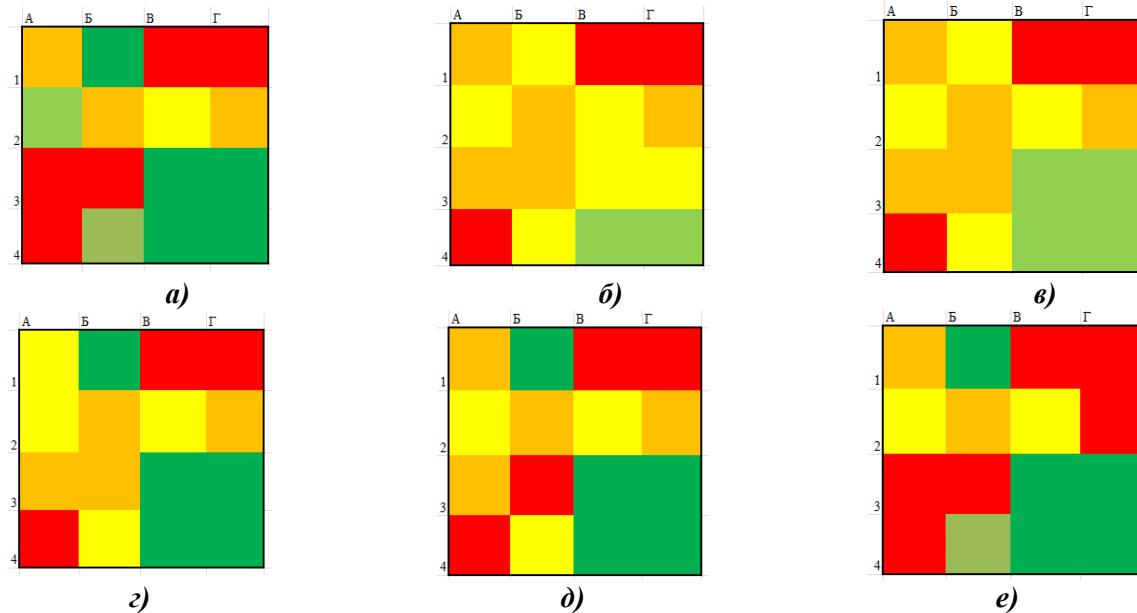


Рис. 5. Карты подвижности для ТТС:

а) «Ункор» модель ТТС 39101; б) РУСАК К-8; в) «Алдан» модель ЗТМ 3941; г) «Бурлак» 6х6;
д) «Байкал» модель ЗТМ 30081-10; е) Вея ЗВМ-39083 4х4

Fig. 5. Mobility maps for TTV:

а) Unkor model TTS 39101; б) RUSAk K-8; в) Aldan model ZTM 3941; г) Burlak 6x6;
д) Baikal model ZTM 30081-10; е) Veya ZVM-39083 4x4

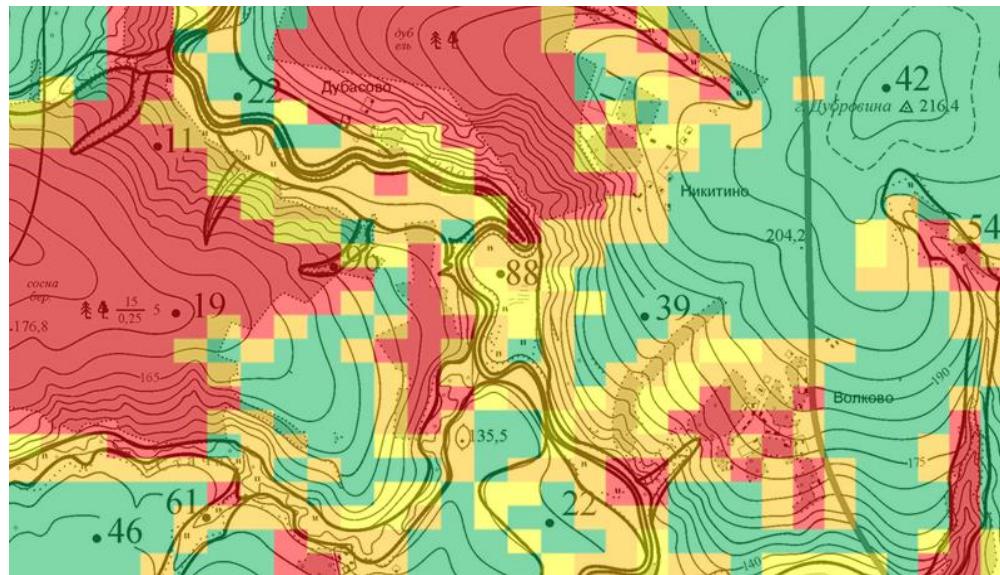


Рис. 6. Карта подвижности «Байкал» модель ЗТМ 30081-10
(объединенная с топографической)

Fig. 6. Mobility map for Baikal model ZTM 30081-10 (combined with topographic)

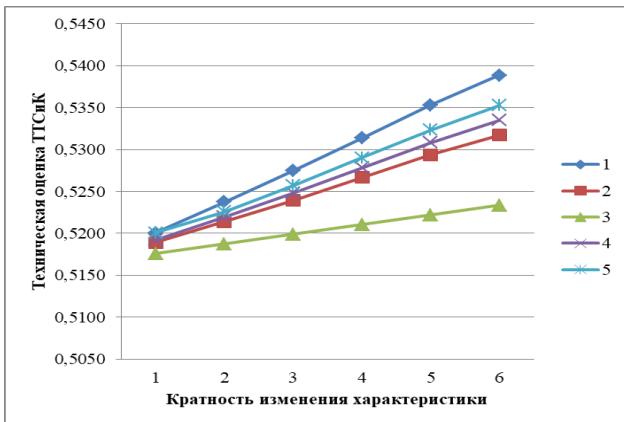


Рис. 7. Зависимость технической оценки ТТС λ_m от изменения длины и ширины:
 1 – на 4 и 4 % соответственно;
 2 – на 0 и 4 % соответственно;
 3 – на 4 и 0 % соответственно;
 4 – на 1 и 4 % соответственно;
 5 – на 4 и 1 % соответственно

Fig. 7. Dependence of the TTV technical assessment λ_m on the change in length and width:

- 1 – by 4 % and 4 % respectively;
- 2 – by 0 % and 4 % respectively;
- 3 – by 4 % and 0 % respectively;
- 4 – by 1 % and 4 % respectively;
- 5 – by 4 % and 1 % respectively

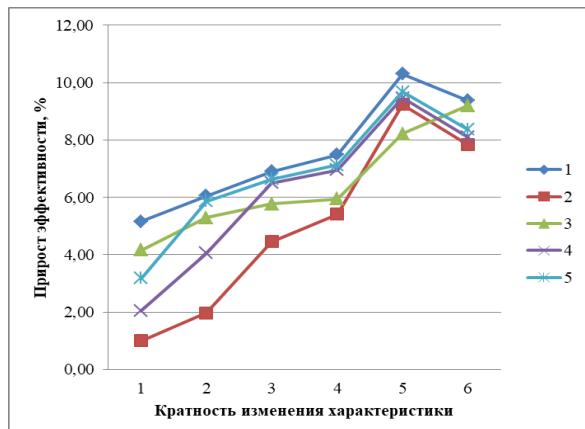


Рис. 8. Зависимость эффективности ТТС от изменения длины и ширины:
 1 – на 4 % и 4 % соответственно;
 2 – на 0 % и 4 % соответственно;
 3 – на 4 % и 0 % соответственно;
 4 – на 1 и 4 % соответственно;
 5 – на 4 % и 1 % соответственно

Fig. 8. Dependence of the TTV efficiency on the change in length and width:

- 1 – by 4 % and 4 % respectively;
- 2 – by 0 % and 4 % respectively;
- 3 – by 4 % and 0 % respectively;
- 4 – by 1 % and 4 % respectively;
- 5 – by 4 % and 1 % respectively

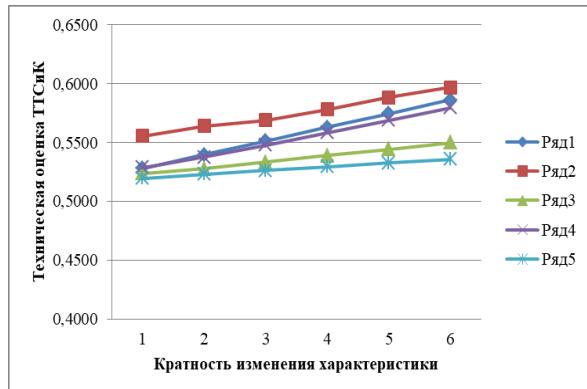


Рис. 9. Зависимость технической оценки ТТС λ_m от изменения параметров двигателя и движителя:
 1 – на 4 %, 2 % и 1 % соответственно;
 2 – на 2 %, 2 % и 2 % соответственно;

- 3 – на 4 %, 0 % и 0 % соответственно;
- 4 – на 0 %, 4 % и 0 % соответственно;
- 5 – на 0 %, 0 % и 1 % соответственно

Fig. 9. Dependence of the TTV technical assessment λ_m on the change in the parameters of the engine and propulsor:

- 1 – by 4 %, 2 % and 1 % respectively;
- 2 – by 2 %, 2 % and 2 % respectively;
- 3 – by 4 %, 0 % and 0 % respectively;
- 4 – by 0 %, 4 % and 0 % respectively;
- 5 – by 0 %, 0 % and 1 % respectively

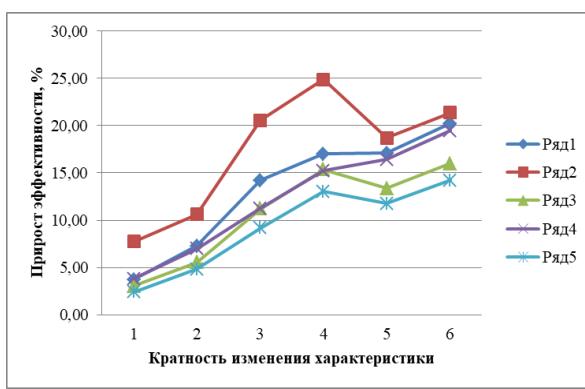


Рис. 10. Зависимость эффективности ТТС от изменения параметров двигателя и движителя:
 1 – на 4 %, 2 % и 1 % соответственно;

- 2 – на 2 %, 2 % и 2 % соответственно;
- 3 – на 4 %, 0 % и 0 % соответственно;
- 4 – на 0 %, 4 % и 0 % соответственно;
- 5 – на 0 %, 0 % и 1 % соответственно

Fig. 10. Dependence of the TTV efficiency on the change in the parameters of the engine and propulsor:

- 1 – by 4 %, 2 % and 1 % respectively;
- 2 – by 2 %, 2 % and 2 % respectively;
- 3 – by 4 %, 0 % and 0 % respectively;
- 4 – by 0 %, 4 % and 0 % respectively;
- 5 – by 0 %, 0 % and 1 % respectively

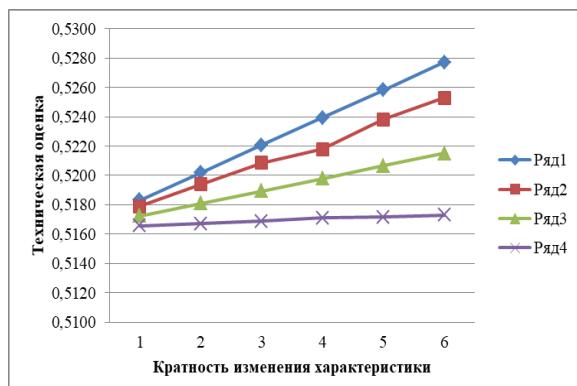


Рис. 11. Зависимость технической оценки ТТС λ_m от изменения массы, высоты, дорожного просвета, радиуса поворота:
1 – на 4 %, 4 %, 1 % и 1 % соответственно;
2 – на 5 %, 0 %, 0 % и 0 % соответственно;
3 – на 2 %, 2 %, 2 % и 0 % соответственно;
4 – на 0 %, 0 %, 0 % и 2 % соответственно

Fig. 11. Dependence of the TTV technical assessment λ_m on the change in mass, height, clearance, turning radius:
1 – by 4 %, 4 %, 1 % and 1 % respectively;
2 – by 5 %, 0 %, 0 % and 0 % respectively;
3 – by 2 %, 2 %, 2 % and 0 % respectively;
4 – by 0 %, 0 %, 0 % and 2 % respectively

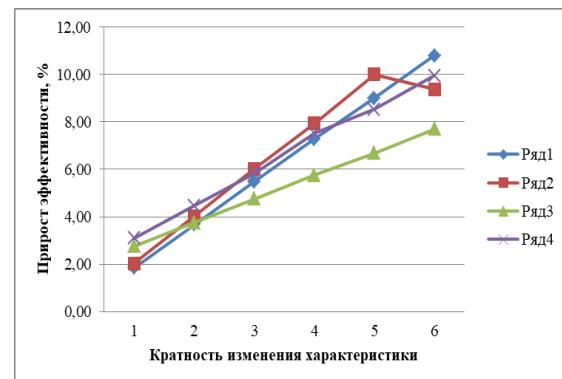


Рис. 12. Зависимость эффективности ТТС от изменения массы, высоты, дорожного просвета, радиуса поворота:
1 – на 4 %, 4 %, 1 % и 1 % соответственно;
2 – на 5 %, 0 %, 0 % и 0 % соответственно;
3 – на 2 %, 2 %, 2 % и 0 % соответственно;
4 – на 0 %, 0 %, 0 % и 2 % соответственно

Fig. 12. Dependence of the TTV efficiency on the change in mass, height, clearance, turning radius:
1 – by 4 %, 4 %, 1 % and 1 % respectively;
2 – by 5 %, 0 %, 0 % and 0 % respectively;
3 – by 2 %, 2 %, 2 % and 0 % respectively;
4 – by 0 %, 0 %, 0 % and 2 % respectively

У функции эффективности наблюдается экстремум в точке, соответствующей изменению конфигурационной характеристики более, чем на 16+4 %. При достижении этого значения эффективность снижается и целесообразно не менять конфигурацию исходного ТТС, а проектировать новую.

Выводы

Рассмотрена методика оценки эффективности использования ТТС по подвижности, отличающаяся более точными результатами по сравнению с существующими: она позволяет оценить возможность или невозможность движения не только качественно, но и качественно, прогнозируя скорость, с какой может двигаться ТТС. Предложен метод использования топографических карт высокой точности для определения характеристик местности. Расчет технической оценки колесных ТТС показал, что без учета характеристик участка местности наиболее эффективными являются образцы с колесной формулой 8x8 и большой мощностью двигателя (0,55 и 0,6), так как у них наибольший потенциал по грузоподъемности и надежности. Наименьшим показателем технической оценки обладают колесные ТТС колесной формулой 4x4 за счет малой грузоподъемности и меньших габаритов (0,5).

Существующие методики оценки эффективности не учитывают влияние параметров местности на движение; методики оценки проходимости не учитывают скоростные и топливные показатели ТТС. Эффективность колесных ТТС напрямую зависит от условий местности, на которой планируется их использование. Нельзя рассматривать эффективность использования колесных ТТС в отрыве от характеристик территории, по которой планируется движение. В ряде случаев использование больших ТТС с колесной формулой 8x8 неэффективно из-за рельефа и дискретных препятствий, в других – небольшие ТТС колесной формулой 4x4 неэффективны из-за малой грузоподъемности. Наиболее универсальны в применении на территории с несколькими смешанными типами препятствий колесные ТТС с колесной формулой 6x6.

Существует предел изменения конфигурационных характеристик в сторону увеличения технической оценки – в среднем на 16 %, дальнейшее изменение характеристик ухудшает показатель подвижности и эффективности по подвижности. При изменении габаритных характеристик: изменение высоты влияет несущественно на показатель эффективности (в пределах 1 %); изменение длины и ширины нецелесообразно более, чем на 16 %, изменение длины в 2,3 раза эффективнее изменения ширины. Так, при уменьшении длины на 4 % эффективность ТТС повышается на 4,16 %, а при уменьшении ширины на 4 % эффективность повысится на 1 %. Одновременное уменьшение габаритных размеров на 7-10 % без изменения иных характеристик повышает эффективность на 7 %.

При изменении параметров двигателя и движителя: раздельное изменение параметров двигателя, движителя и протектора на 4 % увеличивает эффективность на 2,5-4 %, изменение на 8 % – на 5-7 %, изменение на 12 % – на 9-12 %. Одновременное изменение технических характеристик на 4 % увеличит эффективность ТТС на 10 %, изменение на 8 % увеличит эффективность на 24 %. Но при изменении показателей на 8 % и более при изменении других зависимых характеристик может повысить эффективность менее, чем на 24 % или потребовать внесения дополнительных изменений в конструкцию. При изменении полной массы на 25 % без снижения грузоподъемности следует увеличение эффективности на 10 %. Увеличение дорожного просвета целесообразно до 12 %, эффективность увеличивается на 3-5 %, но дальнейшее увеличение просвета нецелесообразно. Уменьшение радиуса поворота на каждые 4 % увеличивает эффективность на 1,2 %.

Библиографический список

1. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 4 (101). – С . 72-77.
2. **Бабков, В.Ф.** Дорожные условия и безопасность дорожного движения / В.Ф. Бабков. – М.: Транспорт, 1993. – 271 с.
3. **Безбородова, Г.Б.** О направлениях научных исследований проходимости автомобилей // Известия вузов. Машиностроение. – 1965. – № 5. – С. 145-148.
4. **Гребенщиков, В.И.** Исследование проходимости автомобиля по мягким грунтам // Автомобильная промышленность. – 1956. – № 10. – С. 12-15.
5. **Зезюлин, Д.В.** Влияние параметров движителей на показатели эффективности колесных машин при движении по снегу / Д.В. Зезюлин, У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. Сетевое научное издание. – 2012. – № 5. URL: www.science-education.ru/105-6927 (дата обращения: 05.06.2012).
6. **Платонов, В.Ф.** Гусеничные и колесные транспортно-тяговые машины / В.Ф. Платонов, Г.Р. Ленишвили. – М.: Машиностроение, 1986. – 294 с.
7. **Беккер, М.Г.** Введение в теорию систем местность-машина / М.Г. Беккер. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
8. **Вахидов, У.Ш.** Математическое описание дорог типа «stone-road» / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. Сетевое научное издание. – 2012. – № 3. URL: www.science-education.ru/103-6376 (дата обращения: 05.06.2012).
9. **Гончаров, К.О.** Экспериментальные исследования многоосной колесной машины / К.О Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2010. – № 12. – С. 10.
10. **Горелов, В.А.** Прогнозирование характеристик криволинейного движения автомобиля с колесной формулой 6х6 при различных законах управления поворотом колес задней оси / В.А. Горелов, Г.О. Котиев // Известия вузов. Сер. «Машиностроение». – 2008. – № 1. – С. 44-55.
11. **Котиев, Г.О.** Теория подрессоривания высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин : учебное пособие / Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач, А.А. Стадухин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – 196 с.
12. **Makarov, V.** Study of uneven surfaces distribution on forestry roads / V. Makarov, A. Markovnina, A. Papunin, A. Belyaev, K. Goncharov, V. Klubnichkin, E. Klubnichkin, V. Belyakov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177 (2019) 012041/ [Электронный ресурс] URL: www.science-education.ru/105-6927 (дата обращения: 05.06.2012).

- https://www.researchgate.net/publication/332323479_Study_of_uneven_surfaces_distribution_on_forest_ry_roads (дата обращения 10.03.2024). DOI:10.1088/1742-6596/1177/1/012041
13. Агейкин, Я.С. Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. – М. : Машиностроение, 1981. – 232 с.
 14. Антонов, А.С. Армейские автомобили. Теория / А.С. Антонов, Ю.А. Кононович, Е.И. Магидович и др. – М.: Воениздат, 1970. – 527 с.
 15. Бабков, В.Ф. Проходимость колесных машин по грунту / В.Ф. Бабков, А.К. Бируля, В.М. Сиденко. – М.: Автотрансиздат, 1959. – 189 с.
 16. Бабков, В.Ф. Образование колеи при движении автомобиля // Труды совещания по проходимости колесных и гусеничных машин по целине и грунтовым дорогам. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. С. 94-115.
 17. Беляков, В.В. Методика расчета и анализ путей повышения проходимости многоосных колесных машин по снегу. Дис... канд.тех.наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 1991. – 307 с.
 18. Кравец, В.Н. Теория автомобиля / В.Н. Кравец, В.В. Селифонов. – М. : ООО «Гринлайт», 2011. – 884 с.
 19. Наумов, В.Н. Моделирование прямолинейного движения транспортно-технологического средства с роторно-винтовым движителем / В.Н. Наумов, К.Ю. Машков, К.Е. Бяков // Известия вузов. Сер. «Машиностроение». – 2013. – № 12. – С. 31-35.
 20. Wong, J.Y. Theory of Ground Vehicles. 3-rd Edition. – Wiley-Interscience, 2001. – 560 p.
 21. Dohnal, F. Detection of Microrelief Objects to Impede the Movement of Vehicles in Terrain / F. Dohnal, M. Hubacek, K. Simkova // International Journal of Geo-Information, – 2019. – N 8 (3): – p. 101. DOI:10.3390/ijgi8030101

References

1. Belyakov V.V., Zeziulin D.V., Kolotilin V.E., Makarov V.S. 2013. "Podvizhnost' nazemnykh transportno-tehnologicheskikh mashin" [Mobility of Ground Transport and Technological Machines]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University], no. 4 (101): 72-77.
2. Babkov V.F. 1993. *Dorozhnye usloviia i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya* [Road Conditions and Traffic Safety]. Moscow: Transport.
3. Bezyborodova G.B. 1965. "O napravleniakh nauchnykh issledovanii prokhodimosti avtomobilei" [On the Directions of Scientific Research on Vehicle Mobility]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie* [University News. Mechanical Engineering], no. 5: 145-148.
4. Grebenschikov V.I. 1956. "Issledovanie prokhodimosti avtomobilia po miagkim gruntam" [Study of Vehicle Mobility on Soft Soils]. *Avtomobil'naia promyshlennost'* [Automotive Industry], no. 10: 12-15.
5. Zeziulin D.V., Vakhidov U.Sh., Makarov V.S. and Belyakov V.V. 2012. "Vliyanie parametrov dvizhitelei na pokazateli effektivnosti kolesnykh mashin pri dvizhenii po snegu" [Influence of Propulsion System Parameters on Performance Indicators of Wheeled Vehicles Moving on Snow]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia* [Modern Problems of Science and Education], no. 5. Accessed June 5, 2012. www.science-education.ru/105-6927.
6. Platonov V.F. and Leinashvili G.R. 1986. *Gusenichnye i kolesnye transportno-tiagovye mashiny* [Tracked and Wheeled Transport and Traction Vehicles]. Moscow: Mashinostroenie.
7. Bekker M.G. 1973. *Vvedenie v teoriu sistem mestnost'-mashina* [Introduction to the Terrain-Vehicle Systems Theory]. Moscow: Mashinostroenie.
8. Vakhidov U.Sh., Makarov V.S. and Belyakov V.V. 2012. "Matematicheskoe opisanie dorog tipa 'stone-road'" [Mathematical Description of 'Stone-Road' Type Roads]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia* [Modern Problems of Science and Education], no. 3. Accessed June 5, 2012. www.science-education.ru/103-6376.
9. Goncharov K.O., Makarov V.S. and Belyakov V.V. 2010. "Eksperimental'nye issledovaniia mnogosnoi kolesnoi mashiny" [Experimental Studies of a Multi-Axle Wheeled Vehicle]. *Nauka i obrazovanie: elektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie* [Science and Education: Electronic Scientific and Technical Publication], no. 12: 10.
10. Gorelov V.A. and Kotiev G.O. 2008. "Prognozirovaniye kharakteristik krivolineinogo dvizheniya avtomobilia s kolesnoi formuloi 6kh6 pri razlichnykh zakonakh upravleniia poverotom koles zadnei osi" [Prediction of Curvilinear Motion Characteristics of a 6x6 Vehicle with Different Steering Laws for the Rear Axle Wheels]. *Izvestiya VUZov. Ser. "Mashinostroenie"* [University News. Series "Mechanical Engineering"], no. 1: 44-55.

-
11. Kotiev G.O., Sarach E.B. and Stadukhin A.A. 2023. *Teoriia podressorivaniia vysokopodvizhnykh dvukhvennykh gusenichnykh mashin* [Theory of Suspension for High-Mobility Two-Link Tracked Vehicles]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana.
 12. Makarov V., Markovina A., Papunin A. [et al.]. 2019. “Study of Uneven Surfaces Distribution on Forestry Roads”. *IOP Conference Series: Journal of Physics: Conference Series* 1177: 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1177/1/012041>.
 13. Ageikin Ya.S. 1981. *Prokhodimost' avtomobilei* [Vehicle Cross-Country Mobility]. Moscow: Mashinostroenie.
 14. Antonov A.S., Kononovich Yu.A., Magidovich E.I. [et al.]. 1970. *Armeiskie avtomobili. Teoriia* [Military Vehicles. Theory]. Moscow: Voenizdat.
 15. Babkov V.F., Birulia A.K. and Sidenko V.M. 1959. *Prokhodimost' kolesnykh mashin po gruntu* [Cross-Country Mobility of Wheeled Vehicles on Soil]. Moscow: Avtotransizdat.
 16. Babkov V.F. 1950. “Obrazovanie kolei pri dvizhenii avtomobilia” [Rut Formation During Vehicle Movement]. In *Trudy soveshchaniia po prokhodimosti kolesnykh i gusenichnykh mashin po tseline i gruntovym dorogam* [Proceedings of the Meeting on Cross-Country Mobility of Wheeled and Tracked Vehicles on Virgin Soil and Dirt Roads], 94-115. Moscow: Izd-vo AN SSSR.
 17. Belyakov V.V. 1991. “Metodika rascheta i analiz putei povysheniia prokhodimosti mnogosnykh kolesnykh mashin po snegu” [Calculation Methodology and Analysis of Ways to Improve Cross-Country Mobility of Multi-Axle Wheeled Vehicles on Snow]. PhD diss., Nizhnii Novgorod.
 18. Kravets V.N. and Selifonov V.V. 2011. *Teoriia avtomobilia* [Vehicle Theory]. Moscow: Grinlait.
 19. Naumov V.N., Mashkov K.Yu. and Biakov K.E. 2013. “Modelirovaniye priamolineinogo dvizheniya transportno-tehnologicheskogo sredstva s rotorno-vintovym dvizhitelem” [Modeling of Straight-Line Motion of a Transport-Technological Vehicle with a Rotary-Screw Propulsion System]. *Izvestiia VUZov. Ser. Mashinostroenie* [University News. Series “Mechanical Engineering”], no. 12: 31-35.
 20. Wong J.Y. 2001. *Theory of Ground Vehicles*. 3rd ed. New York: Wiley-Interscience.
 21. Dohnal F., Hubacek M. and Simkova K. 2019. “Detection of Microrelief Objects to Impede the Movement of Vehicles” in Terrain. *International Journal of Geo-Information* no. 8(3): 101. <https://doi.org/10.3390/ijgi8030101>.

Дата поступления

в редакцию: 02.06.2025

Дата принятия

к публикации: 25.09.2025

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ РЕЗИН, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

А.А. Сухов

ORCID: 0009-0003-8491-1791 e-mail: asukhov95@yandex.ru

Российский федеральный ядерный центр –

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики

Саров, Россия

В.А. Кузьмин

ORCID: 0000-0001-9958-527X e-mail v_a_kuzmin@mail.ru

Российский федеральный ядерный центр –

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики

Саров, Россия

Д.В. Пресняков

ORCID: 0009-0007-1225-084X e-mail: presnyakov.diman@yandex.ru

Российский федеральный ядерный центр –

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики

Саров, Россия

В.А. Кикеев

ORCID: 0000-0002-2375-0803 e-mail: kikeev.va@nnntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

Исследованы модели деформирования некоторых марок резин ТМКЩ-М-6, ТМКЩ-С-20, НО-68-1НТА, наиболее часто используемых в конструкциях автомобилей, тракторов, подъемно-транспортных, строительных, дорожных, коммунальных машин, вспомогательного транспортно-технологического оборудования. Проведена верификация их параметров для численного моделирования динамики и прочности при механических воздействиях. Экспериментальные характеристики при сжатии исследуемых марок резин получены на испытательном стенде с использованием программ численного моделирования. Приведены параметры моделей деформирований рассматриваемых марок резин. Результаты работы могут быть использованы для расчета и проектирования транспортно-технологических средств и их комплексов.

Ключевые слова: механические характеристики конструкционных материалов транспортных средств; модели материалов транспортно-технологических комплексов; численное моделирование; опыт на сжатие; диаграмма напряжение-деформация; оценка износостойкости.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сухов, А.А. Определение механических свойств материалов и параметров моделей деформирования некоторых резин, используемых в транспортно-технологических комплексах / А.А. Сухов, В.А. Кузьмин, Д.В. Пресняков, В.А. Кикеев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 121-130. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_121 EDN: BORDNL

DETERMINATION OF MATERIAL MECHANICAL PROPERTIES AND DEFORMATION MODELS PARAMETERS OF SOME RUBBERS USED IN TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL COMPLEXES

A.A. Sukhov

ORCID: **0009-0003-8491-1791** e-mail: asukhov95@yandex.ru

Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics
Sarov, Russia

V.A. Kuzmin

ORCID: **0000-0001-9958-527X** e-mail v_a_kuzmin@mail.ru

Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics
Sarov, Russia

D.V. Presnyakov

ORCID: **0009-0007-1225-084X** e-mail: presnyakov.diman@yandex.ru

Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics
Sarov, Russia

V.A. Kikeev

ORCID: **0000-0002-2375-0803** e-mail: kikeev.va@nnstu.ru

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents studies of deformation models of some brands of rubbers TMKSh-M-6, TMKSh-S-20, NO-68-1NTA, most often used in the designs of cars, tractors, lifting and transport, construction, road, municipal vehicles, auxiliary transport and technological equipment. Their parameters were verified for numerical modeling of dynamics and strength under mechanical influences. Experimental compression characteristics of the studied rubber brands were obtained on a test bench using numerical simulation software. The parameters of the deformation models of the rubber brands under consideration were obtained. The results can be used for the calculation and design of transport and technological vehicles and their complexes.

Key words: mechanical characteristics of vehicle structural materials; models of materials for transport and technological complexes; numerical modeling; compression test; stress-strain diagram; wear resistance assessment.

FOR CITATION: A.A. Sukhov, V.A. Kuzmin, D.V. Presnyakov, and V.A. Kikeev. Determination of material mechanical properties and deformation models parameters of some rubbers used in transport and technological complexes. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 121-130. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_121 EDN: BORDNL

Введение

Экспериментальные методы исследования свойств материалов являются важной составляющей процессов расчета и проектирования транспортно-технологических средств и их комплексов. Они часто выступают единственным источником информации о механических характеристиках конструкционных материалов, на основе которых проводится оценка поведения материалов в условиях реальной эксплуатации, их прочности, износостойкости, долговечности. Основная цель настоящей работы – исследование моделей деформирования при механических воздействиях марок резин, наиболее часто используемых в различных транспортно-технологических комплексах [1-11], в частности, в конструкциях подъемно-транспортных, строительных, дорожных, коммунальных машин, автомобилей, тракторов, вспомогательного транспортно-технологического оборудования. Как конструкционный материал резина имеет широкое распространение в транспортных средствах и их комплексах благодаря ряду свойств, выгодно отличающих ее от традиционных материалов (металлы и

жесткие пластики). К положительным качествам резины следует отнести ее большую энергоемкость; значительные обратимые деформации; хорошую перерабатываемость и легкость изготовления деталей, особенно в серийном производстве; высокую долговечность при циклическом нагружении; высокие демпфирующие и звукопоглощающие свойства [12-14].

Резины ТМКЩ (тепломорозокислотоотталкивающие) являются высокоустойчивыми к воздействию температур, кислот и щелочей, а также механическим (ударным, деформационным, фрикционным, вибрационным) нагрузкам. Их используют для производства уплотнений неподвижных соединений (подкладок, прокладок), уплотнений, а также антифрикционных элементов, предотвращающих трение между металлическими деталями транспортных средств. Резиновая смесь НО-68-1 НТА используется для изготовления таких видов изделий как амортизаторы, уплотнители, а также шланги, рукава, трубы. Изделия из НО-68-1-НТА можно использовать для технических масел, бензинов и различных видов топлива, что является значимым аргументом для использования данного материала при изготовлении элементов конструкции транспортных средств. Также из данного материала изготавливаются транспортерные ленты.

Теоретические сведения

Для описания деформирования такого материала, как резина, необходимо использовать специальные модели гиперупругих материалов. Среди наиболее распространенных моделей гиперупругих материалов – модель Огдена, модель Муни-Ривлина и их модификации.

Модель Огдена – это модель гиперупругого материала, используемая для описания нелинейного поведения сложных материалов (каучуки, полимеры и биологические ткани) в условиях напряжения-деформации. Она была разработана Рэймондом Огденом в 1972 г. Как и другие модели гиперупругих материалов, она предполагает, что поведение материала может быть описано с помощью функции плотности энергии деформации, из которой могут быть выведены зависимости напряжение–деформация.

Потенциальная энергия деформации равна:

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} \left(\overline{\lambda_1}^{\alpha_i} + \overline{\lambda_2}^{\alpha_i} + \overline{\lambda_3}^{\alpha_i} - 3 \right) + \sum_{k=1}^N \frac{1}{d_k} (J - 1)^{2k}$$

где W – потенциальная энергия деформации;

$\overline{\lambda_p}$ ($p=1,2,3$) – главные девиаторы растяжения, определяемые как $\overline{\lambda_p} = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_p$;

λ_p – главные растяжения левого тензора Коши-Грина;

J – детерминант градиента упругой деформации;

N , μ_p , α_p и d_p – константы материала.

Ограничений для константы N нет. Однако более высокое значение N может обеспечить лучшее соответствие точному решению, но это может вызвать численные трудности при подборе констант. Поэтому очень высокое значение N не рекомендуется.

Начальный модуль сдвига μ определяется по формуле:

$$\mu = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \alpha_i \mu_i$$

Начальный объемный модуль K определяется по формуле:

$$K = \frac{2}{d_1}$$

Для $N=1$ и $\alpha_1=2$, модель Огдена эквивалентна модели Гука. Для $N=2$, $\alpha_1=2$ и $\alpha_1=-2$ модель Огдена эквивалентна модели Муни-Ривлина с двумя параметрами.

Проведение эксперимента для определения механических характеристик резины

При испытаниях на сжатие использовалось по три образца на каждую из марок резины. Образец резины для сжатия имеет форму цилиндра. В табл. 1 приведены размеры и материалы резины. Определение характеристик при сжатии проведено по ГОСТ 265-77.

Таблица 1.
Размеры и материалы образцов резины для испытания на сжатие
Table 1.
Dimensions and materials of rubber specimens for compression testing

Материал	Диаметр d , мм	Высота h , мм
Пластина ПФ 500x500x20 НО-68-НТА ТУ 38 1051959-90	30	13
Пластина 2Н-1-ТМКЩ-М-6 ГОСТ 7338-90	30	13
Пластина 2Н-1-ТМКЩ-С-20 ГОСТ 7338-90	30	13

Усредненная диаграмма «нагрузка – перемещение» для испытанных марок резин при сжатии показана на рис. 1.

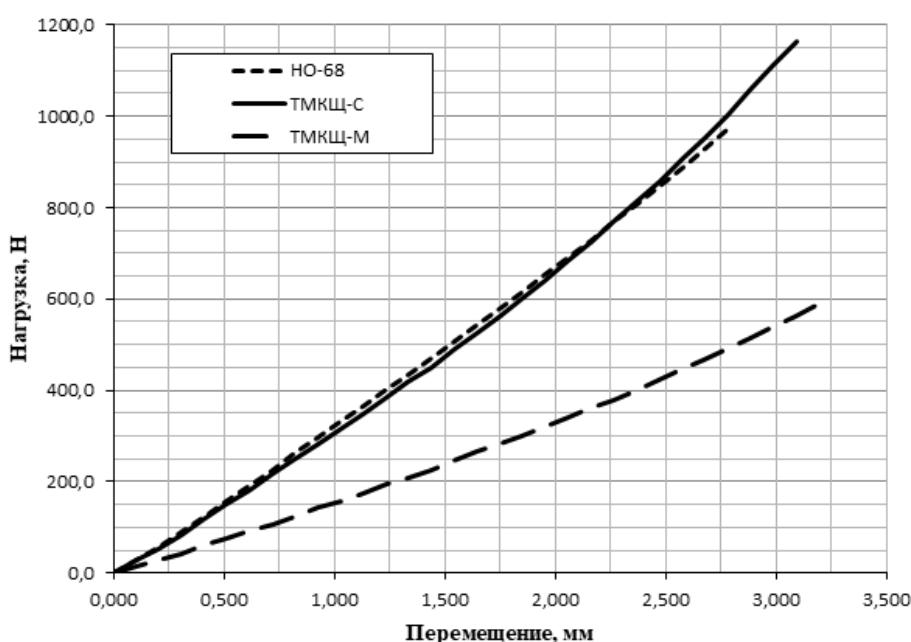


Рис. 1. Усредненные диаграммы для резин при испытании на сжатие

Fig. 1. Average diagrams for rubbers under compression testing

Проведение численного моделирования

Был проведен анализ ряда моделей гиперупругого деформирования материалов: Arruda-Boyce, Blatz-Ko, Gent, Neo-Hookean, Ogden 1st Order, Yeoh 1st Order. В результате обработки экспериментальных данных (рис. 1) для рассматриваемых марок резины были определены параметры указанных выше моделей деформирования. Численное моделирование с целью верификации моделей деформирования материалов по результатам экспериментов проводилось в современном программном комплексе. Учитывая осевую симметрию конструкции, при проведении расчета рассматривали $\frac{1}{4}$ часть конструкции с заданием соответствующих граничных условий.

Расчетная модель представляет собой образец резины, зажатый с двух сторон цилиндрами из стали. Контактное взаимодействие резины со стальными цилиндрами с двух сторон задавалось линейным контактом. В процессе моделирования один из стальных цилиндров

был зафиксирован в результате запрета перемещений вдоль оси. Узлам второго цилиндра задавалось соответствующее эксперименту перемещение. В качестве модели деформирования стальных цилиндров принята упругая модель: модуль упругости $E=2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,3$. В результате численного моделирования были получены результаты конечно-элементного моделирования сжатия резины. На рис. 2-4 показаны графики «нагрузка – перемещение» для рассматриваемых марок резин. Кривые результатов для моделей материалов Gent, Neo-Hookean и Yeoh 1st Order совпадают.

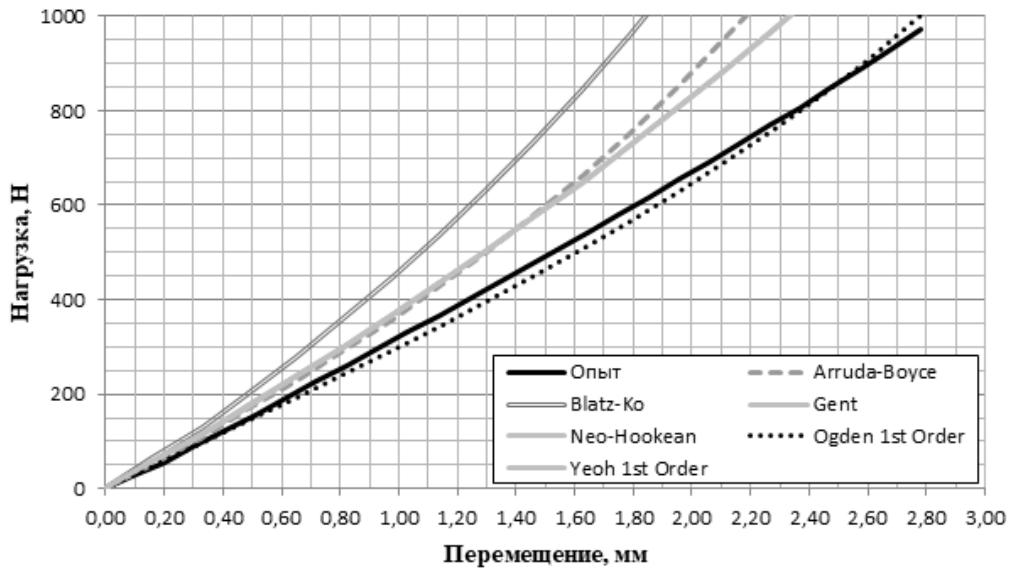


Рис. 2. Диаграмма «нагрузка – перемещение» для материала НО-68 при моделировании сжатия

Fig. 2. Load-displacement diagram for NO-68 material during compression simulation

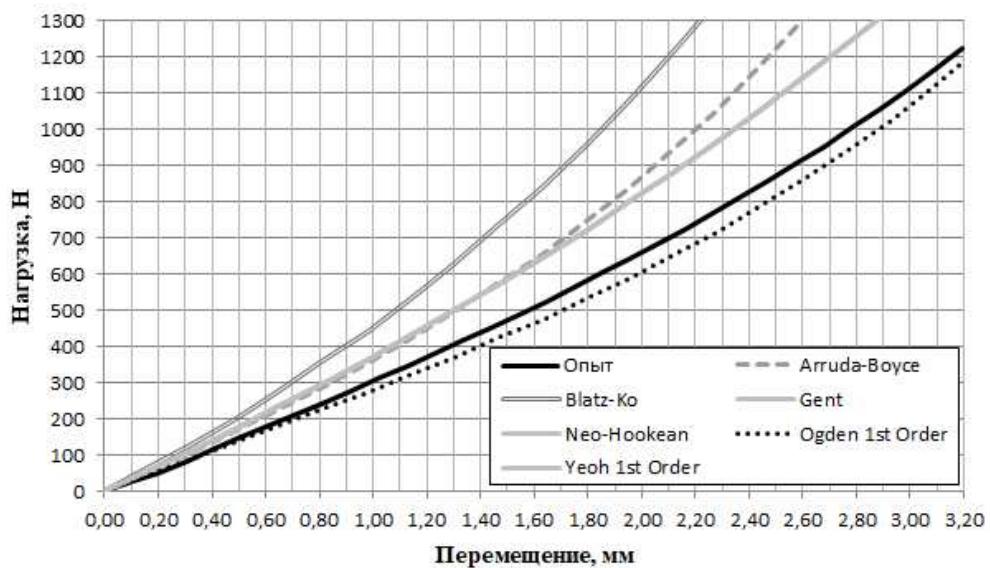


Рис. 3. Диаграмма «нагрузка – перемещение» для материала ТМКШ-С при моделировании сжатия

Fig. 3. Load-displacement diagram for TMKSh-S material during compression simulation

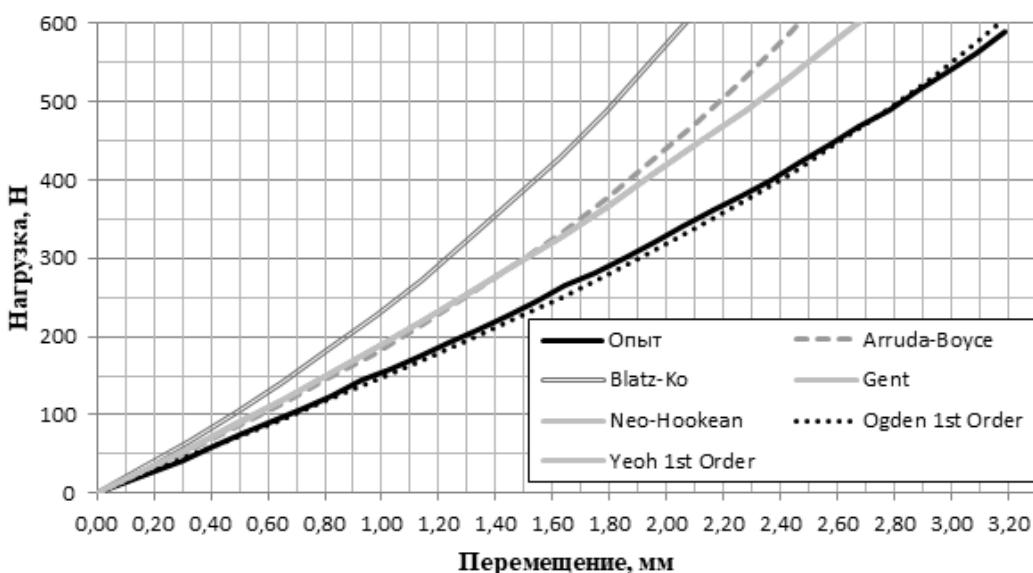
Исходя из данных численного моделирования, можно отметить, что при использовании модели Ogden 1st Order с определенными параметрами модели деформирования получено лучшее согласование с экспериментальными данными. Используемые параметры модели Ogden 1st Order для различных марок резин приведены в табл. 2. Максимальная относитель-

ная разница результатов численного моделирования и экспериментальных данных составляет: для резины НО-68 – не более 6,7 %, для резины ТМКШ-С – не более 9,7 %, для резины ТМКШ-М – не более 5,6 %.

Таблица 2.
Коэффициенты модели материала Ogden 1st Order

Table 2.
Ogden 1st Order material model coefficients

Марка резины	μ , МПа	A1	D1, МПа ⁻¹
НО-68	0,58121	6,7381	0
ТМКШ-С	0,49512	7,4561	0
ТМКШ-М	0,28608	6,7283	0



**Рис. 4. Диаграмма «нагрузка – перемещение»
для материала ТМКШ-М при моделировании сжатия**

Fig. 4. Load-displacement diagram for TMKSh-M material during compression simulation

Дополнительно проводился эксперимент по вдавливанию стального шара в круглую пластинку из резины марок НО-68, ТМКШ-С, ТМКШ-М с целью валидации полученных параметров модели деформирования материала Ogden 1st Order. Диаметр стального шара 22 мм; размеры образцов и материалы резины приведены ранее в табл. 1. В результате эксперимента были получены диаграммы «нагрузка-перемещение» для каждой марки резины (рис. 5). Учитывая осевую симметрию конструкции, при проведении расчета рассматривалась $\frac{1}{4}$ часть конструкции с заданием соответствующих граничных условий. Расчетная модель представляет собой сборку, состоящую из стального цилиндра, с расположенным сверху образцом резины, на котором располагается стальной шарик. Нагружение осуществляется вдавливанием стального шарика в образец. Контактное взаимодействие резины с цилиндром и шаром задавалось линейным контактом. Контактное взаимодействие резины со стальным шаром задавалось с трением. Коэффициент трения, принятый в расчетах, задавался равным 0,49. В качестве модели деформирования стальных цилиндра и шарика принята упругая модель: модуль упругости $E=2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,3$.

По условиям эксперимента до начала нагружения шарик прижимался к образцу резины. Поджатие осуществлялось вдавливанием шарика в резину на величину 0,2 мм. Поэтому общее перемещение шарика при моделировании задавалось 3,45 мм. При обработке результатов начальное поджатие вычиталось. В результате проведенного численного моделирования были получены графики «нагрузка-перемещение» для рассматриваемых марок резины

(рис. 6-8). Максимальная относительная разница результатов численного моделирования и экспериментальных данных получилась с использованием модели Ogden 1st Order: для резины НО-68 – не более 14 %, для ТМКЩ-С – не более 17 %, для ТМКЩ-М – не более 8 %.

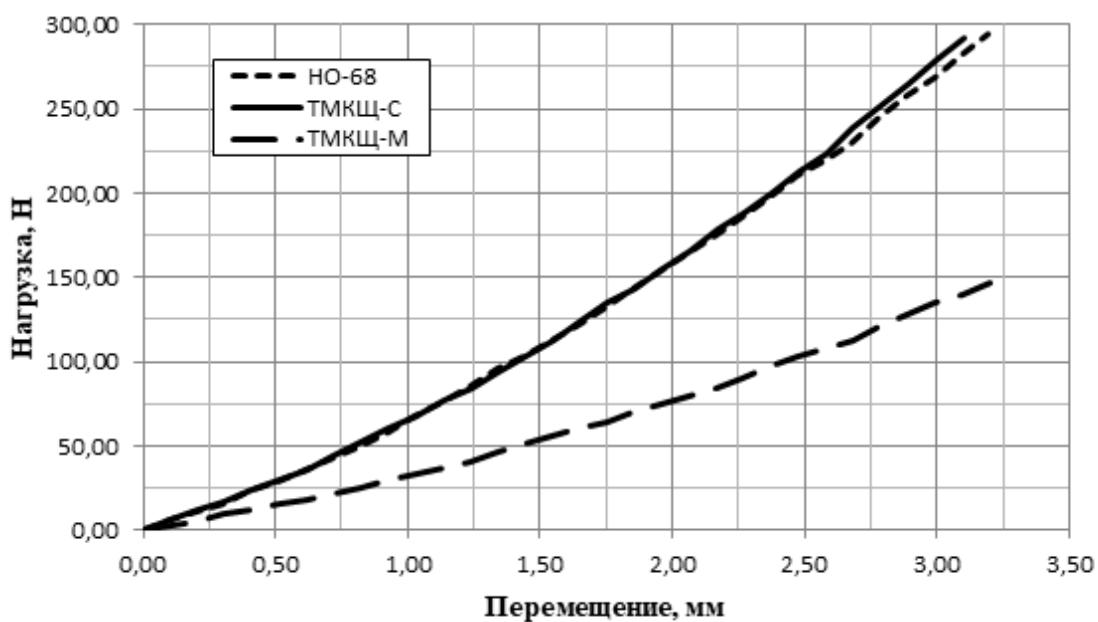


Рис. 5. Усредненная диаграмма «нагрузка – перемещение» для резин при испытании на вдавливание

Fig. 5. Average load-displacement diagram for rubbers in indentation testing

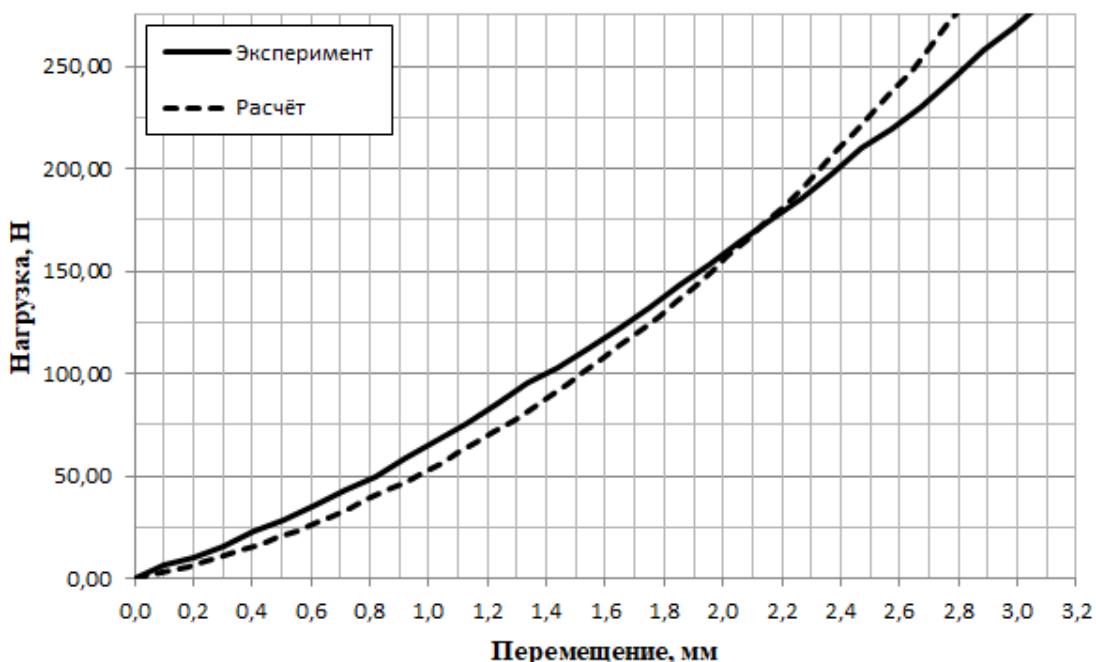


Рис. 6. Диаграмма «нагрузка – перемещение» для материала НО-68 при моделировании вдавливания шарика

Fig. 6. Load-displacement diagram for NO-68 material when simulating ball indentation

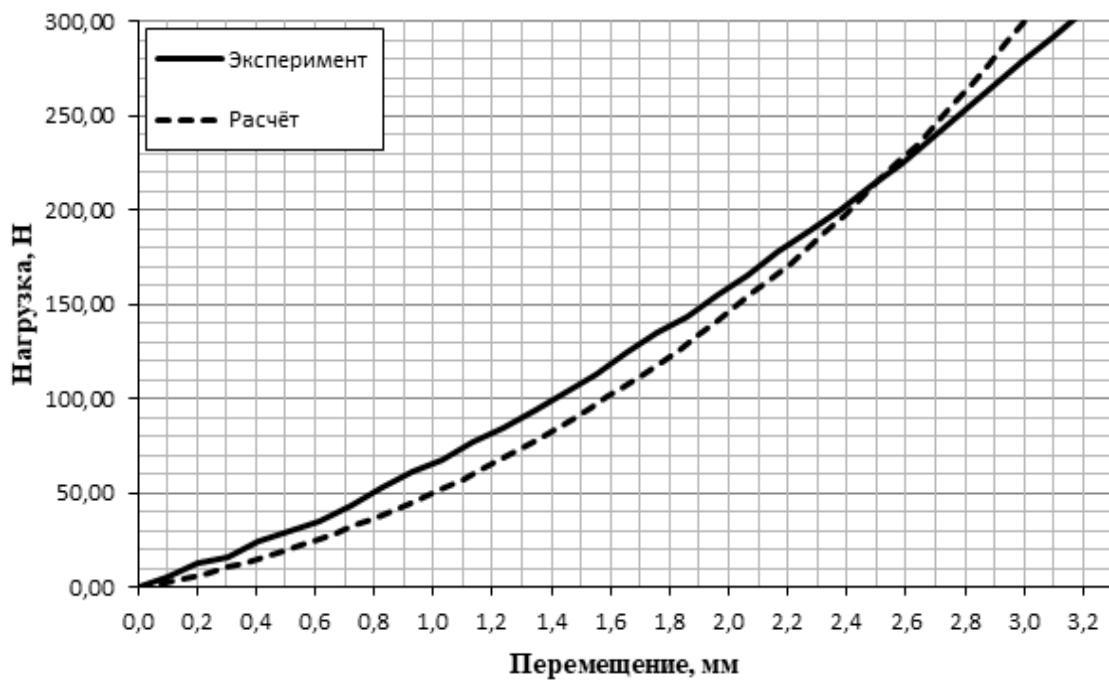


Рис. 7. Диаграмма «нагрузка – перемещение» для материала ТМКШ-С при моделировании вдавливания шарика

Fig. 7. Load-displacement diagram for TMKSh-S material when simulating ball indentation

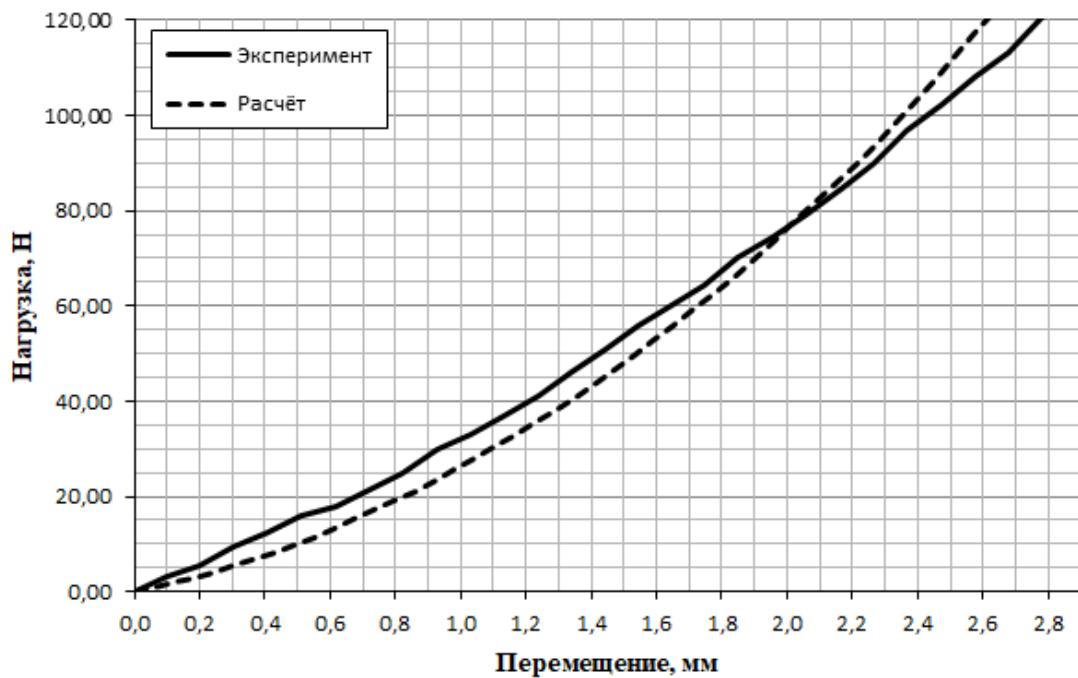


Рис. 8. Диаграмма «нагрузка – перемещение» для материала ТМКШ-М при моделировании вдавливания шарика

Fig. 8. Load-displacement diagram for TMKSh-M material when simulating ball indentation

Таким образом, получено хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных.

Выводы

В данной работе представлены результаты экспериментов по сжатию резин марок ТМКЩ-М-6, ТМКЩ-С-20, НО-68-1НТА, часто используемых в различных транспортно-технологических комплексах. На основе экспериментальных данных получены параметры моделей деформирования рассматриваемых марок резин. Данные модели позволяют в дальнейшем проводить численные исследования по оценке поведения деталей машин в условиях эксплуатационного нагружения без проведения экспериментов, зачастую длительных и дорогостоящих. Проведена верификация и валидация моделей деформирования по результатам экспериментов.

По результатам численного моделирования деформирования модель Ogden 1st Order с определенными для каждой марки резины параметрами показала лучшее согласование с экспериментальными данными. Относительная разница результатов численного моделирования сжатия резины и экспериментальных данных составляет: для резины НО-68 – не более 6,7 %, для резины ТМКЩ-С – не более 9,7 %, для резины ТМКЩ-М – не более 5,6 %. Дополнительно был проведен эксперимент по вдавливанию стального шарика в резины марок НО-68, ТМКЩ-С, ТМКЩ-М с целью валидации полученной модели материала Ogden 1st Order.

Относительная разница результатов численного моделирования вдавливания шарика и экспериментальных данных составляет: для резины НО-68 составила не более 14 %, для ТМКЩ-С – не более 17 %, для ТМКЩ-М – не более 8 %.

Библиографический список

1. **Бидерман, В.Л.** Автомобильные шины / В.Л. Бидерман [и др.]. – М.: Гос. науч.-техн. изд. хим. литературы, 1963. – 384 с.
2. **Цукерберг, С.М.** Пневматические шины / С.М. Цукерберг [и др.]. – М.: Химия, 1973. – 264 с.
3. **Тарковский, В.Н.** Автомобильные шины / В.Н. Тарковский, В.А. Гудков, О.Б. Третьяков. – М.: Транспорт, 1990. – 217 с.
4. **Власов, Г.Я.** Основы технологии шинного производства / Г.Я. Власов [и др.]. – Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2002. – 460 с.
5. **Бакфиш, К.** Новая книга о шинах / К. Бакфиш, Д. Хайнц. – М.: Астрель: АСТ, 2003. – 303 с.
6. **Алексеев, А.М.** Судовые виброгасители / А.М. Алексеев, А.К. Сборовский. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 196 с.
7. **Алексеев, П.С.** Схемно-технические решения и экспериментальные исследования виброзолятора с преобразованием движения инерционных элементов / П.С. Алексеев, А.В. Синев, О.О. Мугин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2012. – № 1. – С. 96-101.
8. **Шилько, С.В.** Расчет вязкоупругих и термомеханических параметров шинных резин по результатам динамических испытаний / С.В. Шилько, Д.А. Черноус, А.В. Хотько, А.П. Сазанков, С.Н. Бухаров // Механика машин, механизмов и материалов. – 2022. – № 2 (59). – С. 24–30.
9. **Ghoreishy Mir Hamid Reza.** Determination of the parameters of the Prony series in hyper-viscoelastic material models using the finite element method / Mir Hamid Reza Ghoreishy // Materials and Design. – 2012. – Vol. 35. – P. 791-797.
10. **Гамлицкий, Ю.А.** Прочность резины. Модель и расчет / Ю.А. Гамлицкий, М.В. Швичич // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2005. – Т. 47, № 4. – С. 660-668.
11. **Третьякова, Н.А.** Увеличение стойкости резинокордных изделий к воздействию внешних факторов морского климата / Н.А. Третьякова // Промышленное производство и использование эластомеров. – 2018. – № 3. – С. 43-46.
12. **Дырда, В.И.** Резиновые элементы вибрационных машин (Конструкция. Прикладные методы расчетов) / В.И. Дырда. – Киев: Наукова думка, 1980. – 100 с.
13. **Григорьев, Е.Т.** Расчет и конструирование резиновых амортизаторов / Е.Т. Григорьев. – М.: Гос. науч.-техн. издательство машиностроительной литературы, 1960. – 160 с.
14. **Ляпунов, В.Т.** Резиновые виброзоляторы: Справочник / В.Т. Ляпунов, Э.Э. Лавендел, С.А. Шляпочников. – Л.: Судостроение, 1988. – 216 с.

References

1. Biderman V.L. [et al.]. 1963. *Avtomobil'nye shiny* [Automobile Tires]. Moscow: Gos. nauch.-tekhn. izd. khim. literatury.
2. Tsukerberg S.M. [et al.]. 1973. *Pnevmaticheskie shiny* [Pneumatic Tires]. Moscow: Khimiia.
3. Tarkovskii V.N., Gudkov V.A. and O.B. Tret'iakov. 1990. *Avtomobil'nye shiny* [Automobile Tires]. Moscow: Transport.
4. Vlasov G.Ia. [et al.]. 2002. *Osnovy tekhnologii shinnogo proizvodstva* [Fundamentals of Tire Manufacturing Technology]. Voronezh: Voronezh. gos. tekhnol. akad.
5. Bakfish K. and Khaïnts D. 2003. *Novaia kniga o shinakh* [The New Book About Tires]. Moscow: Astrel': AST.
6. Alekseev A.M. and Sborovskii A.K. 1962. *Sudovye vibrogasiteli* [Marine Vibration Dampers]. Leningrad: Sudpromgiz.
7. Alekseev P.S., Sinev A.V. and Mugin O.O. 2012. “Skhemno-tehnicheskie resheniia i eksperimental'nye issledovaniia vibroizoliatora s preobrazovaniem dvizheniia inertsionnykh elementov” [Circuit-Technical Solutions and Experimental Studies of a Vibration Isolator with Motion Transformation of Inertial Elements]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability], no. 1: 96-101.
8. Shilko S.V., Chernous D.A., Khotko A.V., Sazankov A.P., and Bukharov, S. N. 2022. “Raschet vyazkouprugikh i termomechanicheskikh parametrov shinnykh rezin po rezul'tatam dinamicheskikh ispytanij” [Calculation of viscoelastic and thermomechanical parameters of tire rubbers based on dynamic tests results]. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov*, no. 2(59): 24-30.
9. Ghoreishy M.H.R. 2012. Determination of the parameters of the Prony series in hyper-viscoelastic material models using the finite element method. *Materials and Design*, no. 35: 791-797. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.005>
10. Gamilitskiy Y.A. and Shvichich M.V. 2005. “Prochnost' reziny. Model' i raschet” [Strength of rubber. Model and calculation]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A* [Polymer Science. Series A], no. 47(4): 660-668.
11. Tret'iakova N.A. 2018. “Uvelichenie stoikosti rezinokordnykh izdelii k vozdeistviu vneshnikh faktorov morskogo klimata” [Increasing the Resistance of Rubber-Cord Products to External Factors of Marine Climate]. *Promyshlennoe proizvodstvo i ispol'zovanie elastomerov* [Industrial Production and Use of Elastomers], no. 3: 43-46.
12. Dyrda V.I. 1980. *Rezinovye elementy vibratsionnykh mashin (Konstruktiiia. Prikladnye metody raschetov)* [Rubber Elements of Vibration Machines (Design. Applied Calculation Methods)]. Kiev: Naukova dumka.
13. Grigor'ev E.T. 1960. *Raschet i konstruirovaniye rezinovykh amortizatorov* [Calculation and Design of Rubber Shock Absorbers]. Moscow: Gos. nauch.-tekhn. izdatel'stvo mashinostroitel'noi literatury.
14. Liapunov V.T., Lavendel E.E. and Shliapochnikov S.A. 1988. *Rezinovye vibroizoliatory: Spravochnik* [Rubber Vibration Isolators: A Handbook]. Leningrad: Sudostroenie.

Дата поступления
в редакцию: 05.02.2024

Дата принятия
к публикации: 27.10.2025

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Вольников Рамиль Маратович – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Катаева Лилия Юрьевна – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук

Куликов Александр Борисович – ведущий электроник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Куликов Владимир Борисович – ведущий инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Ханилов Валерий Павлович – заместитель директора ИРИТ Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор

Чернобаев Игорь Дмитриевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Аркадов Геннадий Викторович – генеральный директор Некоммерческого партнерства содействию развитию системной инженерии «Райз», канд. техн. наук

Будников Алексей Владимирович – главный специалист Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова», канд. техн. наук

Дедов Дмитрий Антонович – инженер-испытатель 3-й категории Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова»

Добров Александр Алексеевич – старший научный сотрудник НИЛ Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Доронков Денис Владимирович – старший научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Зырянова Татьяна Константиновна – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Колосов Сергей Владимирович – инженер 2-й категории Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Колотушкин Дмитрий Сергеевич – заместитель начальника отдела ядерной безопасности и надежности Нововоронежской атомной станции им. В.А. Сидоренко – Филиала Российского концерна по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях

Крепков Владимир Павлович – начальник отдела Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

Курицин Даниил Дмитриевич – младший научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Легчанов Максим Александрович – директор ИЯЭиТФ Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент

Логинов Андрей Владимирович – заместитель начальника отдела Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

Маринин Антон Александрович – младший научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Николаев Данил Сергеевич – младший научный сотрудник НИЛ Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Рязанов Антон Владимирович – старший научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Семашко Владимир Алексеевич – инженер-испытатель 2-й категории Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африканова»

Слепов Михаил Тимофеевич – начальник отдела технической диагностики Нововоронежской атомной станции им. В.А. Сидоренко – Филиала Российского концерна по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях

Сумин Роман Викторович – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Погорелов Михаил Дмитриевич – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Шалина Дарья Сергеевна – инженер 2-й категории Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Кузьмин Вадим Анатольевич – ведущий научный сотрудник Российской федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики, канд. техн. наук

Марковнина Алина Ивановна – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Рожков Александр Игоревич – ведущий инженер-конструктор отдела пассивной безопасности Центрального научно-исследовательского автомобильного и автомоторного института «НАМИ»

Солопов Дмитрий Юрьевич – заведующий отделом пассивной безопасности Центрального научно-исследовательского автомобильного и автомоторного института «НАМИ»

Сухов Антон Андреевич – инженер-исследователь 2-й категории Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики

Пресняков Дмитрий Валентинович – начальник научно-исследовательской группы Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Жителев Даниил Анатольевич – инженер-конструктор 2-й категории Центрального научно-исследовательского автомобильного и автомоторного института «НАМИ»

Кикеев Василий Андреевич – заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент

**ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ
«ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

*Адрес редакции: 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
ауд. 1363-3
e-mail: rsl@nntu.ru*

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляются **два печатных экземпляра** статьи и комплекты сопроводительной документации: бумажный и электронный.
- Рекомендуемый объем статьи не превышает 15 страниц текста. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 7; **минимальный объем статьи – 0,5 п.л.**
- **Статью необходимо сопроводить** актом и протоколом экспортного контроля, экспертным заключением о возможности открытого опубликования, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию.
- **Печатные экземпляры** статей должны быть подписаны всеми авторами.
- **Первая страница** статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в порядке, отражающим их авторский вклад); аннотацию, ключевые слова.
- **Аннотация** (120-150 слов) отражает перечисление результатов и ключевых выводов, обозначение новизны и сферы применения.
- **Ключевые слова** (не менее 10) отражают тематическую направленность, объект и результаты исследования.
- Изложение материала должно быть логически выстроенным. **Тематика** представленного исследования должна **строго соответствовать рубрикатору журнала и паспорту специальности ВАК**. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), **библиографический список, содержащий только цитируемые или рассматриваемые в тексте работы**. Ссылки нумеруются в порядке цитирования. **Самоцитирование** рекомендуется ограничить тремя пунктами. Рекомендуется использовать в библиографическом списке ссылки на научные работы по теме исследования, индексируемые в международных базах научного цитирования. Библиографический список не должен включать неопубликованные работы.
- К статье необходимо **приложить файл с информацией об авторах** на русском языке: ФИО (полностью), должность, место работы (полное название организации, город, страна), идентификатор ORCID, e-mail, ученая степень и звание.
- Текст набирается через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое, верхнее и нижнее – 20 мм. Переносы не допускаются. Используется формат *Word for Windows* и стандартные шрифты *Times New Roman* и *Symbol*.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3-12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается. Использованию аббревиатур должна предшествовать их расшифровка.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы: (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel. Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображения выполняются в формате jpg или tif с разрешением 300 dpi. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисуночная подпись 11 жирный кегль, ссылки на рисунки: (рис. 1).

РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПРИНИМАЮТСЯ:

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации

2.3.8 – Информатика и информационные процессы

Валерий Павлович Хранилов: **hranilov@nntu.ru**

2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл,

радиационная безопасность

Максим Александрович Легчанов: **legchanov@nntu.ru**

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Юрий Игоревич Молев: **rsl@nntu.ru**

16+

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 4 (151)

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**

Редакция:

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

rsl@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать: 05.12.2025 Дата выхода в свет 19.12.2025. Формат 60x84 1/8.

Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 8,50. Тираж 100 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.

Типография НГТУ.

Адрес университета и типографии:

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24