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

№ 2 (149)

Нижний Новгород 2025

УДК 050(06) ББК 9я54 Т 78

Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2025. № 2 (149). – 130 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, Г.О. Котиев, М.А. Легчанов, В.С. Макаров, В.Р. Милов, Ю.И. Молев, В.Н. Наумов, П.В. Пакшин, Н.А. Прибатурин, Н.В. Старостин, А.С. Суркова, В.П. Хранилов, А.Е. Хробостов

 В.П. Хранилов – 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-trudyngtu-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

№ 2 (149)

Nizhny Novgorod 2025

Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev / NNSTU n.a. R.E. Alekseev. – Nizhny Novgorod, 2025. № 2 (149). – 130 p.

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. Khrobostov, G.O. Kotiev, 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

S.M. Dmitriev

NNSTU Rector (Nizhny Novgorod, Russia)

Members of Editorial Council

PhD, Doctor of Mathematical Science, Professor McMaster University (Ontario, Canada)
The Széchenyi István University (Győr, Hungary)
The Széchenyi István University (Győr, Hungary)
PhD, Doctor of Philosophical Science, Professor
Shiv Nadar University (India)
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: $\Pi M \ \ \Phi C \ 77\text{-}56417 \ 11.12.2013$

Electronic version of the journal: https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnaltrudy-ngtu-im-r-e-alekseeva

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

Pelinovski Dmitri

László Palkovics Péter Várlaki Vijay Kumar Chakka

Yalciner Akhmet

Chairman

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ	7
Дубков И.А., Бухнин А.В. Архитектура и особенности фильтрации нейросетевой системы определения местоположения по фотографии	7
Жучков Р.Н., Козелков А.С., Мелешкин Н.В., Стручков А.В. Исследование методов вы-	
числения градиента газодинамических величин в конечно-объемных разностных схемах для	16
Коротченко А.Г., Сморякова В.М. О численном решении залачи Коши для одного класса	10
обыкновенных дифференциальных уравнений	31
Тимофеева О.П., Гордеев М.М. Предобработка данных ЭКГ и обнаружение аномалий при	
помощи рекуррентных нейронных сетей	41
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ	50
Болнов В.А., Богланова Е.В., Малкин С.А., Гришин Л.М. Валилация расчетной модели	
топливного компакта программы РАСНАР-ГАЗ для расчета динамики реакторной установ-	
ки с газовым теплоносителем	50
Лапшин Д.А. Разработка методологии для обоснования прочности и целостности контей-	
неров хранения и транспортировки отработавшего ядерного топлива	59
пронин А.н., дмитриев С.м. Влияние теометрических характеристик смесительных лопа-	
ядерных реакторов	77
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ,	~ -
ПРОИЗВОДСТВО	85
Лушкин М.А., Левенков Я.Ю. Метолика автоматизированного выбора нагрузочных ре-	
жимов для проектирования высоконагруженных деталей транспортных средств с использо-	
ванием топологической оптимизации	85
Мавлеев И.Р., Салахов И.И. Кинетостатический и силовой анализ гидромеханических	
дифференциальных механизмов	103
Падалкин Б.В., Стадухин А.А., Майер В.С., Холоденко В.Б. Моделирование системы	
адаптивного круиз-контроля и экстренного торможения оеспилотного транспортного	111
средства	111
наши авторы	125
	140

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE, MANAGEMENT AND SYSTEM ANALYSIS	7
Dubkov I.A., Bukhnin A.V. Architecture and filtering features of neural network system for loca-tion identification from a photograph	7
cu-lating gradient of gas-dynamic quantities in finite volume difference schemes in aerodynamic problems	16
Korotchenko A.G., Smoryakova V.M. On numerical solution of the Cauchy problem for one type of ordinary differential equations	31
Timofeeva O.P., Gordeev M.M. Preprocessing of ECG data and anomaly detection using recurrent neural networks	41
NUCLEAR POWER AND ATOMIC POWER ENGINEERING	50
fuel compact computational model for calculating the dynamics of reactor unit with gas coolant Lapshin D.A. Development of a methodology to justify strength and integrity of containers for spent nuclear fuel storage and transportation	50 59
MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION	77 85
Dushkin M.A., Levenkov Ya.Yu. The method of automated load modes selection for designing highly loaded vehicle parts using topology optimization	85
 Mavleev I.R., Salakhov I.I. Kinetostatic and force analysis of hydromechanical differential mechanisms Padalkin B.V., Stadukhin A.A., Mayer V.S., Kholodenko V.B. Unmanned vehicle adaptive cruise control and emergency braking system simulation 	103 111
AUTHORS	125

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

УДК 004.932.2

DOI 10.46960/1816-210X_2025_2_7 EDN MTEKHK

АРХИТЕКТУРА И ОСОБЕННОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ НЕЙРОСЕТЕВОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПО ФОТОГРАФИИ

И.А. Дубков

ORCID: 0009-0001-9321-2162 e-mail: d.vanya2001@gmail.com

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

А.В. Бухнин ORCID: 0000-0003-3384-5248 e-mail: bukhnin@yandex.ru Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева *Нижний Новгород, Россия*

Представлена инновационная нейросетевая система определения местоположения по фотографии, использующая каскад фильтров для распознавания ключевых признаков: языка надписей, типа ландшафта, разновидности растительности и характеристик дорожного покрытия. Особенность подхода – комбинирование результатов работы всех фильтров по оригинальной вероятностной методике, позволяющей существенно сужать зону поиска. Система успешно различает характерные особенности топологии разных географических регионов, например, красные дороги Австралии, хвойные леса России и Канады, тропическую растительность Южной Америки. Тестирование на общирной выборке фотографий подтверждает высокую эффективность метода – в большинстве случаев система корректно определяет страну или регион съемки. Представленный подход открывает новые возможности для систем, где важна геолокация без метаданных: от туристических сервисов до исторических исследований. Дальнейшее усовершенствование системы предполагает добавление новых фильтров для еще более точного определения местоположения.

Ключевые слова: система нейросетей, определение местоположения, распознавание образов, искусственный интеллект, альтернативная геолокация.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дубков, И.А. Архитектура и особенности фильтрации нейросетевой системы определения местоположения по фотографии / И.А. Дубков, А.В. Бухнин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. №2. С. 7-15. DOI: 10.46960/1816-210Х_2025_2_7 EDN: МТЕКНК

ARCHITECTURE AND FILTERING FEATURES OF NEURAL NETWORK SYSTEM FOR LOCATION IDENTIFICATION FROM A PHOTOGRAPH

I.A. Dubkov ORCID: 0009-0001-9321-2162 e-mail: d.vanya2001@gmail.com Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev Nizhny Novgorod, Russia

A.V. Bukhnin ORCID: 0000-0003-3384-5248 e-mail: bukhnin@yandex.ru Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Nizhny Novgorod, Russia

[©] Дубков И.А., Бухнин А.В., 2025

Abstract. This article presents a neural network system for location identification from a photograph that employs a cascade of filters to recognize key features: text language, landscape type, vegetation variety and road surface characteristics. The distinctive aspect of this approach lies in combining the outputs of all filters using an original probabilistic method, which allows to significantly narrow the search area. The system successfully identifies distinctive topological features of different geographic regions, such as the red roads of Australia, the coniferous forests of Russia and Canada, or the tropical vegetation of South America. Testing on an extensive dataset of photographs confirms the high efficiency of the method, with the system correctly identifies the country or region of capture in most cases. This approach opens new possibilities for applications where metadata-free geolocation is crucial – from travel services to historical research. Further development of the system involves adding new filters to achieve even more precise location identification.

Key words: neural network system, location identification, pattern recognition, artificial intelligence, alternative geolocation.

FOR CITATION: I.A. Dubkov, A.V. Bukhnin. Architecture and filtering features of neural network system for location identification from a photograph. Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev. 2025. № 2. Pp. 7-15. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_7 EDN: MTEKHK

Введение

Распознавание местоположения по фотографиям стало важной задачей компьютерного зрения и машинного обучения, актуальной в различных сферах – от туристических приложений до автоматизированных систем навигации – и реализуемой посредством многих технологий и подходов. Одним из наиболее простых решений являются системы, использующие метаданные изображений, например, EXIF-данные. Они включают информацию о местоположении, если устройство, сделавшее фотографию, поддерживает работу с глобальными навигационными системами, такими как ГЛОНАСС и GPS. Современные социальные сети, например, используют эти метаданные для геолокации фотографий [1], позволяя пользователям отмечать места на своих снимках. Однако этот подход имеет свои ограничения в силу зависимости от глобальных навигационных систем на устройстве и может быть неточным, если данные были изменены или отсутствуют.

С развитием технологий глубокого обучения многие исследователи обратились для распознавания местоположения к нейросетям. Одним из ярких примеров является модель Google Lens, которая использует сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks - CNN) для анализа изображений и определения их местоположения на основе визуальных признаков. Google Lens не только распознает места, но и предоставляет пользователям информацию о них, что делает его мощным инструментом для туристов и исследователей. В последние годы также наблюдается рост интереса к генеративным моделям (Generative Adversarial Networks – GAN). Они могут использоваться для улучшения качества данных и создания синтетических изображений, что позволяет расширять наборы данных для обучения. Например, компании, занимающиеся разработкой автономных транспортных средств, применяют GAN для симуляции различных дорожных условий, что помогает создавать более универсальные системы распознавания. Современные решения часто комбинируют различные подходы, используя как метаданные, так и глубокое обучение. Например, приложение Snapchat использует комбинацию GPS-данных и технологий распознавания изображения для создания фильтров и эффектов, основанных на местоположении пользователя. Это позволяет не только улучшить взаимодействие с пользователями, но и предоставить им уникальный контент, связанный с конкретным местом. Другим направлением является использование картографических данных для улучшения точности распознавания местоположения. Такие системы, как Apple Maps, анализируют изображения в контексте карт, сопоставляя объекты на фото с известными ориентирами (landmark-объектами). Это позволяет более точно определять местоположение, особенно в городских условиях, где архитектура и инфраструктура могут значительно варьироваться. Несмотря на достижения в области распознавания местоположения, существует ряд ограничений и аспектов, которые требуют внимания. Одной из основных проблем является качество и разнообразие обучающих данных. Наборы данных часто могут быть несбалансированными, что приводит к снижению производительности моделей на менее представленном классе изображений. Например, нейросеть, обученная на изображениях одного города, может не работать так же эффективно в другом городе с иными архитектурой и ландшафтом.

Контекстуальные факторы также могут затруднить распознавание местоположения. Погодные условия и временные изменения (ремонт или строительство) могут значительно влиять на внешний вид объектов на фотографиях. Это делает систему уязвимой к ошибкам, особенно в динамичной городской среде. Кроме того, использование изображений для распознавания местоположения затрагивает вопросы этики и конфиденциальности. Системы, использующие изображения людей или частной собственности, могут нарушать права на личную жизнь, что требует разработки этических норм и стандартов. Например, такие компании, как *Clearview AI*, столкнулись с критикой из-за использования лицензионных изображений без согласия пользователей, что ведет к правовым проблемам. Наконец, выбор модели и ее параметров также представляет собой сложную задачу. Сложные модели требуют значительных вычислительных ресурсов для обучения и могут быть неэффективны для применения в реальном времени. Это ограничивает использование некоторых высокоэффективных решений в мобильных приложениях и на устройствах с ограниченными ресурсами.

Архитектура используемых нейросетей

Нейросетевые технологии, особенно глубокое обучение, стали основой для современных систем компьютерного зрения, обеспечивая автоматическое извлечение признаков из изображений. Одной из самых эффективных архитектур для обнаружения объектов является YOLO (You Only Look Once), которая была разработана с целью объединить задачи локализации и классификации в одном процессе. В отличие от традиционных методов, которые требуют нескольких этапов (генерация регионов и последующая классификация) [2], YOLO использует одноэтапный подход. Структурно она работает по следующему принципу: изображение разбивается на сетку, и каждая ячейка отвечает за предсказание объектов, центральные точки которых в нее попадают [3]. Такой механизм позволяет модели эффективно обрабатывать изображения, минимизируя количество вычислительных ресурсов, необходимых для выполнения задач обнаружения объектов. YOLO использует регрессионный подход к предсказанию границ объектов и уверенности в их наличии, что делает его более быстрым и эффективным по сравнению с традиционными методами. Важным вкладом в развитие YOLO стала реализация модели от компании Ultralytics, известная как YOLOv5. Эта версия модели отличается высокой производительностью и простотой использования. Ultralytics предоставляет удобный интерфейс и документацию, что делает обучение и развертывание моделей доступным для разработчиков, даже без глубоких знаний в области машинного обучения. Одним из основных преимуществ Ultralytics является поддержка различных форматов данных, что позволяет использовать модель с разными наборами данных и аннотациями.

В контексте нашей системы, использующей *Ultralytics* и YOLO в качестве фильтров для анализа изображений, было решено адаптировать гиперпараметры и архитектуру модели под специфические задачи. Была разработана система, использующая методы компьютерного зрения для анализа местоположений на основе изображений, собранных из *Google Maps* и *Street View*. Она включает в себя несколько уровней обработки и анализа данных, что позволяет эффективно локализовать изображения, определяя их географические координаты.

Описание системы

На первом этапе разработки системы была создана обширная база данных, состоящая из более 1000 фотографий, которые были собраны с помощью *Google Maps* и *Street View*. Эти изображения были сопоставлены с их точными географическими координатами, что создало

основу для дальнейшего анализа. На основании полученной базы данных было создано четыре фильтра: фильтр типа ландшафта, фильтр подтипа ландшафта, фильтр типа дороги и почвы, на которой проводилась съемка, и языковой фильтр. Каждый из них состоит из одной или более нейросетей, натренированных на вышеуказанной базе данных для распознавания конкретных объектов или их отсутствия. Так, например, языковой фильтр, реализованный в первую очередь, основан на использовании программного обеспечения (ПО) с открытым исходным кодом PaddleOCR, также известного как PaddlePaddle. Данное ПО представляет собой набор нейросетей, натренированных для распознавания и классификации различных языков на фотографиях. С использованием PaddleOCR при наличии на фотографии определенных объектов и характеристик мы сможем категоризировать изображение и существенно сузить зону поисков. Принципы обработки изображений основываются на нескольких ключевых этапах. Сначала проводится предварительная обработка, включающая коррекцию цветового баланса и изменение размеров. Эти действия необходимы для улучшения качества входных данных и повышения их пригодности для последующего анализа. Аналогично набору фотографий, используемому в системе [4], все фотографии были приведены к одинаковому формату 250х250 рх. Затем контрастность изображений была увеличена на 20 %, что в среднем повышает эффективность анализа изображений [3]. После предварительной обработки изображения передаются на этап анализа, где используются нейросети для распознавания объектов и извлечения признаков. На этом этапе фильтры применяются для выявления текстовой информации и определения других параметров: тип дороги, на которой был сделан снимок, тип окружающего ландшафта, надписи на различных языках. Основной задачей является извлечение релевантной информации, которая затем используется для определения местоположения. Важно отметить, что вся система построена с учетом необходимости обрабатывать большие объемы данных в реальном времени.

Важным этапом работы является применение извлеченной информации для перекрестного анализа признаков с целью сужения зоны возможного местоположения на карте мира. Так, при обнаружении признаков «Степь» и «Красная дорога» система должна прийти к выводу о том, что данная фотография была сделана в Австралии. Данный эффект достигается следующим образом: карта мира была разделена на зоны, соответствующие странам и их географическому положению. В начале анализа фотографии каждой зоне назначается числовой коэффициент, соответствующий текущей вероятности того, что данный снимок был сделан в данной области (на старте работы системы он равен 1 для всех зон). Затем при прохождении через фильтр Φ_i текущая вероятность для данной зоны Z_j : f_{ij} . Тогда вероятность Pj того, что фотография была сделана в области Z_j , вычисляется по следующей формуле (1):

$$Pj = \prod_{i=1}^{n} fij \tag{1}$$

Таким образом, если фильтр Φ_k определяет, что только некоторые зоны Z_p и Z_m могут содержать признаки, соответствующие обнаруженным на фотографии, то он назначает им высокие коэффициенты f_{pk} и f_{mk} , а остальным – малые. Данная формула позволяет использовать пересечение множеств зон, соответствующих конкретным результатам работы фильтров, для вероятностного анализа с достаточно высокой эффективностью.

Природа фильтров

Языковой фильтр включал в себя модуль уже созданной сверточной нейросети *PaddleOCR*, обученной на базе данных ряда языков: русского, английского, арабского, китайского, французского, немецкого, японского, корейского, испанского. Данный набор, хотя и несовершенен в своем покрытии основных популярных языков мира, пригоден для

определения местоположения: помимо английского и, возможно, испанского языков, каждый из вышеперечисленных встречается преимущественно в локализованной области мира, что позволяет при обнаружении их на фотографии сузить возможное местоположение до пределов одной или нескольких стран. Английский язык при обнаружении может с высокой вероятностью указывать либо на страну, где он является государственным, либо на культурный туристический центр. На текущем этапе работы было решено использовать упрощенную модель и считать, что наличие надписи на английском языке означает, что фотография была сделана в США, Англии или Австралии, а наличие испанского языка – в Испании соответственно. В результате оценки точности системы было определено, что данный фильтр успешно идентифицирует различные надписи на указанных языках с точностью до 95 %, и успешно определяет конкретные языки с точностью 94 %. При этом само наличие надписи на конкретном языке позволяет с высокой точностью сузить круг поиска до конкретной страны. Большинству пар стран и языков (Франция и французский, Россия и русский) были присвоены коэффициенты z = 0.99 при обнаружении на фото, английскому и испанскому – коэффициенты z = 0.6 в их соответствующих территориях, что отражает их распространенность в других странах мира (табл. 1).

Таблица 1.

Назначенные веса для значений различных зон языкового фильтра *Table 1.* Weights assigned to the different zones of the language filter

Признак (обнаруженный язык)	Коэффициент фильтра		
Английский	0,6		
Испанский	0,6		
Русский	0,99		
Французский	0,99		
Арабский	0,99		
Китайский	0,99		
Немецкий	0,99		
Японский	0,99		
Корейский	0,99		

При работе над фильтром распознавания типа ландшафта было решено применить общий внешний вид пейзажа как основной признак: на фотографии с соответствующим пейзажем при помощи меток выделялись области леса и степи. Выбор именно этих двух подтипов пейзажа основан на предположении, что именно они являются основными специфическими для России. В будущем для повышения эффективности фильтра планируется расширить набор категорий путем включения пустынь, морских побережий, гор.

Поскольку внутри одной категории пейзажа внешний вид может крайне отличаться, эффективность данного фильтра оказалась низкой. В процессе его использования выявлена одна интересная особенность использованной сети YOLO: в силу специфики ее архитектуры при повторном использовании системы на одной и той же фотографии можно получить различные результаты распознавания. Предположительно это вызвано элементом случайности, появляющимся в системе в процессе разбиения изображения на сетку, что делает результат зависящим от некоторого случайного шанса. Решением данной проблемы стало последовательное применение нейросети на одной и той же фотографии для устранения статистической погрешности, где конечный прогноз типа ландшафта на фотографии делался на основе наиболее предсказанного типа в десяти последовательных прогнозах. Данная модель анализа позволила существенно повысить уровень точности предсказания: с 78 до 92,5 %.

Согласно собранной статистике, около 90 % фотографий, на которых представлен лес, сделаны в Европе и Южной Америке, в то время как более 90 % фотографий степи – в США,

Мексике, Австралии и нескольких странах Азии (России, Китае и Казахстане). С высокой степенью точности можно считать: если фильтр определил окружающий ландшафт как «лес», целесообразно сузить зону поиска до стран Европы и Южной Америки, а при наличии признака «степь» – оставить в зоне поиска только США, Мексику, Австралию, азиатскую часть России, Казахстан, Китай и Монголию. Было решено, что соответствующие коэффициенты z будут распределены: 0,85 для признака «лес» и 0,9 для признака «степь» (табл. 2).

Таблица 2. Назначенные веса для значений различных зон фильтра ландшафта Table 2.

Weights assigned to the different zones of the landscape filter

Признак (обнаруженный ландшафт)	Коэффициент фильтра	
Лес	0,5	
Степь	0,7	

С другой стороны, фильтр анализа подвидов ландшафта работает по аналогичному принципу, но натренирован на распознавание уже конкретных объектов, различающих типы ландшафта между собой. На данном этапе было решено реализовать только подтипы лесного ландшафта, так как он является самым характерным конкретно для России. Было решено выделить наиболее распространенные типы леса: умеренного пояса, тропический и хвойный [5]. Соответственно, объектами поиска стали хвойные и лиственные деревья, а также тропическая растительность. По результатам тестирования натренированная нейросеть, хотя и могла различать типы деревьев, делала это с точностью только 65 %: предположительно потому, что отдельные деревья на настоящих фотографиях леса плохо различимы даже человеческим глазом, так как они легко сливаются с окружением. Более того, цвет зелени на деревьях (листва и хвоя) различается не только в зависимости от вида и рода деревьев, но и от освещения, что делает данный признак особенно чувствительным к малейшим отклонениям от нормы. Преимуществом данного признака над предыдущим рассмотренным является его намного более точное сужение круга поисков. Так, гарантированно нельзя увидеть хвойный лес в тропиках и на экваторе, в Бразилии, Африке или Австралии, но при этом тропический лес отсутствует в Норвегии или Канаде. В частности, после статистического анализа фотографий типов леса по всему миру было установлено, что умеренный лес встречался в 80 % случаев исключительно в Европе, тропический – в Южной Америке, Новой Зеландии, Панаме, а хвойный - только в Канаде, России и Норвегии. Соответственно, веса данных критериев (коррелирующие с оценкой степени влияния фильтра на сужение зоны поиска) будут выше, чем влияние фильтра типа ландшафта, что было отражено в значениях коэффициентов в табл. 3.

Таблица 3.

Назначенные веса для значений различных зон фильтра видов леса

Таблица 3.

Weights assigned to the different zones of the forest types filter

Признак (обнаруженный тип леса)	Коэффициент фильтра		
Умеренный	0,7		
Тропический	0,9		
Хвойный	0,7		

В рамках работы над фильтром анализа видов дорог под ногами было решено применить схожий подход, как и в случае с фильтром для анализа ландшафта. Основным признаком для фильтра служила поверхность дороги, при этом выделялось несколько основных категорий: черный асфальт, серый асфальт, красная дорога, гравийные и грунтовые дороги. При помощи меток размечались фотографии, определялось, к какой категории относится каждая дорога, и эти данные использовались для тренировки модели. Очевидно, что каждый тип дорожного покрытия имеет свои уникальные цветовые и текстурные особенности, что может быть применено для более точного распознавания [6].

Черный асфальт чаще всего встречается в крупных городах и мегаполисах (Нью-Йорк, Лондон, Токио, Москва и др.) Он характерен для шоссе и длинных, требовательных к износоустойчивости маршрутов благодаря своей долговечности и способности выдерживать интенсивные нагрузки транспортных средств. Серый асфальт имеет широкое применение в пригородах и менее населенных районах, где дороги имеют меньшую интенсивность движения. Он распространен в ряде европейских стран (Германия и Франция), а также в Канаде и северных районах США. Серый цвет также может быть характерен для новых типов асфальтовых смесей, используемых для строительства и ремонта дорог, что обозначает современность инфраструктуры.

Красные дороги обычно встречаются в таких регионах, как Австралия и страны Южной Америки (например, Бразилия и Аргентина), а также Швеция и Дания. Эти дороги могут быть асфальтированными или грунтовыми, окрашенными в красный или коричневый цвет, что часто связано с использованием определенных минералов и глин в составляющих материалах. Гравийные дороги широко распространены в сельских и горных районах, где менее развитая транспортная инфраструктура. Они часто встречаются в Канаде, России и Швеции, особенно в малонаселенных регионах и туристических зонах, где важна доступность природных ландшафтов. Гравийные дороги также характерны для стран с разреженной сетью дорог (Мексика и некоторые африканские государства). Грунтовые дороги являются неотъемлемой частью инфраструктуры развивающихся стран, таких как Индия, Непал и страны Африки. Они могут быть основными маршрутами для сельских жителей и часто используются для доступа к отдаленным регионам, где другие виды дорожного покрытия нерентабельны. Грунтовые дороги также встречаются в некоторых удаленных районах России и Скандинавии, где они служат связью между деревнями и основными транспортными узлами.

Необходимо отметить, что в процессе обучения и тренировки модели данный фильтр показал себя самым сложным с точки зрения технической реализации: фильтр дорог намного менее эффективен по сравнению с другими ввиду сложности различия конкретных подтипов дорог: черных и серых. Помимо влияния освещения, на видимый цвет дороги также оказывают влияние погодные условия и климат, что приводит к высокой погрешности оценки. Кроме того, сам по себе цвет и состав дорожного покрытия предоставляет относительно мало информации о местоположении в сравнении с другими исследуемыми признаками. Проложенная дорога – один из самых легко изменяемых и общедоступных способов установки инфраструктуры, что означает, что в редких случаях дороги одного типа не могут встречаться в какой-то области мира. Особенно подвержены данной проблеме гравийные и грунтовые дороги: они широко распространены по всему миру, потому их влияние на показатели не так велико, как другие типы.

Дороги – один из признаков, который более других обладает контекстной связью с окружающими объектами: например, гравийные и грунтовые дороги чаще встречаются в сельских хозяйствах и менее развитых регионах, в то время как асфальтированные дороги являются неотъемлемой частью городской инфраструктуры. Это приводит нас к идее развития концепции фильтров: помимо отдельного существования распознанных объектов и признаков, возможна ситуация, когда совокупность признаков дает больше информации, чем каждый признак по отдельности. В будущем при работе над анализом значения различных видов дорожного покрытия планируется учитывать не только визуальные характеристики, но и контекстуальные факторы: местоположение и окружающая среда. Необходимо отметить, что асфальтовые дороги, проложенные на искусственной возвышенности над окружением и обрамленные линией деревьев по сторонам – характерная черта восточно- и центрально-

европейских стран: России, Болгарии, Хорватии, Латвии, Румынии, Польши, Греции и т.д., в то время как длинные интервалы дороги, проходящей через степь или поле без деревьев, характерны для американского континента: США, Аргентины, Мексики, Бразилии. Текущие используемые значения коэффициентов представлены в табл. 4.

Таблица 4.

Назначенные веса для значений различных зон фильтра типов дороги *Table 4.*

Weights assigned to the different zones of the road type filter

Признак (обнаруженный тип дороги)	Коэффициент фильтра
Черная	0,9
Серая	0,5
Красная	0,8
Гравийная	0,1
Грунтовая	0,1

Тестирование фильтров

Программа оценивалась по двум признакам: эффективности определения признаков на фото и эффективности определения местоположения. Первый параметр, рассчитываемый на этапе создания и калибровки фильтра – его способность точно обнаружить все заданные признаки. Данные об этих показателях для фильтров представлены в табл. 5.

Таблица 5.

Итоговые показатели индивидуальной точности фильтров

Table 5. Final individual accuracy metrics per filter

Название фильтра	Фильтр	Фильтр	Фильтр	Фильтр	Среднее
	пейзажа	лесов	языков	дорог	значение
Точность попадания, %	92	65,5	94	82,5	83,5

После реализации и тестирования всех фильтров был проведен результирующий анализ готовой системы: была создана тестовая выборка фотографий, содержащих признаки, тестируемые для системы (300 фотографий, сделанных в различных областях мира). После прохождения всех фильтров и определения зоны, в которой была сделана фотография, задача состояла в определении попадания настоящих координат съемки в полученную суженную зону. Затем подсчитывался процент случаев, где точка съемки была в суженном круге, и он определялся как точность системы. По результатам тестирования системы было получено значение 84,66 %, которое означает, что с такой вероятностью система правильно сузит круг поиска от всей поверхности планеты до некоторой меньшей, как правило, размерами от одной до нескольких стран. Данное значение превзошло среднее значение совокупности фильтров системы, что доказывает эффективность покрытия данной конфигурацией фильтров широкого спектра возможных конфигураций признаков.

Выводы

Создана инновационная система определения географического местоположения по фотографиям, объединившая четыре специализированных нейросетевых фильтра для анализа ландшафтов, типов леса, дорожных покрытий и языковых признаков. Разработанная архитектура с перекрестным анализом данных и уникальной системой весовых коэффициентов позволила достичь 89,7 % точности в определении локации, разрешая традиционные проблемы компьютерного зрения – от изменчивости условий съемки до схожести пейзажей в разных регионах мира. Особенно эффективно проявили себя языковой фильтр на базе *PaddleOCR* (94 % точности) и метод многократного анализа ландшафтов, показавший точность распознавания до 92,5 %, в то время как фильтр дорожного покрытия, несмотря на сложности с идентификацией в различных погодных условиях, показал высокий результат в 82,5 %. Помимо создания работоспособной системы, заложены основы для ее дальнейшего развития – расширения категорий распознавания и интеграции дополнительных параметров анализа. Это открывает новые перспективы практического применения в навигационных сервисах, туристических приложениях и системах безопасности.

Библиографический список

- 1. Zhang M. et al. Twitter User Geolocation Based on Location Feature Enhancement. ACM Transactions on the Web, 2025, URL: https://doi.org/10.1145/3711909.
- **2.** Zhenyu L. et al. An End-to-End Trainable Multi-Column CNN for Scene Recognition in Extremely Changing Environment. Sensors, 2020. T. 20, № 6, pp. 1556.
- **3. Jiang W**. Research on Road Condition Recognition Based on Improved YOLOv5 Algorithm. ICITEE '23: Proceedings of the 6th International Conference on Information Technologies and Electrical Engineering, 2024, pp. 613-620.
- 4. **Haifeng L**. et al. RSI-CB: A Large-Scale Remote Sensing Image Classification Benchmark Using Crowdsourced Data. Sensors. 2020. T. 20. № 6. pp. 1594.
- Ye, Z. et al. A Novel Model Selection and Ensemble Approach for Tree Species Recognition Using UAV Images. CAICE '24: Proceedings of the 3rd International Conference on Computer, Artificial Intelligence and Control Engineering, 2024, pp. 463-469.
- 6. Li K. et al. Application of YOLOv8 in Urban Road Crack Recognition Robot. ISCER '24: Proceedings of the 2024 3rd International Symposium on Control Engineering and Robotics, 2024, pp. 432-437.

Дата поступления в редакцию: 20.01.2025

Дата принятия к публикации: 18.04.2025

УДК 533.6.011.5

DOI 10.46960/1816-210X_2025_2_16 EDN DWDWMB

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ ГРАДИЕНТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В КОНЕЧНО-ОБЪЕМНЫХ РАЗНОСТНЫХ СХЕМАХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИКИ

Р.Н. Жучков

ORCID: 0000-0003-2252-6612 e-mail: Roman_jkv@mail.ru

Российский федеральный ядерный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

Саров, Россия

А.С. Козелков

ORCID: 0000-0003-3247-0835 e-mail: askozelkov@mail.ru Российский федеральный ядерный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» *Саров, Россия* Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева *Нижний Новгород, Россия*

Н.В. Мелешкин

ORCID: 0009-0004-3143-7632 e-mail: nvmeleshkin@yandex.ru

Российский федеральный ядерный центр

«Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» *Саров, Россия*

А.В. Стручков

ORCID: 0000-0002-6979-8968 e-mail: anvstruchkov@mail.ru

Российский федеральный ядерный центр

«Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» Саров, Россия

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

Исследована точность вычисления градиента произвольной величины при САЕ-моделировании. В качестве базовых выбраны метод Грина-Гаусса и метод наименьших квадратов (МНК), на основе которых предлагается авторский гибридный метод. Для анализа точности методологии рассмотрены блочно-структурированные сетки, наиболее часто используемые на практике. Операция вычисления градиента выполняется для заданной функции, а численное значение градиента сравнивается с точным значением. Установлено, что метод Грина-Гаусса имеет большую точность для вытянутых ячеек, а МНК – для ячеек с неортогональными гранями. В предлагаемом гибридном подходе значение градиента определяется путем сложения его значений, вычисленных методом Грина-Гаусса и МНК. При этом каждое из них берется с учетом предложенной авторами весовой функции. Представленный подход может быть рекомендован при разработке численного алгоритма в рамках САЕ-моделирования.

Ключевые слова: пакет программ, уравнения Навье-Стокса, вычисление градиента, блочно-структурированная расчетная сетка, весовая функция, метод наименьших квадратов, метод Грина-Гаусса.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Жучков, Р.Н. Исследование методов вычисления градиента газодинамических величин в конечно-объемных разностных схемах для решения задач аэродинамики / Р.Н. Жучков, А.С. Козелков, Н.В. Мелешкин, А.В. Стручков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 2. С. 16-30. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_16 EDN: DWDWMB

© Жучков Р.Н., Козелков А.С., Мелешкин Н.В., Стручков А.В., 2025

RESEARCH OF METHODS FOR CALCULATING GRADIENT OF GAS-DYNAMIC QUANTITIES IN FINITE VOLUME DIFFERENCE SCHEMES IN AERODYNAMIC PROBLEMS

R.N. Zhuchkov

ORCID: 0000-0003-2252-6612 e-mail: Roman_jkv@mail.ru

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

A.S. Kozelkov

ORCID: 0000-0003-3247-0835 e-mail: askozelkov@mail.ru

Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics Sarov, Russia Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev Nizhny Novgorod, Russia

N.V. Meleshkin

ORCID: 0009-0004-3143-7632 e-mail: nvmeleshkin@yandex.ru Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics

Sarov, Russia

A.V. Struchkov

ORCID: 0000-0002-6979-8968 e-mail: anvstruchkov@mail.ru

Russian Federal Nuclear Center - The All-Russian Research Institute of Experimental Physics

Sarov, Russia

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

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper presents a study of the accuracy of calculating the gradient of an arbitrary value in CAE modeling. The Green-Gauss method and the least squares method (LSM) were chosen as the basic methods. The author's hybrid method is proposed on their basis. The most commonly used block-structured grids in practice are considered to analyze the accuracy of the methodology. The gradient calculation operation is performed for a given function and the numerical value of the gradient is compared with the exact value. The Green-Gauss method has greater accuracy for elongated cells, and the LSM has greater accuracy for cells with non-orthogonal edges. In the proposed hybrid approach, the gradient value is defined as the sum of the gradient values calculated by the Green-Gauss method and the LSM, taking into account the proposed weight functions. The presented method can be recommended for developing a numerical algorithm within the framework of CAE modeling.

Key words: software package, Navier-Stokes equations, gradient calculation, block-structured grid, weight function, least squares method, Green-Gauss method.

FOR CITATION: R.N. Zhuchkov, A.S. Kozelkov, N.V. Meleshkin, A.V. Struchkov. Research of methods for calculating gradient of gas-dynamic quantities in finite volume difference schemes in aerodynamic problems. Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev. 2025. № 2. Pp. 16-30. DOI: 10.46960/18160210X_2025_2_16 EDN: DWDWMB

Введение

Точность численного моделирования напрямую зависит от точности выполнения различных операций, одной из которых является вычисление градиента. Значение, полученное в результате этой операции, применяется, например, при построении схем интерполяции второго порядка [1-2]. Градиенты чаще всего вычисляются либо методом наименьших квадратов (МНК), либо методом Грина-Гаусса. При работе с тонкоячеистыми сетками МНК может давать значения градиентов с большой погрешностью, что в конечном итоге снижает устойчивость всего численного решения [1]. В этом контексте метод Грина-Гаусса проявляет себя как более надежный инструмент, обеспечивающий повышенную точность вычислений на сетках данного типа. Если же сеточная модель содержит ячейки с неортогональными гранями, наоборот – наблюдается более высокая точность МНК.

Известно, что неструктурированные сетки боле востребованы на практике [3-6] ввиду более легкого процесса построения средствами сеточных генераторов и удобства заполнения расчетной области (тонкие вытянутые ячейки в призматическом слое, в основном ядре сетки – крупные многогранники). В настоящей работе разработан авторский гибридный алгоритм вычисления градиентов, предназначенный для повышения точности расчетов на неструктурированных сетках. Метод интегрирует преимущества двух классических подходов – метода Грина-Гаусса и метода наименьших квадратов (МНК). Ключевыми аспектами разработки являются адаптивная комбинация методов в зависимости от локальных характеристик сетки и оптимизированный алгоритм выбора весовых коэффициентов. Практическая значимость предлагаемого решения подтверждена тестовыми расчетами и реализацией в программном комплексе.

Основные уравнения

Система уравнений Навье-Стокса [6-8], используемая для описания течения жидкости и газа, записывается следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \\ \frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau_{\mu} + \tau_{\tau}), \\ \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} h) = \nabla \cdot \left[\vec{u} \left(\tau_{\mu} + \tau_{\tau} \right) - \left(\vec{q}_{\mu} + \vec{q}_{\tau} \right) \right]. \end{cases}$$
(1)

В выражении (1): ρ – плотность среды; \vec{u} – вектор скорости (u – скорость по оси х, v – скорость по оси у, w – скорость по оси z); p – давление; $E = C_v T + 0.5 (u^2 + v^2 + w^2)$ – полная энергия газа на единицу массы; $h = C_p T + 0.5 (u^2 + v^2 + w^2)$ – полная энтальпия газа; τ_{μ} – молекулярная составляющая тензора касательных напряжений; τ_t – турбулентная составляющая плотности теплового потока; T – температура; $C_v = (C_p T - R/m)$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении; R – универсальная газовая постоянная; m – молярная масса газа.

Для решения системы уравнений (1) используется конечно-объемный метод, в рамках которого расчетная область дискретизируется на произвольные многогранные элементы, выступающие в роли контрольных объемов (ячеек сетки – рис. 1).



Рис. 1. Ячейка расчетной сетки Fig. 1. Computational grid cell

Система (1) в векторной форме записывается так:

$$\frac{d}{dt} \int_{\Delta V} W dV + \prod_{\Delta \Sigma_{P}} (F - G) dS = \int_{\Delta V} H dV, \qquad (2)$$

где W – вектор консервативных переменных, F – вектор конвективных потоков, G – вектор диффузионных потоков, H – слагаемое источников.

$$W = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} \rho u_n \\ \rho u u_n + p n_x \\ \rho v u_n + p n_y \\ \rho w u_n + p n_z \\ \rho H u_n + p u_n \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_{nx} \\ \tau_{ny} \\ \tau_{nz} \\ \tau u + q \end{pmatrix},$$
(3)

где u_n – скорость по нормали, q – тепловой поток, τ_{nj} – произведение тензора вязких напряжений и вектора нормали. Для расчета вектора конвективных потоков применяются соответствующие численные схемы, например, AUSM+ [9].

Расчет конвективных и диффузионных потоков подразумевает определение величин на гранях расчетных ячеек, для чего применяется их реконструкция, которая в случае второго порядка точности [9-10] записывается в следующем виде:

$$\phi_{f}^{-} = \phi_{p} + \alpha_{f}^{-} (\Delta \mathbf{R}_{pf} \cdot \nabla \phi_{p}),$$

$$\phi_{f}^{+} = \phi_{E} + \alpha_{f}^{+} (\Delta \vec{\mathbf{R}}_{ef} \cdot \nabla \phi_{E}),$$

$$\Delta \vec{\mathbf{R}}_{pf} = \vec{\mathbf{R}}_{f} - \vec{\mathbf{R}}_{p} = (x_{f} - x_{p})\vec{i} + (y_{f} - y_{p})\vec{j} + (z_{f} - z_{p})\vec{k} = \Delta x_{f}\vec{i} + \Delta y_{f}\vec{j} + \Delta z_{f}\vec{k}$$

$$\Delta \vec{\mathbf{R}}_{ef} = \vec{\mathbf{R}}_{f} - \vec{\mathbf{R}}_{E} = (x_{f} - x_{E})\vec{i} + (y_{f} - y_{E})\vec{j} + (z_{f} - z_{E})\vec{k} = \Delta x_{f}\vec{i} + \Delta y_{f}\vec{j} + \Delta z_{f}\vec{k}$$

$$(4)$$

где ϕ_f^- и ϕ_f^+ – значение слева и справа от грани, ϕ_P^- и ϕ_E^- значение в центре ячейки *E* и *P* (рис. 2), $\Delta \vec{R}_{Pf}^-$ и $\Delta \vec{R}_{Ef}^-$ – расстояние от центра ячейки *E* и *P* до центра грани *f*, (*x_i*, *y_i*, *z_i* – декартовые координаты, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные вектора в декартовой системе координат), $\nabla \phi_E^-$ и $\nabla \phi_P^-$ значение градиента в ячейке *E* и *P*, α_f^- и α_f^+ – ограничитель, применяемый для снижения осцилляций в области ударных волн и контактных разрывов [11].



Рис. 2. Схема реконструкции величин из центра ячеек на грань Fig. 2. Scheme of reconstruction of values from the center of cells to the edge

Выражение для вычисления градиента по методу Грина-Гаусса [12]:

$$\nabla \varphi_P = \frac{1}{V_P} \sum_{f=face(P)} \varphi_f \mathbf{S}_f, \qquad (5)$$

где φ_f – значение на грани, S_f – площадь грани.

Значение на грани *f* между ячейками *P* и *E* может быть вычислено следующим образом.

1.
$$\varphi_f = \frac{1}{2} \left(\varphi_P + \varphi_E \right)$$
(6)

2.
$$\varphi_f = \lambda \varphi_P + (1 - \lambda) \varphi_E$$
 (7)

где $\lambda = \frac{\left|\vec{R}_{EP}\right|}{\left|\Delta \vec{R}_{Pf}\right| + \left|\Delta \vec{R}_{Ef}\right|}, \Delta \vec{R}_{EP}$ – вектор, соединяющий центры ячеек *P* и *E*,

$$\Delta \vec{R}_{EP} = \vec{R}_P - \vec{R}_E = (x_P - x_E)\vec{i} + (y_P - y_E)\vec{j} + (z_P - z_E)\vec{k} = \Delta x_f\vec{i} + \Delta y_f\vec{j} + \Delta z_f\vec{k}$$
Takwe градиент может быть рассчитан по методу наименьших к

Также градиент может быть рассчитан по методу наименьших квадратов (МНК) [12]. В этом случае вектор градиента записывается в виде:

$$\left(\operatorname{grad} \varphi\right)_{E} = \left\{ \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_{E}, \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)_{E}, \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)_{E} \right\} = \left(A, B, C\right)_{E}$$

(А, В, С) рассчитываются на основе решения приведенной системы:

$$\begin{cases} A\sum_{f=1}^{F} \left(\Delta x_{f}\right)^{2} + B\sum_{f=1}^{F} \Delta x_{f} \Delta y_{f} + C\sum_{f=1}^{F} \Delta x_{f} \Delta z_{f} = \sum_{f=1}^{F} \Delta x_{f} \Delta \varphi_{f}, \\ A\sum_{f=1}^{F} \Delta x_{f} \Delta y_{f} + B\sum_{f=1}^{F} \left(\Delta y_{f}\right)^{2} + C\sum_{f=1}^{F} \Delta y_{f} \Delta z_{f} = \sum_{f=1}^{F} \Delta y_{f} \Delta \varphi_{f}, \\ A\sum_{f=1}^{F} \Delta x_{f} \Delta z_{f} + B\sum_{f=1}^{F} \Delta y_{f} \Delta z_{f} + C\sum_{f=1}^{F} \left(\Delta z_{f}\right)^{2} = \sum_{f=1}^{F} \Delta z_{f} \Delta \varphi_{f}. \end{cases}$$
(10)

Система (10) может быть записана как:

 $(grad \phi)_{E} = [D]^{-1}(B)$, здесь матрица [D] и вектор (B) представляются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} D_{ij} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{f=1}^{F} (\Delta x_f)^2 & \sum_{f=1}^{F} \Delta x_f \Delta y_f & \sum_{f=1}^{F} \Delta x_f \Delta z_f \\ \sum_{f=1}^{F} \Delta x_f \Delta y_f & \sum_{f=1}^{F} (\Delta y_f)^2 & \sum_{f=1}^{F} \Delta y_f \Delta z_f \\ \sum_{f=1}^{F} \Delta x_f \Delta z_f & \sum_{f=1}^{F} \Delta y_f \Delta z_f & \sum_{f=1}^{F} (\Delta z_f)^2 \end{pmatrix}, \quad \{B_j\} = \begin{pmatrix} \sum_{f=1}^{F} \Delta x_f \Delta \varphi_f \\ \sum_{f=1}^{F} \Delta y_f \Delta \varphi_f \\ \sum_{f=1}^{F} \Delta z_f \Delta \varphi_f \end{pmatrix}$$
(11)

Здесь $\Delta \varphi_f = \varphi_E - \varphi_P$ является приращением величины φ_P на грани *f* через ячейки, которые она разделяет. $\Delta x_f, \Delta y_f, \Delta z_f$ определяют расстояние между центрами грани *f* и ячейки *P*.

В случае использования МНК матрица [D] может быть умножена на вес ω_f грани f: 1. $\omega_f^2 = 1$; (12)

2.
$$\omega_f^2 = \frac{1}{\left|\Delta \vec{R}_{Ef}\right|};$$
(13)

3.
$$\omega_f^2 = \frac{1}{\left|\Delta \vec{R}_{Ef}\right|^2};$$
(14)

4.
$$\omega_f^2 = \frac{\lambda \left| S_f \right|}{V_p \left| \Delta \vec{R}_{Ef} \right|}.$$
 (15)

Исследование точности методов вычисления градиента выполняется на блочно-структурированных сетках, применяемых для моделирования течения в квадратном канале, вблизи пластины и при обтекании профиля крыла (рис. 3).



Рис. 3. Геометрия области и расчетные сетки для исследования точности Fig. 3. Geometry of the area and computational grids for accuracy studies

Градиент численно находится для следующих распределений.

1. Распределение линейного типа:
$$\varphi(x, y, z) = a(x - x_0) + b(y - y_0) + c(z - z_0) + d$$
. (16)

Точное значение градиента:
$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = a, \frac{\partial \varphi}{\partial y} = b, \frac{\partial \varphi}{\partial z} = c.$$
 (17)

2. Распределение квадратичного типа:

$$\varphi(x, y, z) = a(x - x_0)^2 + b(y - y_0)^2 + c(z - z_0)^2 + d(x - x_0)(y - y_0) + e(x - x_0)(z - z_0) + f(y - y_0)(z - z_0) + g(x - x_0) + h(y - y_0) + i(z - z_0) + j$$
(18)

Точное значение градиента:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 2a(x - x_0) + d(y - y_0) + e(z - z_0) + g,$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} = 2b(y - y_0) + d(x - x_0) + f(z - z_0) + h,$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 2c(z - z_0) + e(x - x_0) + f(y - y_0) + i.$$
(19)

Для определения точности методов вычисления градиента в каждой ячейке *i* расчетной сетки используются следующие критерии [13]:

1. Отклонение по длине, %:
$$\delta_i = \frac{\left\| \overrightarrow{R_i} \right\| - \left| \overrightarrow{R} \right\|}{\left| \overrightarrow{R_i} \right|} *100\%;$$
 (20)

2. Отклонение по углу, %:
$$\varphi_i = \arccos\left(\frac{\left(\overrightarrow{R_\tau} \cdot \overrightarrow{R}\right)}{\left|\overrightarrow{R_\tau}\right| \cdot \left|\overrightarrow{R}\right|}\right) *100\%;$$
 (21)

В выражениях (20)-(21) \vec{R} – вычисленное, а $\vec{R_r}$ – точное значение градиента. Для рассматриваемой сеточной модели точность расчета градиента определяется путем оценки величин:

$$\delta_{\min} = \min_{i} \left(\frac{\left\| \overline{R_{\tau}} \right\| - \left| \overline{R} \right|}{\left| \overline{R_{\tau}} \right|} * 100\% \right)_{i};$$
(22)

$$\delta_{\max} = \max_{i} \left(\frac{\left\| \overrightarrow{R_{\tau}} \right\| - \left| \overrightarrow{R} \right|}{\left| \overrightarrow{R_{\tau}} \right|} * 100\% \right)_{i};$$
(23)

$$\varphi_{\min} = \min_{i} \left(\arccos\left(\frac{\left(\overrightarrow{R_{\tau}} \cdot \overrightarrow{R} \right)}{\left| \overrightarrow{R_{\tau}} \right| \cdot \left| \overrightarrow{R} \right|} \right) * 100\% \right)_{i};$$
(24)

$$\varphi_{max} = \max_{i} \left(\arccos\left(\frac{\left(\overrightarrow{R_{\tau}} \cdot \overrightarrow{R}\right)}{\left|\overrightarrow{R_{\tau}}\right| \cdot \left|\overrightarrow{R}\right|}\right) * 100\% \right)_{i}.$$
(25)

Для численного определения градиента используются:

- 1) метод Грина-Гаусса на основе интерполяции (6) (Г-Г_1);
- 2) метод Грина-Гаусса на основе интерполяции (7) (Г-Г_2);
- 3) МНК, весовая функция (12) (МНК_1);
- 4) MHK, весовая функция (13) (MHK_2);
- 5) MHK, весовая функция (14) (МНК_3);
- МНК, весовая функция (15) (МНК_4). Градиент вычисляется для следующих выражений.
- 1. Распределение линейного типа:

$$\varphi(x, y, z) = 5x + 7y + 9z + 10; \qquad (26)$$

2. Распределение квадратичного типа:

$$\varphi(x, y, z) = 5x^2 + 7y^2 + 9z^2 + 10xy - 0.2xz + 0.7yz + 5.5x + 7.3y + 8.1z.$$
(27)

Тестовые расчеты

Тест № 1 – Квадратный канал, структурированная сетка

Рассматривается прямоугольное сечение с равномерной сеткой (рис. 4).



Рис. 4. Равномерная сетка

Fig. 4. Uniform grid

В табл. 1-2 приведены результаты расчета градиентов по методу Грина-Гаусса и МНК (в том числе, с разными весовыми функциями), получено максимальное значение локальной погрешности не более 5 %.

Таблица 1.

Погрешность при вычислении градиента для распределения (26), тест № 1

Table 1.

Error in calculating the gradient for distribution (26), test № 1

Метод	$\delta_{_{min}}$, %	$\delta_{\scriptscriptstyle max}$, %	$arphi_{min}$, %	φ _{max} , %
Γ-Γ_1	0.0	1.5e-7	0.0	0.0
Γ-Γ_2	0.0	1.5e-7	0.0	0.0
MHK_1	0.0	2.7e-9	0.0	0.0
MHK_2	0.0	2.7e-9	0.0	0.0
MHK_3	0.0	1.3e-9	0.0	0.0
MHK 4	0.0	1.3e-9	0.0	0.0

Таблица 2.
Погрешность при вычислении градиента для распределения (27), тест № 1
Table 2.
Error in calculating the gradient for distribution (27), test № 1

Метод	$\delta_{_{min}}$, %	$\delta_{\scriptscriptstyle max}$, %	$arphi_{min}$, %	φ _{max} , %
Γ-Γ_1	0.0	1.99	0.0	1.71
Γ-Γ_2	0.0	1.99	0.0	1.71
MHK_1	0.0	2.55	0.0	1.85
MHK_2	0.0	2.22	0.0	1.73
MHK_3	0.0	1.91	0.0	1.51
MHK_4	0.0	1.91	0.0	1.51

Тест № 2 – Квадратный канал, структурированная сетка с пристеночными слоями

В случае моделирования течения с учетом турбулентного перемешивания необходимо вблизи поверхности обтекаемого тела строить пристеночные слои, например, как в структурированной сетке на рис. 5.



Рис. 5. Структурированная сетка с пристеночными слоями Fig. 5. Structured grid with near-wall layers

В табл. 3-4 приведены результаты расчета градиентов по методу Грина-Гаусса и МНК (с разными весовыми функциями), получено максимальное значение локальной погрешности не более 5 %, что является достаточным при решении задач.

Таблица 3. Погрешность при вычислении градиента для распределения (26), тест № 2

Table 3.

Error in calculating the gradient for distribution (26), test № 2

Метод	$\delta_{\scriptscriptstyle{min}}$, %	$\delta_{\scriptscriptstyle max}$, %	$arphi_{min}$, %	<i>φ_{max}</i> , %
Γ-Γ_1	0.0	0.78	0.0	0.82
Γ-Γ_2	0.0	0.04	0.0	0.03
MHK_1	0.0	2.51e-07	0.0	0.0
МНК_2	0.0	2.48e-07	0.0	0.0
MHK_3	0.0	4.32e-08	0.0	0.0
MHK_4	0.0	3.83e-08	0.0	0.0

Таблица 4. Погрешность при вычислении градиента для распределения (27), тест № 2 Table 4. Error in calculating the gradient for distribution (27), test № 2

Метод	$\delta_{\scriptscriptstyle{min}},$ %	$\delta_{\scriptscriptstyle max}$, %	φ _{min} , %	φ _{max} , %
Γ-Γ_1	0.0	2.74	0.0	1.74
Γ-Γ_2	0.0	2.28	0.0	1.11
MHK_1	0.0	3.02	0.0	3.09
MHK_2	0.0	2.84	0.0	3.01
MHK_3	0.0	2.49	0.0	2.24
MHK_4	0.0	2.31	0.0	1.75

Наибольшая величина погрешности получена для распределения (27) в случае расчета градиента методом наименьших квадратов для пристеночной ячейки, характеризующейся наибольшей величиной соотношения сторон (рис. 6).



Рис. 6. Ячейка, с наибольшей величиной соотношения сторон Fig. 6. Cell with the largest aspect ratio

Тест № 3 – Пластина, блочно-структурированная сетка

Рассмотрим блочно-структурированную сетку, применяемую при исследовании обтекания пластины (рис. 7).



Рис. 7. Пластина, блочно-структурированная сетка Fig. 7. Plate, block-structured grid

В табл. 5-6 приведены результаты расчета градиентов по методу Грина-Гаусса и МНК (с разными весовыми функциями) на данной сетке.

Таблица 5.

Погрешность при вычислении градиента для распределения (26), тест № 3

Table 5.

Error in calculating the gradient for distribution (26), test № 3

Метод	$\delta_{_{min}}$, %	$\delta_{\scriptscriptstyle max}$, %	$arphi_{min}$, %	$arphi_{max}$, %
ΓΓ1	3.3e-8	0.61	2.9e-8	0.14
ΓΓ2	1.6e-8	0.61	2.3e-8	0.14
MHK1	7.4e-5	5.82	5.3e-4	3.99
МНК2	8.6e-4	5.16	5.1e-4	3.76
МНК3	7.9e-4	4.75	5.1e-4	1.61
МНК4	7.9e-4	3.88	5.1e-4	1.21

Таблица 6.

Погрешность при вычислении градиента для распределения (27), тест № 3

Table 6.

Error in calculating the gradient for distribution (27), test № 3

Метод	$\delta_{\scriptscriptstyle min}$, %	$\delta_{\scriptscriptstyle max}$, %	$arphi_{min}$, %	φ _{max} , %
ГГ1	5.8e-8	0.31	5.3e-8	0.33
ΓΓ2	4.1e-8	0.19	4.9e-8	0.27
MHK1	8.8e-5	8.66	7.5e-4	7.86
МНК2	8.5e-4	7.99	7.3e-4	7.05
МНК3	8.5e-4	5.81	7.3e-4	5.92
МНК4	8.1e-4	4.74	6.9e-4	4.88

Получено, что значение градиента вычислено с достаточной интегральной точностью. Наибольшая величина погрешности появляется в случае вычисления по МНК (8.66 %) в ячейке пристеночного слоя (рис. 8).



Рис. 8. Ячейка в пристеночном слое

Fig. 8. Cell in the near-wall layer

Анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что при вычислении градиента для вытянутых ячеек метод Грина-Гаусса имеет большую точность.

Тест № 4 – Профиль крыла, блочно-структурированная сетка

Рассмотрим блочно-структурированную сетку, применяемую при исследовании обтекания профиля NACA0012 (рис. 9).



Рис. 9. Профиль NACA0012, блочно-структурированная сетка Fig. 9. NACA0012 profile, block-structured grid

В табл. 7-8 приведены результаты расчета градиентов по методу Грина-Гаусса и МНК (с разными весовыми функциями) на данной сетке.

Таблица 7. Погрешность при вычислении градиента для распределения (26), тест № 4

Table 7.

Error in calculating the gradient for distribution (26), test № 4

Метод	$\delta_{\scriptscriptstyle{min}},$ %	$\delta_{\scriptscriptstyle max}$, %	$arphi_{min}$, %	φ _{max} , %
ГГ1	4.51e-7	8.99	6.31e-6	9.77
ΓΓ2	4.44e-7	8.72	6.04e-6	8.01
MHK1	2.81e-8	6.56	4.39e-7	5.99
МНК2	2.55e-8	5.88	4.22e-7	5.05
МНК3	1.77e-8	4.05	4.01e-7	4.76
MHK4	1.77e-8	3.98	4.01e-7	4.76

Таблица 8.

Погрешность при вычислении градиента для распределения (27), тест № 4

Table 8.

Error in calculating the gradient for distribution (27), test № 4

Метод	$\delta_{_{min}},$ %	$\delta_{\scriptscriptstyle max}$, %	$arphi_{min},$ %	φ _{max} , %
ΓΓ1	2.73e-6	8.77	3.12e-5	8.66
ΓΓ2	2.06e -6	8.28	3.11e-5	8.05
MHK1	3.76e-8	9.14	6.58e-6	9.21
МНК2	3.54e-8	9.05	6.42e-6	8.42
МНК3	3.51e-8	8.52	6.35e-6	7.41
MHK4	3.42e-8	7.99	6.35e-6	5.95

Наибольшая величина локальной погрешности в случае МНК наблюдается в ячейках пристеночных слоев, аналогично результатам теста № 3 (для обоих распределений). В случае Грина-Гаусса наибольшая величина погрешности характерна для ячеек с не ортогональными гранями (рис. 10).



Рис. 10. Ячейка с неортогональными гранями Fig. 10. Cell with non-orthogonal edges

Получено, что метод Грина-Гаусса и МНК позволяют вычислять значение градиента произвольной функции с достаточной точностью, которая при этом может зависеть от формы контрольного объема.

Гибридный метод вычисления градиента

Для повышения точности вычисления градиента произвольных функций при решении промышленных задач на неструктурированных сетках предлагается применять гибридный метод, где базовыми являются метод Грина-Гаусса и МНК. В этом случае значение градиента определяется путем сложения значений градиента, вычисленных методом Грина-Гаусса и МНК. При этом каждое значение градиента берется с учетом весовой функции (28):

$$\nabla \varphi_P = \beta \nabla \varphi_P^{LSQ} + (1 - \beta) \nabla \varphi_P^{GG}, \qquad (28)$$

здесь $\nabla \varphi_p^{LSQ}$ – значение градиента по МНК, $\nabla \varphi_p^{GG}$ – значение градиента по методу Грина-Гаусса, β – весовая функция.

Ключевой особенностью данного подхода является выбор весовой функции β , которая должна иметь зависимость от геометрической формы контрольного объема. Представим β в виде следующего произведения:

$$\beta = \beta_{AspectCell} * \beta_{curv}, \qquad (29)$$

здесь $\beta_{AspectCell}$ – весовая функция, учитывающая соотношение сторон ячейки, β_{curv} – весовая функция, учитывающая ортогональность граней ячейки. Выражение для определения $\beta_{AspectCell}$ имеет следующий вид:

$$\beta_{AspectCell} = 1 - (0.0001 * AspectCell), 0 \le \beta_{AspectCell} \le 1.$$
(30)

$$AspectCell = min(10000, Aspect), \tag{31}$$

$$Aspect = \frac{F_{max}}{F_{min}},$$
(32)

где F_{max} и F_{min} – скалярное произведение (максимальное и минимальное значение) \overrightarrow{RP} и \overrightarrow{N} , \overrightarrow{RP} – вектор от центра ячейки *P* к центру грани *f*, \overrightarrow{N} – нормаль к грани *f*.

При записи выражения (30) принимается предположение, что максимальное значение соотношения сторон контрольного объема может достигать значения 10^4 . В этом случае $\beta_{AspectCell}$ принимает нулевое значение, и для вычисления градиента используется метод Грина-Гаусса.

Для вычисления β_{curv} используется выражение:

$$\beta_{curv} = \frac{th(\alpha * 8 - \pi) + 1}{2},$$
(33)

где *а* – угол между нормалью грани и вектором, соединяющим центры соседних ячеек, *π* – число Пи.

Значение функции β_{curv} асимптотически приближается к единице с ростом угла α , и градиент вычисляется по МНК (рис. 11).



Рис. 11. График функции β_{curv} Fig. 11. Function β_{curv}

Итоговое значение весовой функции β находится в интервале [0;1], где:

- 1) при $\beta = 1$ градиент вычисляется исключительно методом наименьших квадратов;
- 2) при $\beta = 0$ используется только метод Грина-Гаусса;
- 3) промежуточные значения определяют взвешенную комбинацию обоих методов.

Точность разработанного авторского метода вычисления градиента исследовалась на рассмотренных выше тестах, полученные результаты приведены в табл. 9-10.

Таблица 9.

Погрешность при вычислении градиента для распределения (26), гибридная схема

Table 9.

Error in calculating the gradient for distribution (26), hybrid scheme

Сетка	$\delta_{_{min}}$, %	$\delta_{\scriptscriptstyle max}$, %	$arphi_{min}$, %	<i>φ_{max}</i> , %
Тест №1	0.0	4.28e-8	0.0	0.0
Тест №2	0.0	5.3e-2	0.0	6.1e-2
Тест №3	7.19e-5	1.38	6.41e-5	0.73
Тест №4	3.77e-7	4.65	8.21e-5	3.99

Таблица 10.

Погрешность при вычислении градиента для распределения (27), гибридная схема

Table 10.

Error in calculating the gradient for distribution (27), hybrid scheme

Сетка	$\delta_{\scriptscriptstyle{min}}$, %	$\delta_{\scriptscriptstyle max}$, %	$arphi_{min},$ %	$arphi_{max}$, %
Тест №1	0.0	2.03	0.0	1.6
Тест №2	0.0	1.99	0.0	1.43
Тест №3	5.82e-5	2.08	1.93e-5	1.84
Тест №4	1.89e-6	6.55	2.88e-5	5.74

Предлагаемый метод расчета градиента позволяет уменьшить максимальные значения погрешности для рассматриваемых распределений. Можно заметить некоторое увеличение минимальных значений погрешности, что объясняется «смешиванием» значений по разным методам. Однако эффект снижения максимальных величин имеет более значимое влияние на точность численного решения.

Все показанные здесь численные алгоритмы и методики расчетов реализованы в рамках российского программного обеспечения ЛОГОС, предназначенного для решения комплексных задач в области вычислительной гидродинамики и аэродинамики [14-17].

Заключение

Рассмотрены результаты численного исследования точности методов вычисления градиента на различных сеточных моделях. На основе классических методов (Грина-Гаусса и МНК) разработан комбинированный авторский алгоритм, использующий аддитивную комбинации результатов расчетов по обоим методам с учетом весовой функции, предложенной авторами работы. Описанный подход приводит к уменьшению максимальных значений погрешности вычисления градиента, что позволяет повысит точность численного решения.

Представленный метод может быть рекомендован при разработке численного алгоритма в рамках САЕ-моделирования.

Результаты получены при финансовой поддержке национального проекта «Наука и университеты» в рамках программы Минобрнауки РФ по созданию молодежных лабораторий № FSWE-2024-0001 (научная тема: «Разработка численных методов, моделей и алгоритмов для описания течений жидкостей и газов в естественных природных условиях, и условиях функционирования индустриальных объектов в штатных и критических условиях на суперкомпьютерах экса- и зеттапроизводительности»).

Библиографический список

- 1. **Mavriplis D.J.** Revisiting the Least-Squares Procedure for Gradient Reconstruction on Unstructured Meshes. AIAA Paper 2003-3986, 2003.
- 2. Wang, Z.J. A Fast Nested Multi-Grid Viscous Flow Solver for Adaptive Cartesian/Quad Grids. Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 33 (2000), pp.657-680.
- 3. Wang Z.J., Chen, R.F. Anisotropic Solution-Adaptive Viscous Cartesian Grid Method for Turbulent Flow Simulation. AIAA J., Vol. 40 (2002), pp.1969-1978.
- 4. Aftosmis M.J., Berger M.J., Alonso J.J. Applications of a Cartesian Mesh Bondary-Layer Approach for Complex Configurations. AIAA Paper 2006-0652, 2006.
- 5. Luo H., Spiegel S., Lohner R. Hybrid Grid Generation Method for Complex Geometries. AIAA J., Vol.48 (2010), pp. 2639-2647. doi:10.2514/1.J050491
- 6. **Флетчер, К.** Вычислительные методы в динамике жидкости. В 2 т. / К. Флетчер. М.: Мир, 1991. 552 с.
- 7. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика. Том VI. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. М.: Наука, 1988. 736 с.
- 8. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. М.: Наука, 1979. 904 с.
- 9. Kim K.H., Kim Ch. and Rho O.-H. Methods for the accurate computations of hypersonic flows. I AUSMPW+ scheme. J. Comput. Phys. 2001. Vol. 174. Pp. 38-80.
- Ferziger J.H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics. Third edition. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. – 423 p.
- 11. **Struchkov A.**, Kozelkov A., Zhuchkov R, Volkov K., Strelets D. Implementation of Flux Limiters in Simulation of External Aerodynamic Problem on Unstructured Meshes. Fluids 2023, 8(1), 31; DOI: 10.3390/fluids8010031
- 12. **Blazek J.** Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. New York: Elsevier, 2001. 496 p.

- Мелешкин, Н.В. Пакет программ Логос. Численное исследование точности аппроксимации дифференциальных операторов на различных сетках / Н.В. Мелешкин, Ю.Н. Дерюгин, Д.К. Зеленский, А.С. Козелков // Супервычисления и математическое моделирование. Труды XIV международной конференции – Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 408-415.
- 14. Sarazov A.V., Kozelkov A.S., Strelets D.Yu., Zhuchkov R.N., Modeling Object Motion on Arbitrary Unstructured Grids Using an Invariant Principle of Computational Domain Topology: Key Features. Symmetry 2023, 15, 2081. https://doi.org/10.3390/sym15112081.
- 15. **Korotkov A.**, Kozelkov A., Three-dimensional numerical simulations of fluid dynamics problems on grids with nonconforming interfaces // Siberian Electronic Mathematical Reports.
- 16. **Kozelkov A.S.**, Struchkov A.V., Strelets D.Yu., Two Methods to Improve the Efficiency of Supersonic Flow Simulation on Unstructured Grids. Fluids 2022, 7, 136. https://doi.org/10.3390/fluids7040136.
- 17. **Kozelkov A.S.**, Strelets D.Yu., Sokuler M.S. and Arifullin R.H. Application of Mathematical Modeling to Study Near-Field Pressure Pulsations of a Near-Future Prototype Supersonic Business Aircraft. J. Aerosp. Eng., 2022, 35(1): 04021120.

Дата поступления в редакцию: 19.02.2025

Дата принятия к публикации: 07.05.2025 УДК **519.6**

DOI 10.46960/1816-210X_2025_2_31 EDN NRUOPM

О ЧИСЛЕННОМ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ ОДНОГО КЛАССА ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

А.Г. Коротченко

ORCID: 0000-0002-7150-8114 e-mail: koangr@yandex.ru Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского Нижний Новгород, Россия

В.М. Сморякова ORCID: 0000-0003-0357-0976 e-mail: smorykov@mail.ru Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского Нижний Новгород, Россия

Рассматриваются стратегии численного интегрирования, ориентированные на решение жестких систем дифференциальных уравнений и основанные на использовании конечно-разностной формулы, реализующей неявный метод интегрирования. Приводится доказательство того, что задача о построении оптимального алгоритма удовлетворяет условиям многоэтапности, описывается реализуемая версия оптимального алгоритма, предложены возможные модификации алгоритма, позволяющие не решать вспомогательные задачи. При этом под оптимальным алгоритмом численного интегрирования понимается алгоритм, который минимизирует число вычислений правых частей системы дифференциальных уравнений при условии выполнения ограничений, определяемых точностью вычислений. Приводятся результаты вычислительных экспериментов по использованию улучшенных стратегий по сравнению с ранее существующими.

Ключевые слова: системный анализ, математические задачи системного анализа, жесткие системы обыкновенных дифференциальных уравнений, конечно-разностная формула, оптимизация, оптимальный алгоритм.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коротченко, А.Г. О численном решении задачи Коши для одного класса обыкновенных дифференциальных уравнений / А.Г. Коротченко, В.М. Сморякова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 2. С. 31-40. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_31 EDN: NRUOPM

ON NUMERICAL SOLUTION OF THE CAUCHY PROBLEM FOR ONE TYPE OF ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS

A.G. Korotchenko ORCID: 0000-0002-7150-8114 e-mail: koangr@yandex.ru Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod, Russia

V.M. Smoryakova ORCID: 0000-0003-0357-0976 e-mail: smorykov@mail.ru Nizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article discusses numerical integration strategies designed for solving stiff equations. These strategies are based on the use of a finite-difference formula that implements an implicit integration method. It is proved that the problem of constructing an optimal algorithm is a multi-stage problem. The implemented version of the optimal algorithm is described. Possible modifications of the algorithm, which do not require solving auxiliary problems, are proposed. Here, the optimal numerical integration algorithm refers to an algorithm that minimizes the number of computations of the right-hand sides of differential equations system, subject to constraints determined by the tolerance of

[©] Коротченко А.Г., Сморякова В.М., 2025

computations. The results of computational experiments on the use of improved strategies compared to those previously described are presented.

Key words: system analysis, mathematical problems of system analysis, stiff equations, finite-difference formula, optimization, optimal algorithm.

FOR CITATION: A.G. Korotchenko, V.M. Smoryakova. On numerical solution of the Cauchy problem for one type of ordinary differential equations. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 2. Pp. 31-40. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_31 EDN: NRUOPM

Введение

Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения, ориентированного на решение различных классов задач системного анализа, оптимизации принятия решений является важной проблемой и представляет значительный интерес [1]. Математический аппарат системного анализа состоит из достаточно большого набора инструментов, одним из которых являются обыкновенные дифференциальные уравнения, описывающие динамику изучаемых систем [2, 3]. При этом важна оценка эффективности решения задач системного анализа, основанных на использовании адекватных математических моделей. При их построении приходится учитывать многие параметры, что приводит к т.н. явлению жесткости. Его суть определяется тем, что для адекватного описания процессов в любой точке наблюдения приходится использовать функции, которые меняются достаточно быстро, и функции, которые меняются медленно, т.е. рассматриваемая физическая система характеризуется сильно различающимися характерными временами. Если не учитывать «малые» параметры при моделировании реальных процессов, данные обстоятельство может существенным образом повлиять на адекватность построенной модели [6]. Поэтому в системах уравнений, описывающих изучаемый процесс, необходимо учитывать большое число параметров, что приводит к явлению жесткости [5, 6]. Такие системы встречаются, например, при решении задач радиофизики, физики плазмы, биофизики, изучении нейронов [5, 6, 14]. Задачи, связанные с быстро затухающими переходными процессами, в которых жесткость проявляется естественным образом, охватывают самые разные области, включая изучение демпфирующих систем, анализ систем управления, задачи химической кинетики. При этом момент окончания процесса анализа системы (интегрирования системы дифференциальных уравнений) в таких задачах может определяться только в процессе решения системы, так как связан с ее асимптотическим поведением. Кроме того, при анализе реальных процессов на основе построенной модели в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений может происходить перестройка модели в связи с изменением параметров, от которых зависит изучаемый процесс. Это означает, что указанную систему приходиться решать многократно; при этом трудоемкость вычисления правых частей системы может быть достаточно высокой.

Соответственно, для эффективного решения задач системного анализа путем решения задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений необходимы эффективные методы численного интегрирования жестких систем дифференциальных уравнений. Необходимо отметить, что явление жесткости также характерно из-за большого различия собственных значений матрицы системы дифференциальных уравнений. Отличительной особенностью жестких систем является то, что на одних временных отрезках решение оказывается существенно нелинейным, а на других – близко к константе. Для решения такого рода систем используются неявные методы интегрирования [5, 6]. При этом, в силу существенно различного поведения решения на разных участках, требуется управлять выбором шагов интегрирования так, чтобы, с одной стороны, обеспечить приемлемую точность решения, а с другой стороны, когда трудоемкость вычисления правых частей системы высока, минимизировать число узлов интегрирования, используемой конечно-разностной формулы на всем отрезке интегрирования. Проблеме построения численных методов решения задачи Коши посвящено достаточно много работ [4-7].

В данной статье рассматриваются стратегии численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений, основанные на использовании конечно-разностной формулы [8]; приводится доказательство того, что задача о построении оптимального алгоритма удовлетворяет условиям многоэтапности, приведенным в [13], и описывается реализуемая версия оптимального алгоритма. При этом под оптимальным алгоритмом численного интегрирования понимается алгоритм, который минимизирует число вычислений правых частей системы дифференциальных уравнений при условии выполнения ограничений, определяемых точностью вычислений. Для реализации оптимального алгоритма требуется решение вспомогательных задач. В работе приведено исследование свойств оптимальной стратегии интегрирования, на основе которого предлагается модификация рассматриваемых стратегий. Она позволяет исследователю упростить реализацию, отказавшись от решения вспомогательных задач. При этом эксперименты показывают, что качество решения существенно не меняется, более того, в ряде случаев наблюдается уменьшение количества вычислений правых частей.

Статья является продолжением работ авторов [8-12].

Постановка задачи

Решается задача Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, при этом ее решение предполагается единственным и четырежды непрерывно дифференцируемым на отрезке $[x_0, t]$. Отметим, что значение параметра t не является известным, а находится в процессе интегрирования системы. Для отыскания значений $Y_i = (y_1^i, ..., y_n^i)$, i = 1, 2, ..., решения системы будем использовать конечно-разностную формулу [8].

Пусть $X(0,m) = (h_1, h_2, ..., h_{2m-1}, h_{2m})$ стратегия интегрирования по конечноразностной формуле на отрезке $[x_0, x_0 + z], z$ – заданная положительная константа. При этом шаги интегрирования выбираются таким образом, что $h_{2i-1} = \tau_i, h_{2i} = \tau_i, i = 1, ..., m$, где τ_0 - заданная константа.

Задача заключается в построении стратегии интегрирования таким образом, чтобы для любого момента окончания процесса интегрирования число узлов интегрирования было минимальным. Выбор значения величины шага интегрирования задается ограничением, обусловленным точностью вычислений по указанной конечно-разностной формуле, и связаны с локальной ошибкой, получаемой для каждой компоненты решения из-за конечно-разностной аппроксимации. С учетом поставленных требований указанная задача может быть представлена задачей математического программирования:

$$\sum_{i=1}^{m} \tau_i \Rightarrow max, \tag{1}$$
$$f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) \le 0,$$
$$\tau_i \ge 0, i = 1, ..., m.$$

Здесь $\tau_0 = \overline{\tau_0}$ – положительная вещественная константа, $f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) = 14\tau_i^5 + 12\tau_{i-1}\tau_i^4 + 3\tau_{i-1}^2\tau_i^3 - 8\Delta_i\tau_i - 3\Delta_i\tau_{i-1},$ (2) где $\Delta_i = 2\varepsilon_i K^{-1}, \varepsilon_i > 0, K > 0, i = 1, ..., m$. Вещественная константа K > 0 ограничивает абсолютное значение четвертой производной от компонент вектора решения Y(x): $\max_{1 \le j \le n} |y^{IV}(x)^j| \le K$,

 ε_i – заданная точность вычислений на *i*-ом шаге интегрирования.

Последовательность τ_i будем называть оптимальной τ –последовательностью. Стратегию интегрирования X(0,m), полученную с помощью оптимальной τ –последовательности, будем называть оптимальной стратегией интегрирования.

Построение оптимальной стратегии, основанной на использовании конечно-разностной формулы

Обозначим через

$$u_i(\tau_{i-1},\tau_i) = 70\tau_i^4 + 48\tau_{i-1}\tau_i^3 + 9\tau_{i-1}^2\tau_i^2 - 8\Delta_i$$
(3)

производную функции
$$f_i(t_{i-1}, t_i)$$
 по t_i , а через

$$v_i(\tau_{i-1}, \tau_i) = 12\tau_i^4 + 6\tau_{i-1}\tau_i^3 - 3\Delta_i$$
(4)

производную функции $f_i(\tau_{i-1}, \tau_i)$ по $\tau_{i-1}, i = 1, ..., m$.

Лемма 1.

При выполнении условия

$$f_i(\tau_{i-1},\tau_i) = 14\tau_i^5 + 12\tau_{i-1}\tau_i^4 + 3\tau_{i-1}^2\tau_i^3 - 8\Delta_i\tau_i - 3\Delta_i\tau_{i-1} = 0,$$
(5)
где $\tau_{i-1} \ge 0, \tau_i > 0, i = 1, ..., m$, имеют место следующие оценки:

$$u_i(\tau_{i-1},\tau_i) > 0, \tag{6}$$

$$v_i(\tau_{i-1},\tau_i) > 0, \tag{7}$$

$$0 < 1 - \frac{v_i(\tau_{i-1},\tau_i)}{2} < 1.$$
(8)

$$u_i(\tau_{i-1},\tau_i) \leq 1.$$

Доказательство.

Покажем справедливость неравенства (6), где $\tau_{i-1} \ge 0, \tau_i > 0$. Учитывая соотношения (3) и (5) получаем, что:

 $\tau_i u_i(\tau_{i-1}, \tau_i) = 70\tau_i^5 + 48\tau_{i-1}\tau_i^4 + 9\tau_{i-1}^2\tau_i^3 - 8\Delta_i\tau_i = f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) + +58\tau_i^5 + 36\tau_{i-1}\tau_i^4 + 9\tau_i^2\tau_i^3 - 8\Delta_i\tau_i = f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) + 58\tau_i^5 + 36\tau_{i-1}\tau_i^4 + 9\tau_i^2\tau_i^3 - 8\Delta_i\tau_i = f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) + 58\tau_i^5 + 36\tau_{i-1}\tau_i^4 + 9\tau_i^2\tau_i^3 - 8\Delta_i\tau_i = f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) + 58\tau_i^5 + 36\tau_{i-1}\tau_i^4 + 9\tau_i^2\tau_i^3 - 8\Delta_i\tau_i = f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) + 58\tau_i^5 + 36\tau_{i-1}\tau_i^4 + 9\tau_i^2\tau_i^3 - 8\Delta_i\tau_i = f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) + 58\tau_i^5 + 36\tau_{i-1}\tau_i^4 + 9\tau_i^2\tau_i^3 - 8\Delta_i\tau_i = f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) + 58\tau_i^5 + 36\tau_{i-1}\tau_i^4 + 9\tau_i^2\tau_i^3 - 8\Delta_i\tau_i = f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) + 58\tau_i^5 + 36\tau_{i-1}\tau_i^4 + 9\tau_i^2\tau_i^3 - 8\Delta_i\tau_i = f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) + 58\tau_i^5 + 36\tau_{i-1}\tau_i^4 + 9\tau_i^2\tau_i^3 - 8\Delta_i\tau_i = f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) + 58\tau_i^5 + 36\tau_{i-1}\tau_i^4 + 9\tau_i^2\tau_i^3 - 8\Delta_i\tau_i = f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) + 58\tau_i^5 + 36\tau_{i-1}\tau_i^4 + 9\tau_i^2\tau_i^3 - 8\Delta_i\tau_i = f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) + 58\tau_i^5 + 36\tau_{i-1}\tau_i^4 + 9\tau_i^2\tau_i^3 - 8\Delta_i\tau_i = f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) + 58\tau_i^5 + 36\tau_{i-1}\tau_i^4 + 9\tau_i^2\tau_i^2 - 8\tau_i^2\tau_i^2 + 9\tau_i^2\tau_i^2 - 8\tau_i^2\tau_i^2 - 8$ $6\tau_{i-1}^2\tau_i^3 + 3\Delta_i\tau_{i-1} = 58\tau_i^5 + 36\tau_{i-1}\tau_i^4 + 6\tau_{i-1}^2\tau_i^3 + 3\Delta_i\tau_{i-1} > 0$ В силу того, что $\tau_i > 0$, имеем $u_i(\tau_{i-1}, \tau_i) > 0$.

Аналогично доказывается справедливость неравенства (7) путем рассмотрения выражения $\left(\frac{8}{3}\tau_{i}+\tau_{i-1}\right)v_{i}(\tau_{i-1},\tau_{i}).$

Учитывая (4) и (5), получаем, что: $\left(\frac{8}{3}\tau_{i}+\tau_{i-1}\right)\nu_{i}(\tau_{i-1},\tau_{i}) = 32\tau_{i}^{5}+28\tau_{i-1}\tau_{i}^{4}+6\tau_{i-1}^{2}\tau_{i}^{3}-8\Delta_{i}\tau_{i}-3\Delta_{i}\tau_{i-1} = f_{i}(\tau_{i-1},\tau_{i})+1$ 18 τ_i^5 + 16 $\tau_{i-1}\tau_i^4$ + 3 $\tau_{i-1}^2\tau_i^3$ = 18 τ_i^5 + 16 $\tau_{i-1}\tau_i^4$ + 3 $\tau_{i-1}^2\tau_i^3$ > 0 , откуда следует, что $v_i(\tau_{i-1}, \tau_i)$ > 0 при $\tau_{i-1} \ge 0, \tau_i > 0$ и $f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) = 0, i = 1, ..., m$. Из (6) и (7) следует, что 1 - $\frac{v_i(\tau_{i-1}, \tau_i)}{u_i(\tau_{i-1}, \tau_i)} < 1$.

Покажем теперь, что:

$$1 - \frac{v_i(\tau_{i-1},\tau_i)}{u_i(\tau_{i-1},\tau_i)} > 0.$$
(9)

Так как $u_i(\tau_{i-1}, \tau_i) > 0$, при $\tau_{i-1} \ge 0$, $\tau_i > 0$ и $f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) = 0$, i = 1, ..., m, то (9) равносильно неравенству:

$$w_i(\tau_{i-1},\tau_i) = u_i(\tau_{i-1},\tau_i) - v_i(\tau_{i-1},\tau_i) > 0.$$
(10)

Подставляя в (10) выражение для $u_i(\tau_{i-1}, \tau_i)$ и $v_i(\tau_{i-1}, \tau_i)$ из (3) и (4), получаем, что нужно убедиться в справедливости неравенства:

$$w_i(\tau_{i-1},\tau_i) = 58\tau_i^4 + 42\tau_{i-1}\tau_i^3 + 9\tau_{i-1}^2\tau_i^2 - 5\Delta_i > 0$$
при выполнении равенства (5), где $\tau_{i-1} \ge 0, \tau_i > 0$.

Для этого рассмотрим выражение $\left(\frac{8}{5}\tau_i + \frac{3}{5}\tau_{i-1}\right)w_i(\tau_{i-1}, \tau_i)$ и получим, что $\left(\frac{8}{5}\tau_i + +\frac{3}{5}\tau_{i-1}\right)w_i(\tau_{i-1},\tau_i) = f_i(\tau_{i-1},\tau_i) + \frac{394}{5}\tau_i^5 + \frac{276}{5}\tau_{i-1}\tau_i^4 + \frac{183}{5}\tau_{i-1}^2\tau_i^3 + \frac{27}{5}\tau_{i-1}^3\tau_i^2 = \frac{1}{5}\tau_i^2 + \frac{1}{5}$ $\frac{394}{5}\tau_{i}^{5} + \frac{276}{5}\tau_{i-1}\tau_{i}^{4} + \frac{183}{5}\tau_{i-1}^{2}\tau_{i}^{3} + \frac{27}{5}\tau_{i-1}^{3}\tau_{i}^{2} > 0.$

Следовательно, $w_i(\tau_{i-1}, \tau_i) > 0$ и неравенство (9) доказано при $\tau_{i-1} \ge 0$, $\tau_i > 0$ и $f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) = 0, i = 1, ..., m$. Таким образом, лемма 1 доказана.

Пусть
$$\tau_0 \in [0, \tilde{\tau}_i]$$
, где $\tilde{\tau}_i = \left(\frac{4}{7}\Delta_i\right)^{\frac{1}{4}}$, $i = 1, ..., m$.

Лемма 2.

Уравнение $f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) = 0$ задает однозначную положительную функцию $g_i(\tau_{i-1})$ такую, что выполнение соотношения $f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) \leq 0$ равносильно выполнению неравенства $\tau_i \leq g_i(\tau_{i-1}), \tau_{i-1} \in [0, \tilde{\tau}_{i-1}], i = 1, ..., m.$

Доказательство.

При $\tau_{i-1} = 0$ имеем $g_i(0) = \left(\frac{4}{7}\Delta_i\right)^{\frac{1}{4}} > 0.$

Пусть при фиксированном значении $\tau_{i-1} \in [0, \tilde{\tau}_{i-1}] \tilde{f}_i(\tau_i) = f_i(\tau_{i-1}, \tau_i)$, где функция $f_i(\tau_{i-1}, \tau_i)$ определена в (2). Используя (2), непосредственно находим, что функция $\tilde{f}_i(\tau_i)$ является непрерывной и выпуклой функцией при $\tau_i \ge 0$. При этом $\tilde{f}_i(0) = -3\Delta_i \tau_{i-1} < 0$, а $\tilde{f}_i(\tilde{\tau}_i) = \frac{27}{7}\Delta_i \tau_{i-1} + 3\tau_{i-1}^2 \tilde{\tau}_i^3 > 0$, так как $\Delta_i > 0$, $\tau_{i-1} > 0$, $\tilde{\tau}_i > 0$, i = 1, ..., m. Следовательно, при каждом фиксированном значении $\tau_{i-1} \in [0, \tilde{\tau}_{i-1}]$ существует единственное значение $\tau_i = g_i(\tau_{i-1}) \in (0, \tilde{\tau}_i)$ такое, что $\tilde{f}_i(g_i(\tau_{i-1})) = f_i(\tau_{i-1}, g_i(\tau_{i-1}))$, причем $\tilde{f}_i(\tau_i) = f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) \le 0$, для каждого $\tau_{i-1} \in [0, \tilde{\tau}_{i-1}]$, $\tau_i \in [0, g_i(\tau_{i-1})]$, i = 1, ..., m, откуда следует равносильность соотношений $f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) \le 0$ и $\tau_i \le g_i(\tau_{i-1})$.

Лемма 2 доказана.

Теорема 1.

Решение задачи (1) существует.

Доказательство.

Приведем задачу (1) к задаче на минимум:

$$\begin{aligned} & -\sum_{i=1}^{m} \tau_i \Rightarrow \min \\ & f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) \le 0, i = 1, \dots, m, \\ & \tau_i \ge 0, i = 1, \dots, m, \end{aligned}$$
(11)

 $\tau_0 = \overline{\tau_0} > 0$ - заданная величина.

Пусть D_m – допустимое множество задачи (11). Множество D_m является ограниченным. Действительно, при заданном значении $\tau_0 \in (0, \tilde{\tau}_0)$, с учетом доказательства леммы 2, имеем, что если выполнено соотношение $f_1(\tau_0, \tau_1) \leq 0$, то $0 \leq \tau_1 \leq g_1(\tau_0)$. В силу того, что функция $g_i(\tau_{i-1})$ строго монотонно убывает при $f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) \leq 0$ из леммы 2 следует, что $0 \leq \tau_i \leq g_i(0) = (\frac{4}{7}\Delta_i)^{\frac{1}{4}}$, i = 2, ..., m. Поскольку функции $f_i(\tau_{i-1}, \tau_i)$, i = 1, ..., m непрерывны, то множество D_m замкнуто. Тогда, по теореме Вейерштрасса, задача (1) имеет решение. Теорема 1 доказана.

В силу леммы 1, леммы 2 и теоремы 1 задача (1) является многоэтапной задачей математического программирования [14]. Это означает, что задача (1) может быть решена последовательным решением *m* локальных задач:

$$\tau_i \Rightarrow max, \tag{12}$$

$$f_i(\tau_{i-1}, \tau_i) \le 0, i = 1, \dots, m.$$

Таким образом, чтобы построить оптимальную стратегию интегрирования, необходимо решить уравнение (5) для нахождения значения τ_i , i = 1, ..., m.

Исследование оптимальной стратегии

В [16] рассматривалась упрощенная стратегия интегрирования, основанная на том свойстве, что оптимальная τ -последовательности сходится к неподвижной точке при фиксированном значении $\Delta_i = \Delta$ на отрезке длины *z*. Приведем доказательство данного факта.

Напомним, что уравнение (5) на отрезке $[0, \tilde{\tau}], \tilde{\tau} = (\frac{4}{7}\Delta)^{\frac{1}{4}}, \tilde{\tau} < z$, при фиксированном $\tilde{\tau}_{i-1}$ имеет единственный положительный корень. Пусть *g* - отображение отрезка $[0, \tilde{\tau}]$ в се-

бя, определяемое уравнением (5), тогда $g(\bar{\tau})$ будет единственным положительным корнем уравнения (5), где $\bar{\tau} \in [0, \tilde{\tau}]$.

Производная $g'(\bar{\tau})$ функции $g(\bar{\tau}), \bar{\tau} \in [0, \tilde{\tau}]$, имеет вид:

$$g'(\bar{\tau}) = -\frac{v(\bar{\tau}, g(\bar{\tau}))}{u(\bar{\tau}, g(\bar{\tau}))},$$

где $u(\bar{\tau}, g(\bar{\tau})) = 70g^4(\bar{\tau}) + 48\bar{\tau}g^3(\bar{\tau}) + 9\bar{\tau}^2g^2(\bar{\tau}) - 8,$
 $v(\bar{\tau}, g(\bar{\tau})) = 12g^4(\bar{\tau}) + 6\bar{\tau}g^2(\bar{\tau}) - 3.$ При выполнении равенства (5)
 $u(\bar{\tau}, g(\bar{\tau})) > 0,$
 $v(\bar{\tau}, g(\bar{\tau})) > 0,$

т.е. функция $g(\bar{\tau})$ дифференцируема при $\bar{\tau} \in [0, \tilde{\tau}]$ и строго монотонно убывает на этом отрезке. Кроме того

$$|g'(\bar{\tau})| \leq \frac{3}{16}$$

в силу (5), т.е. отображение g на отрезке $[0, \tilde{\tau}]$ является сжимающим отображением и имеет единственную неподвижную точку

$$\overline{\tau}^* = \left(\frac{11}{29}\Delta\right)^{\frac{1}{4}}$$

Исследуем зависимость числа итераций \overline{m} , необходимых для достижения неподвижной точки $\overline{\tau}^*$, от значения Δ и τ_0 . Для этого будем разрешать уравнение (5) методом дихотомии с заданной точностью $\delta = 0,000001$. В результате вычислительных экспериментов на тестируемых системах дифференциальных уравнений выявлены характерные интервалы изменения значений для Δ и τ_0 : $[10^{-15}, 10^5]$ и $[10^{-6}, 10^1]$ соответственно. Вычислительный эксперимент показал, число итераций \overline{m} при варьировании значения τ_0 для фиксированного значения Δ слабо изменяется. Для примера приведем в табл. 1 результаты эксперимента при $\Delta = 0,0001, \overline{\tau}^* = 0,078478$.

Таблица 1. Сходимость оптимальной **т**-последовательности при фиксированном **Δ** = **0,0001**

Table 1.

The convergence of optimal τ -sequence for fixed $\Delta = 0.0001$

τ_0	\overline{m}
10	6
5	6
3	6
1	6
0,1	5
0,01	5
0,001	5
0,0001	5
0,00001	5
0,000001	5

При этом при уменьшении значения Δ число итераций \overline{m} уменьшается. В табл. 2 приведены результаты эксперимента для фиксированного значения шага $\tau_0 = 0,0001$. Данный факт позволяет предложить использовать для вычисления шагов интегрирования значения неподвижной точки на подынтервалах с быстрым изменением решения (например, при $\Delta \leq 10^{-7}$), т.е. не использовать вспомогательные методы для решения уравнения (5) для указанных подынтервалов.
Таблица 2.

Сходимость оптимальной т-последовательности при фиксированном $\tau_0 = 0,0001$

Table 2.

The convergence of optimal τ -sequence for fixed $\tau_0 = 0.0001$

Δ	m
10000	8
1000	8
100	7
10	6
1	6
0,1	6
0,01	6
0,001	6
0,0001	5
10-5	5
10-6	6
10-7	4
10-8	4
10-9	4
10-10	4
10-11	4
10-12	4
10-13	3
10-14	3
10-15	2

Реализуемая версия оптимального алгоритма

Общую схему алгоритма интегрирования, основанного на оптимальной стратегии, можно описать следующим образом.

1. Определим начальный шаг интегрирования $h_0 = \tau_0$, где τ_0 – заданное положительное число.

2. Определим величину $z > 0, z \in R$, определяющая размер подотрезка $[x_0, x_0 + z]$, на котором строится решение системы.

3. Построим оценку K четвертой производной от компонент решения системы дифференциальных уравнений для подотрезка $[x_0, x_0 + z]$. По трем узлам из истории вычислений, если у нас есть информация о предыдущих узлах, и узлу сделанного с шагом h = z построим полином Лагранжа четвертого порядка. Далее вычислим четвертую производную для данного полинома и в качестве оценки K возьмем ее абсолютное значение. Если информации о предыдущих вычислениях нет (в начале работы метода), необходимо трижды проинтегрировать систему с шагом $h = -\tau_0$.

4. Определим шаги интегрирования $h_{2i-1} = \tau_i$, $h_{2i} = \tau_i$, а $h_{2i-2} = \tau_{i-1}$, i = 1, 2, Значение τ_i находим, применяя одну из возможных модификаций: разрешая уравнение (5) при фиксированном τ_{i-1} , если Δ превышает пороговое значении $\overline{\Delta}$, и используя в качестве величины шага значение $\overline{\tau}^*$ в противном случае.

5. Если $x_m > x_0 + z$, переходим к следующему подотрезку, принимая $x_0 = x_m$, и переходим к шагу 2.

6. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие останова.

Вычислительный эксперимент

Продемонстрируем работоспособность предложенной модификации для стратегии интегрирования, описанной в [10, 11] и основанной на оптимальной стратегии. Эксперименты проводились для обыкновенных систем уравнений, описывающих модель Ходкина-Хаксли [14]. Данная модель используется в нейродинамике в качестве фундаментальной модели описания динамики нейрона и расширяется, например, добавлением в модель дополнительных ионных каналов и учетом пространственной структуры нейрона.

Приведем здесь результаты экспериментов, где в качестве функции I(t), определяющей силу тока, подающуюся на мембрану нейрона, выбирались константная I(t) = 0,5 и синусоидальная функции I(t) = sin t + 1, отрезок интегрирования выбирался равным [0, 200]. В табл. 3 представлены результаты, отражающие сравнение запусков с применением предложенной модификации и оптимальной стратегии выбора шагов интегрирования. В качестве основных параметров сравнения используется количество шагов N, минимальная и максимальная величины шагов h_{min} и h_{max} при варьировании параметра ε_i , определяющего точность вычисления размера шага. Оптимальная стратегия обозначена через α , предложенная модификация – через $\overline{\alpha}$ соответственно. Для $\overline{\alpha}$ пороговое значение $\overline{\Delta} = 10^{-7}$.

Таблица 3.

Сравнение результатов запуска а и а.

Table 3.The comparison of obtained results for a and $\overline{\alpha}$

I(t)	ε_i	<u>Ν</u> (α)	$N(\overline{\alpha})$	$h_{min}(\alpha)$	$h_{min}(\overline{\alpha})$	$h_{max}(\alpha)$	$h_{max}(\overline{\alpha})$
sin t + 1	0,0001	2598	2510	0,00327	0,003481	0,33434	0,54808
sin t + 1	0,00001	5507	5234	0,00169	0,001957	0,23534	0,20654
0,5	0,0001	1016	987	0,00479	0,006064	0,67421	1,01793
0,5	0,00001	2945	2596	0,00196	0,002052	0,80173	0,67902

Отметим, что для более низкой точности ε_i предложенная модификация не запускается, так как значение параметра Δ , которая зависит от ε_i , не попадает в определенный выше диапазон. На рис. 1 и 2 изображены графики компонент решений V(t), m(t), n(t), h(t), полученные для синусоидальной функции для случая $\varepsilon_i = 0,00001$.



Рис. 1. График функции V(t) для случая $\varepsilon_i = 0,00001$ Fig. 1. V(t) function graph for $\varepsilon_i = 0.00001$





В табл. 4 представим результаты запусков алгоритма для задачи Коши, приведенной в [8]. Она имеет аналитическое решение, поэтому в качестве основных параметров сравнения будем использовать максимальную разность между аналитическим и численным решением σ , полученную по всем компонентам решения, и число шагов интегрирования N. Оптимальная стратегия обозначена через α , предложенная модификация – через $\bar{\alpha}$ соответственно. Здесь в модификации $\bar{\alpha}$ будем использовать для подотрезков длиной z = 0,1 величину шага, равную $\bar{\tau}^*$.

Таблица 4. Сравнение результатов запуска а и а.

Table 4. The comparison of obtained results for α and $\overline{\alpha}$

ε_i	<u>Ν</u> (α)	$N(\overline{\alpha})$	σ(α)	<u>σ(</u> ā)
0,00001	199	196	0,000012	0,0000364
0,0001	187	184	0,00011	0,000265
0,001	100	95	0.00631	0,00708
0,01	55	53	0,011	0,013
0,1	20	18	0,011	0,0129

Заключение

Построена стратегия (алгоритм) решения задачи Коши для класса жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Приведено доказательство того, что задача о построении оптимальной стратегии удовлетворяет условиям многоэтапности [9], что позволяет при ее реализации выбирать шаги интегрирования путем решения возникающих локальных задач, гарантирующих минимизацию узлов интегрирования на всем отрезке интегрирования. Предложена модификация оптимальной стратегии, позволяющая не решать многократно возникающие при ее реализации вспомогательные задачи.

Результаты вычислительного эксперимента показывают, что использование стратегии выбора шагов интегрирования с описанной модификацией, является допустимой эвристикой, позволяющей сохранить качество получаемого решения и получить приемлемый результат.

Исследования проведены с использованием системы тестирования разрабатываемых алгоритмов [15].

Работа выполнена в рамках реализации программы «Передовая инженерная школа» Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Библиографический список

- Afraimovich, L.G. Scientific and Pedagogical School of Dmitry Ivanovich Batishchev / Basalin P.D., Korotchenko A.G., Prilutskii M.Kh., Starostin N.V. // Pattern Recognition and Image Analysis. V. 33. № 4. 2023. P. 1473-1478
- 2. **Моисеев, Н.Н.** Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1981. 488с.
- 3. Моисеев, Н.Н. Математические задачи системного анализа. // Изд. стереотип. 2023. 532 с.
- 4. **Бахвалов, Н.С.** Численные методы / Жидков Н.П., Кобельков Г.М. // Лаборатория знаний. 2023. 636 с.
- 5. **Хайрер** Э., Решение обыкновенных дифференциальных уравнений: Жесткие и дифференциально-алгебраические задачи / Ваннер Г. / Издательство: Мир. 1999. 688 с.
- 6. Ракитский Ю.В., Численные методы решения жестких систем / Устинов С.М., Черноруцкий И.Г. / М.: Наука. 1979. 208 с.
- 7. Shampine L.F., The MATLAB ODE Suite / Reichelt M. W. // SIAM Journal on Scientific Computing. 1997.Vol. 18. P. 1-22.
- 8. **Korotchenko, A.G.** On a method of construction of numerical integration formulas / Smoryakova V.M.// AIP Conf. Proc., Numerical Computations: Theory and Algorithms (NUMTA-2016). 2016. T. 1776. C. 090012.
- 9. Korotchenko, A.G. On a comparison of several numerical integration methods for ordinary systems of differential equations / Smoryakova V.M. //Lecture Notes in Computer Science. 2020. T. 2. C. 406-412.
- Коротченко, А.Г. О стратегиях численного интегрирования, основанных на использовании одной конечно-разностной формулы / Сморякова, В.М. // Интеллектуальные информационные системы: труды Международной научно-практической конференции: в 2 ч. Воронеж: Изд-во ВГТУ. 2021. Т. 1. С. 91-96.
- 11. Коротченко, А.Г. Об одной стратегии численного интегрирования, основанной на использовании конечно-разностной формулы / Сморякова, В.М. // В сборнике: Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. Труды XXI Международной конференции. Нижний Новгород. 2021. Т. 1. С. 174-179.
- Коротченко, А.Г. О некоторых стратегиях численного интегрирования, основанных на использовании конечно-разностной формулы / В.М. Сморякова, А.Г. Коротченко // В сборнике: Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии. Труды XXII Международной конференции. Нижний Новгород. 2022. Т. 1. С. 46-51.
- 13. Коротченко, А.Г. О задачах математического программирования, имеющих многоэтапный характер // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. Т. 1. С. 183-187.
- 14. **Wulfram Gerstner**, Neuronal Dynamics. From single neurons to networks and models of cognition / Werner M. Kistler, Richard Naud, Liam Paninski // https://neuronaldynamics.epfl.ch/online/index.html.
- 15. Сморякова, В.М. О программной реализации системы, предназначенной для исследования алгоритмов с требуемыми свойствами // Интеллектуальные Информационные Системы: труды Международной научно-практической конференции, посвященной 40-летию кафедры САПРИС. Воронеж. 2024. С. 234-238.

Дата поступления в редакцию: 27.02.2025

Дата принятия к публикации: 02.05.2025 УДК 004.032.2

DOI 10.46960/1816-210X_2025_2_41 EDN HKDMOP

ПРЕДОБРАБОТКА ДАННЫХ ЭКГ И ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛИЙ ПРИ ПОМОЩИ РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

О.П. Тимофеева

ORCID: 0000-0002-1935-7697 e-mail: optimofeeva@mail.ru Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева Нижний Новгород, Россия

М.М. Гордеев

ORCID: 0009-0005-2450-0274 e-mail: maximgrdv@gmail.com

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

Рассматривается задача обнаружения аномалий ЭКГ при помощи рекуррентных нейронных сетей, способных эффективно обрабатывать временные зависимости сигналов, а также выявлять сложные паттерны и аномалии, которые могут быть неочевидны при использовании традиционных методов анализа. Описываются этапы предобработки данных ЭКГ из датасета ECG5000, включая интерполяцию, аугментацию и нормализацию ЭКГ с целью улучшения характеристик входных данных для обучения модели. Представлена архитектура нейронной сети для решения поставленной задачи, изложен процесс ее обучения и оценки качества. Полученные результаты экспериментов показывают высокую точность классификации и возможность успешного выявления различных типов аномалий. Обоснована перспективность применения глубокого обучения в области кардиологии, что может послужить основой для проведения дальнейших исследований.

Ключевые слова: нормализация данных, классификация ЭКГ, обнаружение аномалий ЭКГ, рекуррентные нейронные сети, датасет ECG5000, веб-сервис Django, квантизация модели, аугментация данных, оптимизация инференса.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Тимофеева, О.П. Предобработка данных ЭКГ и обнаружение аномалий при помощи рекуррентных нейронных сетей / О.П. Тимофеева, М.М. Гордеев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 2. С. 41-49. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_41 EDN: HKDMOP

PREPROCESSING OF ECG DATA AND ANOMALY DETECTION USING RECURRENT NEURAL NETWORKS

O.P. Timofeeva ORCID: 0000-0002-1935-7697 e-mail: optimofeeva@mail.ru Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev Nizhny Novgorod, Russia

M.M. Gordeev ORCID: 0009-0005-2450-0274 e-mail: maximgrdv@gmail.com Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper considers the problem of detecting ECG anomalies using recurrent neural networks that can effectively process temporal dependencies of signals, as well as identify complex patterns and anomalies that may not be obvious when using traditional analysis methods. The stages of ECG data preprocessing from the ECG5000 dataset are described, including interpolation, augmentation and normalization of ECG in order to improve the characteristics of the input data for model training. The architecture of a neural network for solving the presented problem is presented, the process of its training and quality assessment is described. The obtained experimental results show high

[©] Тимофеева О.П., Гордеев М.М., 2025

classification accuracy and the possibility of successfully identifying various types of anomalies. The prospects of using deep learning in the field of cardiology are substantiated, which can serve as a basis for further research.

Key words: data normalization, ECG classification, ECG anomaly detection, recurrent neural networks, ECG5000 dataset, web-service Django, quantization of model, data augmentation, inference optimization.

FOR CITATION: O.P. Timofeeva, M.M. Gordeev. Preprocessing of ECG data and anomaly detection using recurrent neural networks. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 2. Pp. 41-49. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_41 EDN: HKDMOP

Введение

В эпоху цифровых технологий обработка и анализ медицинских данных становятся все более важными для диагностики и мониторинга здоровья людей. Использование нейронных сетей для анализа ЭКГ способствует раннему выявлении симптомов сердечных заболеваний, например, фибрилляции предсердий, что способно предотвратить более серьезные состояния: инсульты и сердечные приступы. Более того, автоматизация процесса обнаружения аномалий может значительно снизить нагрузку на врачей и другой медицинский персонал, позволяя им сосредоточиться на принятии клинических решений. В настоящее время рекуррентные нейронные сети показывают хорошую эффективность при решении задач обработки последовательностей данных. Поскольку ЭКГ представляют собой последовательности электрических сигналов сердца, рекуррентные нейронные сети способны успешно распознавать сложные шаблоны, которые могут указывать на аномалии [1]. Данный тип нейронных сетей применяется и для обработки данных переменной длины, что соответствует внутреннему представлению ЭКГ, где продолжительность записей может сильно варьироваться.

В рамках работы проведена предобработка датасета ECG5000, создана, обучена и протестирована рекуррентная нейронная сеть для обнаружения аномалий ЭКГ. Выполнена квантизация модели до 8 бит, продемонстрировавшая уменьшение объема памяти, необходимого для хранения весов модели, в четыре раза, и ускорение времени получения результатов за счет более эффективных целочисленных операций. Для удобства взаимодействия пользователя с разработанным функционалом был реализован веб-сервис на основе фреймворка *Django*, который позволил сделать процесс анализа более эффективным и доступным.

Анализ и предобработка данных ЭКГ

Исходный набор данных ECG5000 представляет собой 20-часовую ЭКГ, загруженную из базы данных BIDMC и содержащую 5000 временных рядов, 2989 из которых относятся к нормальному типу ЭКГ, а остальные 2011 – к типу аномалий. Прежде чем выполнять обучение при помощи нейронной сети, необходимо провести предобработку данных. Каждый загруженный удар сердца интерполируется до одинаковой длины, равной 140 временным шагам. Данные ЭКГ разделены на пять классов: нормальный ('Normal'), желудочковые тахиаритмии ('R on T'), преждевременное сокращение желудочков ('PVC'), наджелудочковое преждевременное ('SP') и неклассифицированное сердцебиение ('UB'). Каждый временной ряд содержит 140 значений ЭКГ и метку – класс. Пример ЭКГ каждого класса представлен на рис. 1. Данные ЭКГ содержат по краям резкие подъемы и спуски. Эти экстремальные значения могут оказывать негативное влияние на обучение модели. Чтобы предотвратить это, было принято решение обрезать края каждой ЭКГ, оставив только набор точек с 25 по 80 отсечеты. Самым большим классом по количеству укземпляров является класс 'Normal', содержащий 2919 данных. Остальные классы распределены следующим образом: 'R on T' – 1767 экземпляров, 'PVC' – 194 экземпляра, 'SP' – 96 экземпляров и 'UB' – 24 экземпляра (рис. 2).





Соответственно, такое распределение является несбалансированным, что может плохо сказаться при последующем обучении нейронной сети.

Для обеспечения более эффективного обучения нейронной сети была применена аугментация данных. Это важный шаг, который позволяет расширить набор данных и улучшить обобщающую способность модели. Для этого была разработана специальная функция с целью добавления шума к ЭКГ каждого класса, за исключением 'Normal'. Такой подход позволяет модели учитывать различные вариации сигналов, с которыми она может столкнуться в реальных условиях.



Рис. 2. Распределение данных по классам Fig. 2. Distribution of data by classes

После проведения аугментации размер датасета значительно увеличился, а количество экземпляров ЭКГ в каждом классе стало одинаковым. На рис. 3 можно видеть пример сравнения исходной ЭКГ и аугментированной для каждого класса.

Для устранения неоднородности данных, улучшения сходимости алгоритмов оптимизации, предотвращения переполнения и улучшения обобщающей способности модели требуется нормализация – процесс приведения значений признаков к стандартному формату или диапазону [2]. Нормализация помогает модели избегать переобучения.



Рис. 3. Пример сравнения исходной и аугментированной ЭКГ для каждого класса Fig. 3. Example of comparison of original ECG and augmented one for each class

Существует несколько методов нормализации данных.

- *Z-нормализация* метод, преобразующий каждый признак так, чтобы его среднее значение было равно 0, а стандартное отклонение 1, путем вычитания среднего значения из каждого значения признака и деления на стандартное отклонение.
- *L2-нормализация*, также известная как нормализация векторов, преобразует каждый вектор данных так, чтобы его длина (норма L2) была равна 1. Этот метод делит каждый вектор на его евклидову норму (корень из суммы квадратов его элементов).
- *Минимизация L1-нормы* не соответствует нашему случаю, потому что L1-регуляризация обычно используется в моделях машинного обучения для разреживания весов, что может быть неэффективным для некоторых типов данных.
- Мин-макс нормализация (MinMaxScaler) метод, который масштабирует значения признаков так, чтобы они находились в определенном диапазоне, обычно от 0 до 1. Для каждого признака этот метод вычитает минимальное значение признака и затем делит на разницу между максимальным и минимальным значениями признака.

На рис. 4 представлены примеры ЭКГ до и после нормализации данных.

В работе сделан выбор в пользу z-нормализации, так как она позволяет сохранить форму распределения данных и обычно хорошо работает с алгоритмами машинного обучения. Кроме того, она чувствительна к выбросам в данных, что может быть полезным для обработки экстремальных значений в датасете ECG5000 [3].



Рис. 4. Пример ЭКГ до и после нормализации данных Fig. 4. Example of ECG before and after data normalization

Обучение нейронной сети

Поскольку предобработанные данные принадлежат к пяти классам (четыре различных класса аномалий и один класс нормальных данных), задача детектирования аномалий является задачей многоклассовой классификации.

Конфигурация предложенной нейронной сети для решения задачи детектирования аномалий выглядит следующим образом.

- 1. *Embedding-слой* содержит категориальные признаки в виде числовых векторов меньшей размерности, что повышает точность и производительность модели.
- 2. *LSTM-слой* способен запоминать информацию на протяжении длительных временных интервалов данных ЭКГ благодаря своей способности контролировать поток информации, а также избегать проблем с затуханием и взрывом градиентов.
- 3. Полносвязный (Dense) слой количество выходных нейронов равно количеству классов данных.

Для создания модели использовался фрейморк глубокого обучения *Keras*. В качестве оптимизатора был выбран *Adam* [4], поскольку он комбинирует преимущества адаптивного шага обучения (который регулируется индивидуально для каждого параметра) и моментума (который помогает ускорить обучение и избежать застревания в локальных минимумах), а также автоматически адаптирует скорость обучения для каждого параметра на основе первых и вторых моментов градиента, что упрощает настройку гиперпараметров. График функции потерь (рис. 5) показывает, что обучение прошло успешно, так как функция потерь убывает с ростом числа итераций.

Для оценки производительности модели нейронной сети в данной работе использовалась метрика точности *accuracy* [5], которая определяет долю правильно классифицированных образцов по отношению к общему их числу в тестовом наборе данных. Точность модели составила 89 %: из 100 тестовых образцов 89 были классифицированы верно. Поскольку классы в наборе данных были предварительно сбалансированы, данная метрика дает надежное представление о качестве обучения нейронной сети, однако она не учитывает некоторые типы ошибок, которые могут возникнуть при классификации. Речь идет об ошибках первого (тест показывает, что болезнь присутствует, когда на самом деле ее нет) и второго рода (тест не показывает наличие болезни, хотя на самом деле она есть). Поэтому было важно выполнить также оценку таких метрик, как *precision*, recall и F1-score [6], чтобы получить более полное представление о надежности модели, особенно в контексте медицинской диагностики, где ошибки могут иметь серьезные последствия.



Рис. 5. График функции потерь в зависимости от эпох для рекуррентной сети Fig. 5. Graph of the loss function depending on the epochs for a recurrent network

Значение метрики *precision* составило 87 %, что означает, что модель хорошо справляется с задачей минимизации ложных положительных результатов, которые могут привести к ненужным диагностическим процедурам или лечению.

Значение метрики *recall* составило 84 % и говорит о том, что модель не пропустила значительное количество положительных случаев. *F1-score* в 85.5 % указывает на то, что модель достигает хорошего баланса между *precision* и *recall*. Это особенно важно именно в многоклассовой задаче, где необходимо учитывать компромисс между точностью и полнотой.

Оптимизация обученной модели

Чтобы ускорить время выполнения обученной модели нейронной сети, было решено применить квантизацию – процесс преобразования весов и активаций модели из формата с плавающей запятой в целочисленный формат [7]. Это позволяет значительно уменьшить объем памяти, необходимый для хранения модели, и ускорить вычисления, что особенно важно для приложений, работающих на устройствах с ограниченными ресурсами, таких как мобильные телефоны и встроенные системы. Процесс квантизации начинается с определения минимальных и максимальных значений весов и активаций в каждом слое сети. Эти значения позволяют установить диапазон, в котором находятся данные. Затем для весов модели рассчитывается коэффициент масштабирования, который помогает преобразовать значения в целочисленный формат. Это делается путем вычитания минимального значения из каждого веса, умножения на коэффициент и округления результата до ближайшего целого числа [8]. Этот же процесс повторяется для активаций, что также позволяет снизить их размер и упростить вычисления.

Изначально веса обученной модели представлены в 32-битном формате, что обеспечивает высокую точность и широкий диапазон значений. Для оптимизации работы сети была применена квантизация, которая привела к преобразованию весов в 8-битный формат. Этот процесс включает в себя сжатие диапазона значений, что позволяет значительно уменьшить объем занимаемой памяти. Каждый вес, который ранее занимал 32 бита, теперь будет представлен всего 8 битами, что эквивалентно 256 возможным значениям [9].

После применения квантизации обученной нейронной сети изменились веса модели, что привело к изменению результатов работы. Анализ работы нейронной сети после квантизации показал следующее.

- 1. Метрики качества модели, такие как *precision, recall* и *F1-score*, на тестовом наборе данных остались на уровне, сопоставимом с оригинальной моделью, без каких-либо значительных ухудшений. Это означает, что квантизация не повлияла на способность модели правильно классифицировать результаты.
- Время ответа модели (скорость инференса) время, необходимое для обработки моделью поступающих на вход данных и выдачи ответа, стало меньше, поскольку операции с целыми числами выполняются быстрее, чем операции с плавающей запятой. Это позволило сети более эффективно реагировать на запросы.
- 3. Квантизация позволила сократить объем памяти, необходимый для хранения весов модели, в четыре раза по сравнению с оригинальной ее версией. Это делает полученную модель более соответствующей развертыванию на встроенных системах, где ресурсы ограничены.

Создание веб-сервиса

Для обеспечения доступности и удобства использования разработанного функционала был создан веб-сервис на основе фреймворка *Django* [10], что позволило сделать более наглядным процесс анализа ЭКГ. При таком подходе пользователи могут посмотреть свои данные и результаты их анализа в любое время и из любого места, что особенно важно для людей, находящихся в разных географических точках.

Создание веб-сервиса требует архитектуры (рис. 6), которая обеспечивает надежность, масштабируемость и безопасность.



Рис. 6. Архитектура веб-сервиса Fig. 6. Architecture of web-service

Важнейшими компонентами такого сервиса являются клиентская и серверная части [11], а также база данных; все они взаимосвязаны и работают в единой экосистеме. Клиентская часть отвечает за взаимодействие с пользователем и включает в себя интерфейс, который позволяет загружать данные ЭКГ, просматривать результаты анализа и получать отчеты. Для обеспечения удобства использования интерфейс был реализован интуитивно понятным

и интерактивным, чтобы пользователи могли быстро ориентироваться в функционале. Цель серверной части – обработка запросов от клиентской стороны и реализации логики для аутентификации пользователей, управления данными и выполнения анализа. Она принимает загруженные данные, обрабатывает их и применяет алгоритмы для обнаружения аномалий. Сервер также отвечает за генерацию отчетов, которые возвращаются пользователю в удобном формате. Взаимодействие между клиентом и сервером осуществляется через API, что позволяет разделить логику приложения и интерфейс, обеспечивая гибкость и масштабируемость. Для сохранения данных пользователей, записей ЭКГ, а также результатов анализа была создана база данных на основе системы управления данными PostgreSQL, играющая ключевую роль в хранении и управлении информацией. Структура базы данных была оптимизирована для быстрого доступа и обработки информации, потому что для медицинского приложения время отклика имеет важное значение. PostgreSQL поддерживает транзакции и обеспечивает целостность данных, что также играет существенную роль в медицинских приложениях. Более того, она поддерживает хранение и обработку данных в формате JSON, что позволяет легко интегрировать неструктурированные данные. Это полезно для хранения дополнительных метаданных и результатов анализа, которые не вписываются в традиционные реляционные модели. В результате проведенного анализа качества веб-сервиса, созданного на Django, были оценены различные характеристики программного обеспечения, которые подтвердили высокие показатели производительности, надежности и удобства использования.

- 1. Среднее время отклика сервиса составило 200 миллисек. Этот результат обеспечивает пользователям мгновенный доступ к функционалу приложения, что значительно улучшает общее впечатление от работы с сервисом и снижает вероятность потери пользователей из-за задержек.
- Веб-сервис способен обрабатывать до 500 запросов в секунду. Это свидетельствует о его высокой производительности и готовности справляться с большим объемом трафика, что особенно важно в условиях пиковых нагрузок, например, при массовых обращениях пользователей.
- Покрытие разработанного программного кода веб-сервиса автоматизированными тестами составило 85 %, что говорит о высоком качестве кода и его надежности, так как значительная часть функционала проверяется перед развертыванием, тем самым минимизируется вероятность ошибок.
- 4. Время, необходимое для масштабирования ресурсов, составило 10 мин. Такой результат демонстрирует способность приложения быстро реагировать на изменения в нагрузке и гарантирует стабильную работу.

Выводы

Выполнена предобработка данных ЭКГ на основе датасета ECG5000, включающая нормализацию, балансировку и аугментацию данных, которые затем были использованы для обучения рекуррентной нейронной сети. Полученные высокие значения метрик качества *precision, recall* и *F1-score* указывают на то, что модель демонстрирует высокую степень точности в своих предсказаниях, что является критически важным с точки зрения потенциала использования современных технологий искусственного интеллекта для автоматизированной диагностики сердечных заболеваний. Тем не менее, для практического применения разработанной модели в клинических условиях требуется дальнейшее исследование и тестирование на более разнообразных и общирных наборах данных.

Квантизация обученной рекуррентной нейронной сети до 8 бит продемонстрировала значительное уменьшение объема памяти, необходимого для хранения весов модели, в четыре раза и позволила сократить время ответа модели за счет более эффективных целочисленных операций. Эти достижения делают модель более соответствующей развертыванию на устройствах с ограниченными ресурсами (мобильные телефоны и встроенные системы). Снижение потребления памяти не только повышает производительность приложений, но и обеспечивает возможность их использования в реальном времени, что критически важно для приложения медицинской диагностики.

Для удобства использования разработанного функционала по обнаружению аномалий в медицинских данных ЭКГ был реализован веб-сервис на основе фреймворка *Django*.

Библиографический список

- 1. **Xu, H.**, Wu, G., Zhai, E., Jin, X., Tu, L. Preference-Aware Light Graph Convolution Network for Social Recommendation. Electronics 2023, 12, 2397.
- 2. Alamr A., Artoli A. Unsupervised transformer-based anomaly detection in ECG signals. Algorithms. 2023. V. 16. № 3. Pp. 152.
- Ahmadi-Mobarakeh M., Mohammadzade H. ECG Classification Using DTW-Based Learnable Kernels in Deep Neural Networks. 2021 28th National and 6th International Iranian Conference on Biomedical Engineering (ICBME). IEEE, 2021. Pp. 90-94.
- 4. Sabata T., Holena M. Active Learning for LSTM-autoencoder-based Anomaly Detection in Electrocardiogram Readings . IAL@ PKDD/ECML. 2020. Pp. 72-77.
- 5. **Matias P.** et al. Robust Anomaly Detection in Time Series through Variational AutoEncoders and a Local Similarity Score. Biosignals. 2021. Pp. 91-102.
- 6. **Peter A. Flach**, Meelis Kull. Precision-Recall-Gain Curves: PR Analysis Done Right. Neural Information Processing Systems. 2015. Pp. 3-4.
- 7. **Y. Chen**, T. Zhang, H. Wang, Y. Zhang, Y. Xu. Towards Accurate and Efficient Neural Network Quantization. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2020. Pp. 1-12.
- 8. **Z. Wu**, Y. Wang, Y. Zhang, L. Wang, Y. Wang. Quantization of Deep Neural Networks: A Survey. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2018. Pp. 1-24.
- 9. **Z. Wu**, Y. Wang, Y. Zhang, L. Wang, Y. Wang. Quantization of Deep Neural Networks: A Survey. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2018. Pp. 1-24.
- 10. Antonio Melé. Django 3 By Example: Build powerful web applications from scratch. Packt Publishing. 2020. Pp. 1-400.
- 11. Adam Johnson. Django for APIs: Build web APIs with Python and Django. Independently published. 2018. Pp. 1-200.

Дата поступления в редакцию: 14.01.2025

Дата принятия к публикации: 29.04.2025

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.039.5

DOI 10.46960/1816-210X_2025_2_50 EDN CJQXJP

ВАЛИДАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ТОПЛИВНОГО КОМПАКТА ПРОГРАММЫ РАСНАР-ГАЗ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ГАЗОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

В.А. Болнов

ORCID: 0009-0007-0260-3453 e-mail: bolnov@okbm.nnov.ru AO «ОКБМ Африкантов» Нижний Новгород, Россия

Е.В. Богданова ORCID: **0009-0001-5550-7365** e-mail: **bogdanova@okbm.nnov.ru** AO «ОКБМ Африкантов» *Нижний Новгород, Россия*

С.А. Малкин ORCID: 0009-0005-9834-2926 e-mail: malkin@okbm.nnov.ru AO «ОКБМ Африкантов» *Нижний Новгород, Россия*

Д.М. Гришин ORCID: 0009-0000-3322-4818 e-mail: grishin_dm@okbm.nnov.ru AO «ОКБМ Африкантов» *Нижний Новгород, Россия*

Проведена валидация расчетной модели топливного компакта (ТК) программы для ЭВМ РАСНАР-ГАЗ, предназначенной для расчета нестационарных режимов в ядерных энергетических установках (ЯЭУ) с газовым теплоносителем. Для этого использованы экспериментальные данные реакторных испытаний шаровых твэлов высокотемпературного газового реактора (ВТГР) при импульсном режиме работы импульсного графитового реактора (ИГР). Показано, что возможно применение расчетной модели ТК в виде гомогенной смеси с эквивалентными параметрами теплоемкости, теплопроводности и плотности к гетерогенной структуре диспергированных в графитовой матрице частиц топливной композиции, формирующих ТК. В применяемой модели нестационарное уравнение теплопроводности твэла описывалось в цилиндрической геометрии. Валидация показала, что программа РАСНАР-ГАЗ с достаточной для инженерных расчетов точностью описывает изменение температур как в центре, так и снаружи ТК, а отклонения не превышают значений, указанных в аттестационном паспорте.

Ключевые слова: валидация, топливный компакт, шаровой твэл, РАСНАР-ГАЗ, гелий, гомогенная смесь, графитовая матрица, теплоемкость, теплопроводность, цилиндрическая геометрия, переходный процесс, динамика, расчетная модель.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Болнов, В.А. Валидация расчетной модели топливного компакта программы РАСНАР-ГАЗ для расчета динамики реакторной установки с газовым теплоносителем / В.А. Болнов, Е.В. Богданова, С.А. Малкин, Д.М. Гришин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 2. С. 50-58. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_50 EDN: CJQXJP

[©] Болнов В.А., Богданова Е.В., Малкин С.А., Гришин Д.М., 2025

VALIDATION OF THE RASNAR-GAS FUEL COMPACT COMPUTATIONAL MODEL FOR CALCULATING THE DYNAMICS OF REACTOR UNIT WITH GAS COOLANT

V.A. Bolnov

ORCID: 0009-0007-0260-3453 e-mail: bolnov@okbm.nnov.ru Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering Nizhny Novgorod, Russia

E.V. Bogdanova

ORCID: 0009-0001-5550-7365 e-mail: bogdanova@okbm.nnov.ru Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering Nizhny Novgorod, Russia

S.A. Malkin

ORCID: 0009-0005-9834-2926 e-mail: malkin@okbm.nnov.ru Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering Nizhny Novgorod, Russia

D.M. Grishin

ORCID: 0009-0000-3322-4818 e-mail: grishin_dm@okbm.nnov.ru Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article is devoted to the validation of a fuel compact computational model of the RASNAR-GAZ computer program. This program is designed to calculate non-stationary modes in nuclear power plants with a gas coolant. Experimental data from reactor tests of spherical fuel element of a high-temperature gas-cooled reactor (HTGR) in the pulsed mode of operation of a pulsed graphite reactor are used for this purpose. It is shown that it is possible to apply the computational model of the fuel compact in the form of a homogeneous mixture with equivalent parameters of heat capacity, thermal conductivity and density to the heterogeneous structure of fuel composition particles dispersed in a graphite matrix, forming fuel compacts. The non-stationary equation of thermal conductivity of a fuel element in the model used was described in cylindrical geometry. The validation showed that the RASNAR-GAZ program describes temperature changes both in the center and outside of the fuel compact with sufficient accuracy for engineering calculations, and the deviations do not exceed the values specified in the certification passport.

Key words: validation, fuel compact, spherical fuel element, RASNAR GAS, helium, homogeneous mixture, graphite matrix, heat capacity, thermal conductivity, cylindrical geometry, transient process, dynamics, computational model.

FOR CITATION: V.A. Bolnov, E.V. Bogdanova, S.A. Malkin, D.M. Grishin. Validation of the RASNAR-GAS fuel compact computational model for calculating the dynamics of reactor unit with gas coolant. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 2. Pp. 50-58. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_50 EDN: CJQXJP

В рамках Инвестиционной программы АО «Концерн Росэнергоатом» реализуется комплексный проект по разработке технологических решений для создания атомной энерготехнологической станции с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором и химико-технологической частью для производства водорода и водородсодержащих продуктов. В АО «ОКБМ Африкантов» разработана программа для ЭВМ РАСНАР-ГАЗ, предназначенная для расчета нестационарных режимов ядерных энергетических установках с газовым теплоносителем и обоснования безопасности. В соответствии с нормативной до-кументацией, она должна быть аттестована в НТЦ ЯРБ, а используемые в ней математические и расчетные модели верифицированы и валидированы на экспериментальных данных. Работа по валидации расчетного кода РАСНАР-ГАЗ осуществляется в рамках НИОКР,

проводимых АО «ОКБМ Африкантов» по заказу АО «Концерн Росэнергоатом». Представленные в настоящей статье результаты являются продолжением работ по валидации расчетного кода РАСНАР-ГАЗ [1].

Одним из основных процессов, требующих обязательной верификации и валидации, является теплопередача в твэлах. Она имеет непосредственное отношение к безопасности, поскольку характеризует состояние твэлов, по которому формируются ее критерии (целостность, отсутствие плавления топлива). Теплопередача в твэлах определяется мощностью и распределением энерговыделений по объему активной зоны, величиной газового зазора и температурой теплоносителя. Значение и динамика изменения температуры твэлов также определяет величину эффекта реактивности, а, следовательно, влияет на изменение нейтронной мощности. Конструктивно активные зоны газоохлаждаемых реакторов условно можно разделить на два типа. В первом из них микротвэлы (керны) прессуются в цилиндрических графитовых топливных компактах высотой 0,05 м и диаметром 0,0125 м. Топливные компакты (ТК) затем размещаются в шестигранных графитовых блоках с каналами под топливо, а также каналами для прохода теплоносителя и стержней управления и защиты. Из этих блоков набирается активная зона, которую называют призматической. Конструкцию второго типа активной зоны называют просто «шаровая засыпка». В этом варианте активной зоны микротвэлы размещаются в графитовых шарах диаметром 0.06 м.

В данной статье приводятся результаты валидации расчетной модели ТК, моделируемого в виде цилиндра с эквивалентными параметрами теплоемкости, теплопроводности и плотности.



Рис. 1. Гидравлическая схема расчетного канала, моделирующего твэл с оболочкой, контактирующей с теплоносителем внешней цилиндрической поверхностью:

V1 – объем, в котором задается температура на входе; V2 – объем, в котором задается давление на выходе

Fig. 1. Hydraulic diagram of the design channel simulating a fuel element with a shell in contact with the coolant with its outer cylindrical surface:

V1 – volume in which the inlet temperature is set; V2 – volume in which the outlet pressure is set

Для валидации распределения температуры в расчетной модели использовались экспериментальные данные, полученные в ходе проведения реакторных испытаний шаровых твэлов при импульсном нагружении на установке ИГР [2]. Реактор ИГР работает в импульсном режиме с большим интегральным потоком нейтронов. Средняя плотность потока нейтронов в импульсе от $4 \cdot 10^{15}$ до $8 \cdot 10^{15}$ нейтр/(см²·с) [3]. Реактивность вводится мгновенно, скачок реактивности определяет начальный период разгона, амплитуду и форму вспышки,

формирующую трапециевидный профиль энерговыделения во времени. Энерговыделение происходит равномерно по всему объему топлива в сердечнике шаровых твэлов.

Испытания проводились на пяти шаровых графитовых изделиях монолитного и сборного типа диаметром 0,06 м, помещенных в герметичную ампулу. Схема ампулы приведена на рис. 2. Ампула с твэлами прошла три реакторных испытания в импульсном режиме. Шар № 5 не имел топлива и был выточен из графита. Остальные образцы представляли собой макеты шаровых твэлов в виде сердечника с диспергированными в нем микротвэлами в виде мелких частиц диаметром 0,001-0,0011 м и графитовой оболочки. Сердечник получали прессованием смеси порошка графита с микротвэлами. Два шаровых твэла № 2 и № 4 первого типа были сборными из сердечника диаметром 0,035 м и оболочки толщиной 0,0125 м, выточенной из графита. Твэлы второго типа № 1 и № 3 были сформированы путем совместного прессования сердечника и оболочки по технологии изготовления монолитных изделий. Они имели больший диаметр 0,044 м, и меньшую толщину оболочки - 0,008 м. Содержание урана в твэлах первого типа – 0,0015 кг, второго типа – 0,001 кг, общая масса сердечника твэлов первого типа – 0,038 кг, второго типа – 0,076 кг. Концентрация *п* для твэлов первого типа – 9,6.107 част/м³, для второго – 3,2.107 част/м³. Твэлы первого типа, по сравнению со вторым, имели большую концентрацию топливных частиц и увеличенное энерговыделение в единице объема.

В качестве экспериментальных данных для валидации использовались показания термопар, установленных на твэле № 2 первого типа и в твэле № 3 второго типа. Места установки термопар BP-5/20 [4] показаны на рис. 2. Измерялась температура топливной композиции в сердечнике (T₂, T₄) и на поверхности оболочки твэла (T₁, T₃).



Рис. 2. Схема ампулы для проведения испытаний [2]:

1, 3 – твэлы второго типа, монолитные; 2, 4 – твэлы первого типа сборные; шар 5 из графита; 6 – стенка ампулы; 7, 8 – графитовые стаканы; 9, 10 – графитовые подстаканники и крышка; T_1, T_2, T_3, T_4 – места установки термопар

Fig. 2. Diagram of the ampoule for testing [2]:

 1, 3 – fuel elements of the second type, monolithic; 2, 4 – fuel elements of the first type, prefabricated; ball 5 made of graphite; 6 – ampoule wall; 7, 8 – graphite cups; 9, 10 – graphite cup holders and lid; T₁, T₂, T₃, T₄ – thermocouple installation locations

Для моделирования режимов в программе РАСНАР-ГАЗ использовалась расчетная схема (рис. 1). На входе в расчетный канал задавалась температура теплоносителя во время-

зависимом объеме V1, соответствующая температуре оболочки по показаниям термопар T_1 и T_3 для двух типов твэлов в начальный момент времени (рис. 2). На выходе из расчетного канала в объеме V2 задается давление, соответствующее рабочему давлению в ампуле с твэлами. На внешней поверхности цилиндрической оболочки выполняется граничное условие третьего рода:

$$\frac{\partial T}{\partial r^{\mathrm{p}}} = \alpha (T_{\mathrm{CT}} - T_{\mathrm{w}})$$

где λ_{cp} – коэффициент теплопроводности для графитовой оболочки; α – коэффициент теплоотдачи от графита к гелию; T_{cm} – температура внешней поверхности графитовой оболочки; T_{cm} – температура гелия в приграничном слое.

Каждый тип шарового твэла моделировался цилиндром с объемом топливной композиции, равным объему сердечника, и графитовой оболочкой в виде концентрического цилиндрического слоя. Модельный цилиндр представлялся в виде гомогенной смеси с эквивалентными параметрами теплоемкости, теплопроводности и плотности гетерогенной структуры диспергированных в графитовой матрице частиц топливной композиции. По высоте цилиндр разбивался на расчетные участки, а по радиусу – на три слоя: сердечник с топливом, графитовую оболочку и теплоноситель.

Для образцов топливного компакта первого и второго типов толщина цилиндрической оболочки выбиралась равной толщине графитового сферического слоя и составляла 0,0125 м и 0,008 м для первого и второго типов соответственно. Высота цилиндра топливного компакта в модели задавалась, исходя из равенства объемов шарового и цилиндрического топливных сердечников для обеспечения одинаковой выделяемой мощности в единице объема. Так, радиус цилиндрического сердечника принимался равным радиусу шарового сердечника: 0,0175 м для первого типа и 0,022 м – для второго, а эквивалентная высота составила 0,0233 м для первого типа и 0,0293 м – для второго. Для корректного учета теплообмена коэффициент теплоотдачи снижен, так как при одинаковом объеме площадь поверхности теплообмена оболочки с теплоносителем у цилиндра больше, чем у шара. Параметр $k \cdot F$ сохраняется. Расчетная схема показана на рис. 3.



Рис. 3. Расчетная схема твэла:

1 — оболочка из графита с толщиной, эквивалентной шаровому твэлу;

2 – сердечник с топливом (топливная композиция), разбитый на расчетные узлы по радиусу;

T1 – место установки датчика для измерения температуры в центре твэла;

Т2 – место установки датчика для измерения температуры на границе графитовой оболочки

Fig. 3. Computational model of the fuel element:

1 – graphite shell with a thickness equivalent to a spherical fuel element;

2 – core with fuel (fuel composition) divided into calculation units along the radius;

 T_1 – location of the sensor for measuring temperature in the center of the fuel element;

 T_2 – location of the sensor for measuring temperature at the boundary of the graphite shell

Для оболочки из графита плотность принималась одинаковой для обоих образцов и соответствует средней по температурному диапазону плотности графита 1740 кг/м³. Расчетное значение эквивалентной плотности для твэлов первого типа больше, чем для второго типа, что объясняется большей концентрации топливных частиц в сердечнике первого типа. Теплоемкость графитовой оболочки учитывает температурную зависимость и изменяется в диапазоне 0,4-2,1 кДж/(кг·К). Коэффициент теплопроводности для графитовой оболочки 0,25 кВт/(м·К) для обоих образцов. Теплоемкость сердечника твэла изменяется в диапазоне 2,0-2,9 кДж/(кг·К) и близка к теплоемкости графита, поскольку основной объем сердечника приходится на графитовую матрицу. Коэффициент теплопроводности для топливной смеси принимался в соответствии с [4].

Максимальная мощность для твэла № 2 составила 20,4 кВт. Мощность твэла возрастала от нуля до максимума за первые 5 сек, поддерживалась постоянной в течение следующих 45 сек и снижалась до нуля за последующие 20 сек – режим 1.

Максимальная мощность для твэла № 3 составила 22,1 кВт с ростом от нуля до максимума за первые 7 сек, с поддержанием постоянной мощности в течение следующих 23 сек и сбросом до нуля за последующие 10 сек – режим 2.

На рис. 4-5 показано изменение температуры от времени в центре модельного цилиндра и на внешней границе оболочки.



Рис. 4. Температура для первого типа образцов твэлов: 1 – температура в центре цилиндра, расчет; 2 – температура в центре твэла, эксперимент; 3 – температура на внешней границе оболочки, эксперимент; 4 – температура на внешней границе оболочки, расчет

Fig. 4. Temperature for the first type of fuel element samples:

1 – temperature in the center of the cylinder, calculation; 2 – temperature in the center of the fuel element, experiment; 3 – temperature at the outer boundary of the shell, experiment;
4 – temperature at the outer boundary of the shell, calculation

Отклонение расчетных значений от экспериментальных рассчитывалось по формуле:

$$\varepsilon = \frac{|T_{i\,exp} - T_{i\,calc}|_{max}}{T_{max} - T_{min}} \cdot 100 \%$$

где $T_{i\ exp}$ – *i*-точка экспериментальных данных, в которой достигается максимальное отклонение от расчетного значения температуры в данный момент времени; $T_{i\ calc}$ – *i*-точка расчетных данных, в которой достигается максимальное отклонение от экспериментального значения температуры в данный момент времени; T_{max} – максимальное значение температуры во всем диапазоне изменения экспериментального параметра; T_{min} – минимальное значение температуры во всем диапазоне изменения экспериментального параметра.



Рис. 5. Температура для второго типа образцов твэлов: 1 – температура в центре цилиндра, расчет; 2 – температура в центре твэла, эксперимент; 3 – температура на внешней границе оболочки, расчет; 4 – температура на внешней границе оболочки, эксперимент

Fig. 5. Temperature for the second type of fuel element samples:

1 – temperature in the center of the cylinder, calculation; 2 – temperature in the center of the fuel element, experiment; 3 – temperature at the outer boundary of the shell, calculation;
4 – temperature at the outer boundary of the shell, experiment

Для эксперимента с первым и вторым типами твэлов относительное отклонение температуры в центре твэла № 3 составляет 8,6 %, и 6,1 % для твэла № 2. Для температуры на внешней границе оболочки относительные отклонения равны 5,2 % для твэла № 3 и 6,3 % для твэла № 2 соответственно. Данные отклонения не превышают 20 % – значения максимального относительного отклонения результатов расчетов по программе для ЭВМ РАСНАР-ГАЗ, заявленного в аттестационном паспорте для температуры топливной матрицы и графита.

Для оценки неопределенностей полученных результатов расчета дополнительно были проведены многовариантные исследования (по методу Уилкса) с варьированием параметров, влияющих на температуру топливных компактов. Всего было принято 100 численных экспериментов, в которых менялись такие параметры, как мощность тепловыделений, размеры моделируемого цилиндра, а также теплофизические свойства.

Из этих расчетных вариантов были получены максимальные и минимальные выборочные значения температур в центре топлива и на внешней границе оболочки, являющиеся оценкой верхней и нижней границ диапазона неопределенности расчета. Результаты показали, что экспериментальные данные лежат в границах трубки неопределенности (рис. 6-7).



Рис. 6. Оценка значений температур, с учетом неопределенностей параметров:

1 – оценка верхней границы температуры на внешней границе оболочки, расчет; 2 – температура на внешней границе оболочки, эксперимент;

3 – оценка нижней границы температуры на внешней границе оболочки, расчет

Fig. 6. Estimation of temperature values with parameter uncertainties

1 - estimation of the upper boundary of temperature at the outer boundary of the shell, calculation;<math>2 - temperature at the outer boundary of the shell, experiment;

3 – estimation of the lower boundary of temperature at the outer boundary of the shell, calculation





1 – оценка верхней границы температуры в центре ТК, расчет;

2 – температура в центре ТК, эксперимент;

3 – оценка нижней границы температуры в центре ТК, расчет

Fig. 7. Estimation of temperature values, with parameter uncertainties:

1 – estimate of the upper limit of temperature in the center of the fuel compact, calculation; 2 – temperature in the center of the fuel compact, experiment;

3 – estimate of the lower limit of temperature in the center of the fuel compact, calculation

Заключение

Валидирована модель топлива для РУ ВТГР в программе для ЭВМ РАСНАР-ГАЗ, описывающая динамику температур в шаровых твэлах двух типов, характеризуемых соответствующими геометрическими параметрами и теплообменными свойствами в рамках цилиндрической модели.

Выполнено сравнение результатов расчета температурных состояний с экспериментальными данными в режимах импульсного нагружения твэлов. Расчеты показали хорошее соответствие с экспериментальными данными с отклонениями, не превышающими 20 % от динамического диапазона изменения температур в эксперименте.

Работа по валидации расчетного кода РАСНАР-ГАЗ осуществляется в рамках НИОКР, проводимых АО «ОКБМ Африкантов» по заказу АО «Концерн Росэнергоатом».

Библиографический список

- 1. Богданова, Е.В. Результаты валидации математической модели парогенератора программы РАСНАР-ГАЗ для расчета динамики реакторной установки с газовым теплоносителем / Е.В. Богданова, В.А. Болнов, С.С. Григорьев, А.С. Емелина, С.А. Малкин, А.С. Ушатиков // Атомная энергия. 2024. Т. 137. № 1-2.
- 2. Еремеев, В.С. Методика реакторных испытаний шаровых твэлов ВТГР при импульсном нагружении / В.С. Еремеев, А.С. Черников, В.Я. Иванов [и др.] // Атомная энергия. 1991. Т. 71. Вып. 3. С. 221-226.
- 3. Еремеев, В.С. Повреждаемость шаровых твэлов ВТГР при кратковременном высоко-температурном воздействии в условиях реактора ИГР / В.С. Еремеев, А.С. Черников, С.П. Кравцов [и др.] // Атомная энергия. 1992. Т. 72 Вып. 3. С. 298-301.
- 4. Черников, А.С. Топливо и твэлы ВТГР // Атомная энергия. 1988. Т. 65. Вып. 1. С. 32-38.

Дата поступления в редакцию: 28.03.2025

Дата принятия к публикации: 07.05.2025 УДК **621.039.53**

DOI 10.46960/1816-210X_2025_2_59 EDN HIZZNZ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ЦЕЛОСТНОСТИ КОНТЕЙНЕРОВ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Д.А. Лапшин ORCID: 0009-0001-2801-1102 e-mail: lapshin_da@okbm.nnov.ru AO «ОКБМ Африкантов» Нижний Новгород, Россия

Представлен анализ напряженно-деформированного состояния контейнера для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива при динамических воздействиях высокой интенсивности по разработанной методологии, для реализации которой были решены задачи, связанные с созданием обоснованных полномасштабных расчетных конечно-элементных моделей с отработкой всех геометрических особенностей проектируемого оборудования. Далее были исследованы динамические характеристики конструкционных материалов контейнера, на их основе верифицированы математические модели поведения этих материалов с учетом различных температур и скоростей деформирования. Разработаны сценарии граничных условий с реализацией в них комплексных механических воздействий техногенного характера, отвечающих всем требованиям нормативных документов. Особенность таких граничных условий заключается в том, что деформированная конструкция в результате одного из реализованных гипотетических событий передается как исходная в последующее событие для анализа целого ряда воздействий, которые могут происходить в течение всего эксплуатационного периода данного изделия.

Ключевые слова: транспортировка ядерного топлива, цифровые двойники, динамические воздействия высокой интенсивности, комплексный подход, верификация, сбалансированный топливный цикл.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Лапшин, Д.А. Разработка методологии для обоснования прочности и целостности контейнеров хранения и транспортировки отработавшего ядерного топлива // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 2. С. 59-76. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_59 EDN: HIZZNZ

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY TO JUSTIFY STRENGTH AND INTEGRITY OF CONTAINERS FOR SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE AND TRANSPORTATION

D.A. Lapshin

ORCID: 0009-0001-2801-1102 e-mail: lapshin_da@okbm.nnov.ru Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents the stress-strain state analysis of a container for a spent nuclear fuel storage and transportation under high-intensity dynamic impacts using the developed methodology. Justified full-scale finite element models considering all geometric features of the designed equipment are developed for the implementation of this methodology. The dynamic characteristics of the structural materials used in the container design are investigated and the mathematical models of these materials behavior were verified based on these results taking into account different temperatures and strain rates. Scenarios of boundary conditions are developed with introducing complex man-caused mechanical impacts that meet all the regulatory documents' requirements. The distinguished feature of such boundary conditions is that the deformed structure caused by one of the realized hypothetical events is transferred to the subsequent event as an initial one to further analyze a number of impacts that may occur during the entire operational period of this product.

[©] Лапшин Д.А., 2025

Key words: nuclear fuel transportation, digital twins, high intensity dynamic impacts, integrated approach, verification, balanced fuel cycle.

FOR CITATION: D.A. Lapshin. Development of a methodology to justify strength and integrity of containers for spent nuclear fuel storage and transportation. Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev. 2025. № 2. Pp. 59-76. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_59 EDN: HIZZNZ

Введение

Важное место на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) занимают системы хранения и транспортирования отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО), которые реализуют завершенный сбалансированный топливный цикл. В силу серьезных радиационных последствий из-за аварийных ситуаций, связанных с падением оборудования при проведении транспортно-технологический операций (ТТО), данные события должны быть рассмотрены как проектные и учтены при разработке конструкций, отвечающих за бесперебойный функционал данных объектов.

В настоящее время в России, в силу особенностей логистики той или иной атомной электростанции (АЭС), можно говорить либо о недостаточности, либо о полном отсутствии сертифицированных контейнеров отечественной разработки, которые входили бы в состав транспортных упаковочных комплектов (ТУК), обеспечивали ядерную и радиационную безопасность, были бы предназначены для транспортировки и хранения ОЯТ и позволяли бы безопасно завершить топливный цикл. Вследствие этого начинает возникать профицит ОЯТ, которое в недалеком будущем необходимо вывозить в места его захоронения. Крайне актуальной становится задача по разработке и созданию таких контейнеров.

В конечном виде ТУК к моменту его эксплуатации является дорогостоящим изделием со сложным конструктивным исполнением. Он должен соответствовать повышенным требованиям по следующим параметрам: динамической прочности при воздействии ударных нагрузок высокой интенсивности; геометрической совместимости со всеми объектами, встречающимися на транспортно-технологическом тракте за весь жизненный цикл; демпфирующим способностям, эффективно снижающим внешние динамические перегрузки природного и техногенного характера.

В процессе транспортировки и проведении ТТО должна исключаться как возможность выпадения ядерного топлива из контейнера, так и любое относительное смещение в нем ОЯТ [1-3]. Выполнение подобных требований подразумевает соответствие конструкции ТУК условиям динамической прочности, сохранения целостности (герметичности) и отсутствия недопустимого формоизменения. Упомянутые выше требования к ТУК предусматривают подтверждение его показателей безопасности путем проведения испытаний на ударные воздействия по регламентируемым нормативным требованиям, в частности, при падении ТУК на жесткую плиту с установленной высоты в различных положениях, на металлический штырь и т. п. [1-4]. Натурные испытания изделия и его отдельных элементов в процессе проектирования затруднены, прежде всего, в силу их значительной стоимости и целесообразны на завершающей стадии, при получении сертификата на изделие. В связи с этим, актуально численное исследование в процессе разработки конструкции ТУК с целью выявления и устранения конструктивных элементов, не удовлетворяющих условиям прочности при эксплуатационных нагрузках. Применение имеющихся методологий бывает недостаточным для воссоздания всех исходных событий, связанных с механическими воздействиями на проектируемую конструкцию при обосновании ее прочности [5].

Данные проблемы могут быть решены путем применения новых подходов к математическим исследованиям на базе создания подробных цифровых двойников конструкции, позволяющих в полной мере учесть как ее конструктивные особенности, так и все возможные виды воздействий, через алгоритмы, заложенные в граничных условиях расчетных моделей. Определяющими нагрузками для ТУК, являются ударные воздействия высокой интенсивности вследствие его падений с различных высот и в различных положениях. Актуальной становится разработка и внедрение методологии, позволяющей на стадии проектирования проводить более полный анализ возможных формоизменений конструкции с учетом фактических свойств материалов, используемых в конструкции, по результатам всего заложенного в цифровую модель комплекса механических воздействий. Такие подходы дадут возможность не только сформировать конечный облик изделия, но и подготовить в максимальной степени достоверные исходные данные для дальнейшего обоснования ядерной и радиационной безопасности конструкции реального контейнера. Процедура транспортировки и хранения каждой отработавшей тепловыделяющей сборки (ОТВС) является дорогостоящей, а создание более вместительных сертифицированных упаковок для ОТВС могло бы снизить себестоимость утилизации.

В настоящее время в АО «ОКБМ Африкантов» ведется разработка конструкции универсального контейнера хранения повышенной вместимости (УКХ ПВ, относящегося к новому поколению ТУК), отвечающего всем требованиям нормативной документации [1-4], предназначенного как для транспортировки ОТВС и РАО с АЭС типа ВВЭР 1200, так и для их длительного хранения.

В основу проектирования УКХ ПВ лег полномасштабный математический анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции при нормальных и аварийных условиях транспортировки с учетом всего спектра воздействий в едином сценарии.

При разработке методологии были решены следующие задачи.

1. Разработаны обоснованные полномасштабные цифровые геометрические модели с использованием верифицированных и аттестованных программных средств.

2. Экспериментально исследованы статические и динамические характеристики конструкционных материалов, используемых при проектировании УКХ ПВ.

3. Идентифицированы и адаптированы математические модели поведения исследованных конструкционных материалов на основе верификации результатов расчетов и экспериментальных данных для адекватного описания механики деформируемых твердых тел.

4. Разработаны сценарии граничных условий с реализацией в них комплексных механических воздействий природного и техногенного характера, отвечающих всем требованиям нормативных документов.

5. Проведено многоитерационное численное исследование прочности и целостности УКХ ПВ и ОТВС на многопроцессорных ЭВМ с использованием современных программных комплексов (ПК);

6. По результатам численных исследований определены элементы конструкции, не удовлетворяющие либо прочностным, либо демпфирующим способностям разрабатываемого изделия, и разработаны мероприятия по их доработке.

7. Разработаны исходные данные для обоснования разрабатываемого изделия по ядерной и радиационной безопасности на основе проведенного численного анализа УКХ ПВ и его внутреннего содержимого.

Методология исследования

Разработанная методология заключается в создании цифровых двойников проектируемого оборудования, которые не только повторяют все геометрические особенности, но и имитируют все предполагаемые исходные события, которые могут произойти с данным оборудованием в процессе эксплуатации, с изменяющимися характеристиками конструкционных материалов в процессе реализации поставленной задачи. За счет создания подробных математических двойников, способных воссоздать в цифровом пространстве цепочку событий, труднореализуемых в натурных испытаниях, но гипотетически возможных в процессе эксплуатации изделия, методом последовательных итераций, передавая измененную геометрию двойника из одной задачи в другую, определяется конечное состояние объекта и выявляются требующие доработки конструктивные элементы. Комплексное численное моделирование механических воздействий, согласно нормативным документам, состоит из трех различных видов сбрасывания в каждом из критических положений ориентации конструкции при соударении, обоснованных с точки зрения максимального нагружения.

1. При первом виде сбрасывания образец должен упасть на плоскую мишень так, чтобы он получил максимальное повреждение, а высота падения, измеряемая от самой нижней точки образца до верхней поверхности мишени, должна составлять 0,3 м. Реализация данного события может произойти при проведении ТТО в условиях нормальной перевозки.

2. При втором виде сбрасывания образец должен упасть на плоскую мишень, на то же самое пятно контакта, а высота падения должна составлять 9,0 м. Реализация данного события может произойти при проведении ТТО в условиях аварийной перевозки.

3. При третьем виде сбрасывания образец должен упасть на штырь, жестко закрепленный в вертикальном положении на мишени так, чтобы образец получил максимальные повреждения в пятне контакта, деформированном по результатам двух предыдущих сбрасываний, либо в самом уязвимом месте конструкции на данный вариант ориентации конструкции при соударении. Высота падения составлять 1,0 м.

Для обоснования прочности и целостности разрабатываемого УКХ ПВ, при ударных нагрузках высокой интенсивности, использована схема метода конечного элемента (КЭ) [6, 7], реализованная в рамках вычислительного комплекса ANSYS/LS-DYNA [8, 9] (лицензия № D334623 от 02.06.2005).

Для оценки динамической прочности УКХ ПВ и транспортируемой ОТВС, в качестве критерия состояния принята относительная деформация. Условие прочности конструкции имеет вид:

$$\mathcal{E} \leq \mathcal{E}_{nped}$$

где ε – интенсивность пластической деформации, ε_{npeo} – деформация разрушения, определяемая в испытаниях на растяжение цилиндрического образца по относительному сужению Z^T его поперечного сечения в месте разрыва.

Деформация разрушения определяется по формуле [10]:

$$\varepsilon_{nned} = \ln \left[\frac{1}{(1-0,01 \cdot Z^T)} \right].$$

Поскольку образование шейки в цилиндрическом образце характеризуется объемным НДС для определения ε_{nped} , применяется экспериментально-расчетный подход, основанный на комплексном использовании натурных экспериментов и компьютерного моделирования.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается: теоретическими и экспериментальными данными по упругопластическому деформированию многокомпонентных конструкций в условиях ударных нагрузок; экспериментальным исследованием динамических свойств используемых материалов с учетом различных скоростей деформаций и температур с последующей адаптацией и верификацией их математических моделей; использованием верифицированных и аттестованных современных высокопроизводительных ПК.

Разработка расчетных геометрических моделей

Для обоснования подробной расчетной КЭ модели УКХ ПВ и ОТВС с учетом всех конструктивных особенностей был решен ряд динамических задач как для простых образцов, так и для сложных многокомпонентных конструкций с целью верификации результатов расчетов с результатами аналитических решений и экспериментальных исследований.

Решение рассмотренных задач проводилось в упругой и упругопластической постановках с использованием различных конструкционных материалов.

В качестве одного из примеров верификации на конструкции со сложной геометрией, с учетом всех геометрических особенностей и большого количества контактных пар, было проведено численное и экспериментальное исследование ударного деформирования макета сборок стальной защиты (рис. 1) активной зоны реактора БН-800 (далее – макеты ССЗ).



Рис. 1. Макет и расчетная модель ССЗ 927М.04.000 реактора БН-800 Fig. 1. The BN-800 reactor's 927M.04.000 Steel Shield Subassemblies (SSSA) test sample and computational model

Натурные эксперименты выполнены на базе экспериментальной лаборатории АО «ОКБМ Африкантов». Испытания на воздействие продольных ударных нагрузок проводились на копре свободного падения СТ-675 (копер К-4000). Измерения деформаций, возникающих в макетах ССЗ при воздействии продольных ударных нагрузок, проводили методом тензометрии с использованием тензорезисторов типа FLA-5-11 и статодинамического информационно-измерительного комплекса MGCplus. Для оценки ускорений использовалась измерительная система: акселерометры типа 4339, измерительно-вычислительный комплекс MIC-200 с усилителем заряда ME-908. Высота падения варьировалась в интервале от 100 до 1500 мм. В процессе испытаний фиксировались деформации и ускорения, производился визуальный осмотр макетов. В табл. 1, 2 сопоставляются результаты расчетов и испытаний для макета ССЗ.

Таблица 1.

Напряжения в макете ССЗ, усредненные по сечению А-А

Table 1.

Stresses in the SSSA test sample averaged over section A-A

Высота падения, мм	100	200	300	400	500	1000	1500
Эксперимент	-72	-95	-129	-164	-225	-237	-410
Расчет	-79	-100	-140	-176	-230	-259	-383

Таблица 2.

Ускорения а (g) макета ССЗ, усредненные по сечению Б-Б

Table 2.

Accelerations a (g) of the SSSA test sample averaged over section B-B

Высота падения, мм	100	200	300	400	500	1000	1500
Эксперимент	1134	1686	1980	2448	2696	3558	1648
Расчет	1132	1537	2012	2457	2723	3472	1562

В процессе серии предварительных тестовых расчетов была использована последовательность КЭ сеток с различной густотой и уменьшающимися шагами по размеру ячейки. При этом с уменьшением шага было обеспечено увеличение частоты узлов сетки в подобластях с наибольшими градиентами деформаций. Анализ результатов, полученных при различных вариантах размера элементов сетки, показал, что при уменьшении выбранного размера параметры контроля сходимости остаются в пределах интервала заданной допустимой погрешности.

Из сопоставления видно, что осевые напряжения и ускорения, определенные экспериментально и численно, качественно и количественно удовлетворительно совпадают (их расхождение не превышает 10 %). По результатам верификации результатов сложной модели макета ССЗ 927М.04.000 было сформировано представление о размерах и частоте КЭ сетки, отработано моделирование резьбовых и сварных соединений, различных концентраторов, взаимодействие контактных пар с разными характеристиками материалов.

Натурный эксперимент, подтверждающий работоспособность и эффективность демпфирующего устройства со скоростями соударений, присутствующих в эксплуатируемом изделии со значительными пластическими деформациями, был проведен на экспериментальной базе АО «ОКБМ Африкантов». Он был оцифрован в виде 3-D модели и граничных условий, имитирующих реальное нагружение образца. Верификация, проведенная по замерам остаточной формы после ударного воздействия (рис. 2), показала удовлетворительную сходимость (табл. 3) с разницей результатов, не превышающей 2 %.



Рис. 2. Сравнение остаточной формы демпфера, полученной по результатам эксперимента и расчета

Fig. 2. Comparison of the damper residual shape obtained by experiment and calculation

Таблица 3. Сравнение результатов расчета с результатами эксперимента Table 3.

Comparison of calculation and experimental results

Параметр	Эксперимент	Расчет	Расхождение
Ширина зуба – Δх, мм	25,56	25,11	1,8 %
Высота зуба – ∆h, мм	11,50	11,43	0,6 %
Высота демпфера – ∆l, мм	18,11	17,81	1,7 %

Спектр выбранных верификационных примеров позволил создать подробные модели УКХ ПВ и ОТВС, учитывая сложное конструктивное исполнение и контактную нелинейность их составных частей. Построение расчетных моделей, предназначенных для анализа падений УКХ ПВ в различных положениях, осуществлено в соответствии с принципами современной САD/САЕ технологии. Геометрические 3D-модели УКХ ПВ и ОТВС с различными обоснованными допущениями разработаны в среде ANSYS/WORKBENCH (рис. 3). Расчетная модель УКХ ПВ состоит примерно из 3,7 млн КЭ, расчетная модель ОТВС – из 4,1 млн КЭ. Каждая из составляющих данных моделей задана отдельными компонентами с индивидуальными характеристиками конструкционных материалов, отображающими реальные свойства. Контактный алгоритм подобран таким образом, чтобы учитывать взаимосвязи не только сопряженных частей конструкции, но и формоизменение численной модели, когда отдельные области одного тела начинают взаимодействовать между собой, что крайне актуально при значительных деформациях.

Размер шага сброса данных по НДС расчетных моделей в процессе соударения для формирования файлов в постпроцессоре подобран с такой частотой, чтобы происходило не менее 1-2 сбросов при прохождении ударной волны по конструкции в каждом из направлений, распространяемой со скоростями с учетом используемых материалов.

Разработка математических моделей поведения конструкционных материалов

Одним из наиболее важных этапов численного моделирования поведения конструкций транспортных контейнеров при динамических воздействиях с высокими перегрузками является применение математических моделей материалов, адекватно описывающих процессы упругопластического деформирования различных конструктивных элементов с использованием фактических механических характеристик в зависимости от скорости деформации и температуры.

Основной корпус с наибольшей металлоемкостью из всей конструкции, отвечающий за герметичность внутреннего содержимого, выполнен из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ). Крышки, клапаны, демпферы и корпус нейтронной защиты, отвечающие за герметичность и демпфирующие способности изделия, изготовлены из стали 08Х18Н10Т. Крепежные элементы УКХ ПВ, отвечающие за герметичность всех разъемных соединений в УКХ ПВ, в первую очередь, за основной разъем, изготовлены из стали 20Х13.

Актуальными становятся задачи по получению фактических диаграмм деформирования экспериментальным методом, идентификации моделей поведения материалов путем верификации расчетных и экспериментальных данных при различных механизмах деформирования и адаптации этих моделей для условий, в которых будет эксплуатироваться проектируемое изделие.



Рис. 3. Расчетные модели УКХ ПВ и ОТВС Fig. 3. Extended-Capacity Packing Storage Set (ECPSS) and Spent Fuel Assembly (SFA) computational models

Для определения механических характеристик перечисленных материалов при высоких скоростях нагружения использовались стержни Гопкинсона с различными разрезами по схеме Николаса и методу Кольского [11-14], реализованному на экспериментальной установке, для испытаний при растяжении-сжатии (рис. 4).



Рис. 4. Схема экспериментальной установки для испытаний материалов Fig. 4. Schematic diagram of experimental facility for materials testing

В результате получены диаграммы деформирования при различных режимах нагружения. По ним определены пределы прочности и их зависимость от скоростей деформаций и температуры (рис. 5). Данные исследования подробно рассмотрены в трудах [15, 16].



Рис. 5. Диаграммы деформирования, полученные экспериментально для материалов ВЧШГ, 08X18H10T и 20X13 Fig. 5. Deformation diagrams obtained experimentally for high-strength cast iron with spheroidal graphite, 08Cr18Ni10Ti and 20Cr13

Для анализа изменения прочности в широком диапазоне скоростей деформации сопоставлены результаты статических и динамических экспериментов. Механические характеристики конструкционных материалов (диаграммы деформирования, пределы текучести, пределы прочности, модуль упрочнения, предельные характеристики пластичности и т.д.) определены по результатам статических и динамических испытаний образцов при сжатии и растяжении, также получены параметры модели пластичности Джонсона-Кука [17]. Отмечено, что исследованные стали имеют различную чувствительность механического поведения к скорости деформации и температуре. Так, динамическая диаграмма деформирования, соответствующая скорости деформаций ~ 10^3 с⁻¹, для ВЧШГ выше статической кривой на 60 %, для стали 20Х13 – на 33 %, а для стали 08Х18Н10Т – на 8 %. В условиях повышенных температур (до 350 °C) пределы текучести уменьшились: для ВЧШГ – на 33 %; для стали 20Х13 – на 23 %; для стали 08Х18Н10Т – на 20 %.

Динамические характеристики ВЧШГ были исследованы впервые.

Наибольшая актуальность таких моделей имеет место для элементов конструкции, испытывающих деформации, близкие к предельным значениям (демпферы, корпус нейтронной защиты и крепеж) и изготовленные из стали 08Х18Н10Т и 20Х13. Консерватизм с ис-

пользованием минимальных механических характеристик материала для демпфирующих элементов не уместен, ввиду получения слишком «мягкого» демпфера. С целью адаптации модели пластичности Джонсона-Кука (рис. 6) под ударные механические воздействия высокой степени интенсивности для сталей 08Х18Н10Т и 20Х13 были использованы эксперименты на высокоскоростное внедрение инденторов со сферической и конической головными частями, а также на динамическое сжатие цилиндрического образца в виде таблетки.

Результаты верификации модели деформирования показали хорошее соответствие данных натурных испытаний и численного моделирования как по остаточным формам образцов, так и по временным характеристикам динамики процесса пластического деформирования – их расхождение не превысило 10 %. Данные подробно изложены в [16].



Рис. 6. Экспериментально определенная поверхность зависимости напряжения течения от пластической деформации и скорости деформации

Fig. 6. Surface of flow stress determined experimentally as a function of plastic strain and strain rate

Динамические характеристики материалов, из которых изготовлены элементы рассматриваемой в данной работе ОТВС, не были исследованы. Ввиду того, что ОТВС находятся внутри контейнера, высоких скоростей деформирования элементов ОТВС не ожидается. В связи с этим для построения расчетной модели применялись статические характеристики материалов с использованием билинейной модели упругопластического деформирования с линейным изотропным упрочнением. Свойства материалов, применяемых в ОТВС, определялись с учетом влияния доз радиационного воздействия для каждого конкретного элемента [18]. Совокупность полученных на образцах экспериментальных данных, идентифицированных и верифицированных математических моделей (в виде определяющих соотношений теории течений), свидетельствует о целесообразности применения данных моделей для расчетного анализа НДС транспортных контейнеров и их внутреннего содержимого в условиях динамических воздействий высокой интенсивности.

Разработка граничных условий для цифровых двойников

Для анализа НДС УКХ ПВ и ОТВС при комплексном воздействии использовалась КЭ модели с наложением на них различных параметров исходных событий в виде граничных условий. Все варианты комплексных воздействий с приложенными граничными условиями к расчетным моделям, показаны на рис. 7.1 и 7.2.



Рис. 7.1. Расчетные варианты комплексных падений УКХ ПВ (лист 1) Fig. 7.1. Calculated options of ECPSS complex falls (sheet 1)



Рис. 7.2. Расчетные варианты комплексных падений УКХ ПВ (лист 2) Fig. 7.2. Calculated options of ECPSS complex falls (sheet 2)

Варианты падений расчетной модели УКХ ПВ с помещенной в него полноценной расчетной моделью ОТВС вместо одного из макетов показаны на рис. 8.



а) вертикально на дно с подробной моделью ОТВС

падение с 9,0 м

б) горизонтально на КНЗ с подробной моделью ОТВС



падение с 9,0 м

Рис. 8. Расчетные варианты падения УКХ ПВ с подробной моделью ОТВС Fig. 8. Calculated options of ECPSS fall with a detailed SFA model

В соответствии с нормативными документами и разработанной методологией испытания на аварийные условия, перевозки должны выполняться после испытаний на нормальные условия и в численном исследовании выполняться комплексно в единой задаче. Соответственно, падение УКХ ПВ должно проводиться в последовательности: 0,3 м \rightarrow 9,0 м \rightarrow 1,0 м на штырь. При рассмотрении комплексных воздействий для каждого последующего этапа в качестве начального состояния УКХ ПВ принимается деформированное состояние, полученное от предыдущего этапа.

В качестве параметров исходных событий рассматривалось следующие варианты комплексных воздействий УКХ ПВ в соответствии с нормативными требованиями:

- вертикальное падение на дно с высоты $0,3 \text{ м} \rightarrow 9,0 \text{ м} \rightarrow 1,0 \text{ м}$ на штырь;
- падение под углом на дно с высоты $0,3 \text{ м} \rightarrow 9,0 \text{ м} \rightarrow 1,0 \text{ м}$ на штырь;
- падение горизонтально на разъем КНЗ с $0,3 \text{ м} \rightarrow 9,0 \text{ м} \rightarrow 1,0 \text{ м}$ на штырь;
- падение горизонтально на разъем КНЗ с высоты 0,3 м → 9,0 м → 1,0 м цапфой на штырь;
- падение горизонтально на КНЗ с высоты $0,3 \text{ м} \rightarrow 9,0 \text{ м} \rightarrow 1,0 \text{ м}$ на штырь;
- падение под углом на крышку с высоты $0,3 \text{ м} \rightarrow 9,0 \text{ м} \rightarrow 1,0 \text{ м}$ на штырь;
- вертикальное падение на крышку (в место расположения клапана) с высоты 0,3 м → 9,0 м → 1,0 м на штырь.

Каждый вариант падения обоснован с точки зрения наихудших последствий либо для самого УКХ ПВ, либо для его внутреннего содержимого.

Также было рассмотрено падение УКХ ПВ с помещенной подробной моделью ОТВС вместо одного из макетов с высоты 9,0 м на жесткое основание, с учетом облученных характеристик материалов сборки, в положениях, создающих максимальные перегрузки на ОТВС. На момент моделирования броска с 9,0 м УКХ ПВ находился в преднапряженном состоянии после падения с 0,3 м.

Последовательность падений 0,3 м \rightarrow 9,0 м \rightarrow 1,0 м на штырь при комплексных воздействиях выбрана таким образом, чтобы нанести максимальные повреждения конструкции УКХ ПВ, так как локальное воздействие штыря при соударении с деформированной конструкцией оказывает на нее большее влияние, чем воздействия, совершенные в последовательности 0,3 м \rightarrow 1,0 м на штырь \rightarrow 9,0 м.

Анализ напряженно-деформированного состояния УКХ ПВ и ОТВС

По разработанной методологии проведено численное исследование НДС УКХ ПВ (рис. 9), и обоснована целостность ОТВС (рис. 10) в соответствии требованиями нормативных документов. В рассмотренных вариантах падения с высоты 0,3 м при нормальных условиях перевозки УКХ ПВ удовлетворяет условиям динамической прочности, сохраняя свою целостность и исключая выход радиоактивного содержимого наружу. Незначительные изменения геометрии демпферов (для случаев с вертикальными падениями и падениями под углом) и локальные помятости ребер КНЗ (для случая с горизонтальным падением) подразумевают дальнейшую эксплуатацию УКХ ПВ.

Для вариантов падений с высоты 9,0 м и 1,0 м на штырь при аварийных условиях перевозки УКХ ПВ удовлетворяет условиям динамической прочности, сохраняя свою целостность и исключая выход радиоактивного содержимого наружу. Пластические деформации в конструктивных элементах, создающих герметичный контур, не достигают придельных значений; сквозного разрушения не происходит.

При анализе НДС подробной модели ОТВС со смоделированным топливом в максимально нагруженных твэлах показано, что все элементы ОТВС удовлетворяют условиям динамической прочности, сохраняя свою целостность и исключая выход радиоактивного содержимого наружу. Разрушения твэлов не ожидается.

В результате рассмотренных серий последовательных падений, выполненных по разработанной методологии, полученные изменения геометрии каждого из конструктивных элементов позволили сформировать исходные данные для дальнейшего обоснования ядерной и радиационной безопасности УКХ ПВ.


Рис. 9. Напряженно-деформированное состояние УКХ ПВ с помещенной моделью ОТВС, при вертикальном падении на дно

Fig. 9. Stress-strain state of the ECPSS with the SFA model inside at vertical fall to the bottom



Рис. 10. Напряженно-деформированное состояние ОТВС при горизонтальном падении Fig. 10. Stress-strain state of the SFA at horizontal fall



Рис. 11. Общий вид ТУК, проектируемых в АО «ОКБМ Африкантов» Fig. 11. General view of the transportation packaging sets designed at OKBM Afrikantov

Заключение

Проведено подробное численное исследование НДС УКХ ПВ, которое легло в основу формирования конечного облика конструкции. Обоснована целостность ОТВС в составе УКХ ПВ при падениях в различных положениях. Данные исследования стали возможными благодаря разработанной методологии, учитывающей геометрические особенности конструкций, фактические характеристики используемых материалов и заложенные граничные условия, включающие в себя целый ряд исходных событий в едином сценарии. Созданные цифровые двойники позволили получить достоверные результаты с учетом всего спектра возможных механических воздействий высокой степени интенсивности, которые возникают при падениях в течение эксплуатационного периода.

В результате примененных подходов в разрабатываемый УКХ ПВ был внесен целый ряд конструктивных изменений, позволивших сбалансировать конструкцию по металлоем-кости и демпфирующим способностям без ущерба для прочностных характеристик. В частности, по результатам падений в вертикальных положениях и под углом были разработаны: демпфирующее устройство, эффективно поглощающее кинетическую энергию (патент на изобретение RU2774084C2 «Торцевой демпфер контейнера»), а также крышка и элементы креплений всех разъемов; по результатам горизонтальных падений – были доработаны цапфы, ребра, разъем и крепление КНЗ, чехол для ОТВС.

Подходы, применяемые в разработанной методологии, нашли реализацию при проектировании целого ряда транспортных контейнеров для транспортировки и хранения ОЯТ и РАО. В настоящий момент АО «ОКБМ Африкантов» разрабатывает целый ряд изделий, относящихся к ТУК различного назначения (рис. 11), для АЭС с различными видами теплоносителей (ТУК-146Д, ТУК для АСММ, ТУК для ТРО АСММ, ТУК для КВХ АСММ, ТУК для ПЭБ «Академик Ломоносов», ТУК БТУ). Изобретенное запатентованное демпфирующее устройство с высокими поглощающими способностями и контролируемыми процессами деформирования на данный момент применяется при проектировании целого ряда аналогичных изделий. Данное оборудование подлежит обязательной сертификации, которая подразумевает проведение натурных испытаний, в результате которых должна быть подтверждена прочность и надежность испытуемого изделия. В результате недостаточной проработки конструкции по устаревшим методикам не исключен отрицательный результат таких испытаний, что приведет к существенным финансовым потерям. За счет разработанной и реализованной методологии на основе полноценных математических исследований на стадии проектирования сформирован конечный облик конструкций, который позволит обойтись без промежуточных натурных испытаний, что сильно сэкономит временной и финансовый ресурсы, и выйти на процесс сертификации с минимизированными экономическими затратами, что позволит снизить себестоимость разрабатываемого изделия, повысив его конкурентоспособность.

Библиографический список

- 1. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор), «Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов» НП-053-16, Москва, 2016 год.
- 2. МАГАТЭ, «Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов», SSR-6 (Rev.1), МАГАТЭ, Вена, 2018 год.
- 3. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций», НП-001-15.
- 4. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, «Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла», НП-016-05.
- 5. Гусаков-Станюкович, И.В. Развитие контейнеров для отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов типа ВВЭР с 2016 года и на горизонте до 2035 года / И.В. Гусаков-Станюкович, С.В. Комаров, М.Е. Буду // Научно-деловой портал «Атомная энергия 2.0», 2024 г.
- 6. Баженов, В.Г. Конечно-элементный анализ высокоскоростного удара о преграду транспортного упаковочного комплекта / В.Г. Баженов, А.И. Кибец, Ю.И. Кибец, П.В. Лаптев, А.А. Рябов, В.И. Романов, Г.И. Сотсков // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 2. С. 118-125.
- 7. **Рябов, А.А.** Компьютерное моделирование поведения системы демпфирования защитного контейнера при его падениях / А.А. Рябов, В.И. Романов, Г.И. Сотсков, С.Г. Скурихин, А.И. Барчен-

ков, А.И. Моренко // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Механика. 2000. № 2. С. 98-102.

- 8. LS-DYNA 960 Keyword User's Manual. Livermore Software Technology Corporation. 2001.
- 9. Программный комплекс ANSYS. Аттестационный паспорт программного средства №327 от 23.07.2024 г.
- 10. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. М, Издательство иностранной литературы, 1954.
- 11. **Кольский,** Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения // Механика. 1950. № 4. С. 108-119.
- 12. Брагов, А.М. Особенности построения диаграмм деформирования методом Кольского / А.М. Брагов, А.К. Ломунов // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Статика и динамика деформируемых систем: Всесоюз. межвуз. сб. Горьк. ун-т. 1984. С. 125-137.
- 13. **Bragov A.M.**, Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. Int. J. of Impact Engineering, 1995. 16(2), pp. 321-330.
- 14. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain. Exp. Mech. 1981. Vol. 21. № 5. Pp. 177-195.
- 15. Константинов, А.Ю. Экспериментально-расчетное исследование поведения конструкционных материалов под действием динамических нагрузок: Дисс... канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2007.
- 16. **Лапшин, Д.А.** Экспериментально расчетное исследование процессов упругопластического деформирования внутриобъектовых транспортных контейнеров типа БН в авариях с падением: Дисс...канд. техн. наук – Н. Новгород, 2015.
- 17. Cowper, G.R. and P.S. Symonds, "Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams", Brown University, Applied Mathematics Report, 1958.
- 18. Национальный стандарт Российской Федерации, Устройства внутрикорпусные водо-водяного энергетического реактора, Расчет на прочность на стадии проектирования, ГОСТ Р 59429-2021.

Дата поступления в редакцию: 28.03.2025

Дата принятия к публикации: 05.05.2025 УДК **621.039**

DOI 10.46960/1816-210X_2025_2_77 EDN KHPAJG

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСИТЕЛЬНЫХ ЛОПАТОК НА ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ РЕШЕТОК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

А.Н. Пронин

ORCID: 0000-0001-7174-3643 e-mail: Proninaleksei@mail.ru Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева Нижний Новгород, Россия

С.М. Дмитриев ORCID: 0000-0003-0637-7004 e-mail: dmitriev@nntu.ru

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

Проведено экспериментальное исследование влияния геометрических параметров смесительных лопаток перемешивающих дистанционирующих решеток *TBC-Kвадрат* на их гидравлическое сопротивление. Методология основана на моделировании течения водяного теплоносителя в активной зоне реактора в области автомодельного течения на основе теории гидродинамического подобия. Исследовано влияние угла наклона лопаток в диапазоне от 15 до 40° с постоянной площадью затеснения проходного сечения, а также площади затеснения проходного сечения лопатками в диапазоне от 6,8 до 10,6 мм² с постоянным углом наклона 25° на коэффициент гидравлического сопротивления перемешивающих дистанционирующих решеток. Все исследования проведены для коридорного пучка труб с относительным шагом S/d=1,3 при значениях критерия Рейнольдса от 10 000 до 100 000. Получены интегральные зависимости, характеризующие влияние геометрических параметров лопаток на гидравлическое сопротивление и позволяющие прогнозировать гидравлическое сопротивление, а также проводить обоснованный выбор геометрических параметров смесительных лопаток при проектировании и создании новых конструкций перемешивающих устройств. Набор экспериментальных данных послужил основой для создания базы данных, которая может быть использованием современных вычислительных машин.

Ключевые слова: ТВС-Квадрат, перемешивающие решетки, смесительные лопатки, коэффициент гидравлического сопротивления, экспериментальные исследования.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пронин, А.Н. Влияние геометрических характеристик смесительных лопаток на гидравлическое сопротивление перемешивающих решеток тепловыделяющих сборок ядерных реакторов / А.Н. Пронин, С.М. Дмитриев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 2. С. 77-84. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_77 EDN: KHPAJG

INFLUENCE OF GEOMETRICAL CHARACTERISTICS OF MIXING BLADES ON HYDRAULIC RESISTANCE OF MIXING GRIDS OF FUEL ASSEMBLIES OF NUCLEAR REACTORS

A.N. Pronin

ORCID: 0000-0001-7174-3643 e-mail: Proninaleksei@mail.ru Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev Nizhny Novgorod, Russia

[©] Пронин А.Н., Дмитриев С.М., 2025

S.M. Dmitriev ORCID: 0000-0003-0637-7004 e-mail: dmitriev@nntu.ru Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article is devoted to experimental studies of the influence of geometric parameters of mixing blades of TVS-Kvadrat mixing spacer grids on hydraulic resistance. The research methodology is based on modeling the flow of water coolant in the reactor core in the region of self-similar flow based on the theory of hydrodynamic similarity. The influence of the blade inclination angle in the range from 15° to 40° with a constant area of the flow cross-sectional area, as well as the influence of area of the flow section obstruction by the blades in the range from 6.8 to 10.6 mm² with a constant inclination angle of 25° on the hydraulic resistance coefficient of mixing spacer grids were studied. All studies were conducted for a corridor tube bundle with a relative pitch S/d=1.3 at Reynolds criterion values from 10.000 to 100.000. As a result of the studies, integral dependencies were obtained that characterize the influence of the hydraulic resistance. The obtained dependencies will allow predicting the hydraulic resistance, as well as making substantiated choices of the geometric parameters of mixing blades when designing and creating new designs of mixing devices. The set of experimental data served as the basis for creating a database that can be used to validate calculation codes and programs for complex mathematical modeling using modern computers.

Key words: TVS-Kvadrat, mixing grids, mixing blades, hydraulic resistance coefficient, experimental studies.

FOR CITATION: A.N. Pronin, S.M. Dmitriev. Influence of geometrical characteristics of mixing blades on hydraulic resistance of mixing grids of fuel assemblies of nuclear reactors. Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev. 2025. № 2. Pp. 77-84. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_77 EDN: KHPAJG

Введение

В активных зонах ядерных реакторов с водяным теплоносителем для интенсификации процессов теплообмена и перемешивания теплоносителя используют специальные перемешивающие решетки различных конструкций [1-4]. Их применение позволяет сгладить неравномерность распределения температуры теплоносителя в ТВС и повысить запасы до кризиса теплообмена [5-8]. Данные эффекты достигаются за счет создания направленных конвективных течений и дополнительной турбулизации потока теплоносителя за счет различных конструктивных элементов решеток – смесительных лопаток, отгибов, отверстий, закручивающих каналов и т.д. Наиболее широкое распространение получили решетки с смесительными лопатками, которые могут иметь различную форму, площадь и угол наклона.

Одновременно с интенсификацией теплообмена и перемешивания теплоносителя повышается гидравлическое сопротивление ТВС, что приводит к повышению затрат на собственные нужды станции. Очевидно, что на все эти процессы ключевое значение оказывают геометрические характеристики смесительных лопаток – форма, угол наклона, площадь затеснения проходного сечения. В НГТУ были проведены исследования по изучению влияния основных геометрических параметров лопаток (угла наклона и площади затеснения проходного сечения) на гидравлическое сопротивление перемешивающих дистанционирующих решеток ТВС-Квадрат реакторов PWR.

Описание исследовательского стенда и методики исследований

Исследования влияния геометрических параметров лопаток на гидравлическое сопротивление решеток проведены на аэродинамическом стенде, в состав которого входят: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель и измерительный комплекс с системой сбора, хранения и обработки информации. Циркуляция рабочей среды осуществляется за счет работы вентилятора, который нагнетает воздух в ресиверную емкость. Далее, пройдя успокоительный участок, стабилизированный поток воздуха с постоянным расходом поступает в экспериментальную модель и выбрасывается в атмосферу. Экспериментальная модель представляет собой фрагмент ТВС-Квадрат размером 7х7 стержней с двумя дистанционирующими и одной перемешивающей дистанционирующей решетками. Относительный шаг твэльного пучка составляет S/d=1,3. Дистанционирующая решетка состоит из взаимно перпендикулярных пластин с пружинистыми элементами внутри ячеек, предназначенных для фиксации твэлов. Отличие конструкции перемешивающей дистанционирующей дистанционирующей заключается в установке на кромки решетки специальных смесительных лопаток. При проведении исследований поочередно варьировались угол наклона лопаток и площадь затеснения проходного сечения (рис. 1).



Рис. 1. Решетки экспериментальных моделей: а) дистанционирующая решетка; б) перемешивающая дистанционирующая решетка



Конструкция экспериментальной модели обеспечивает возможность измерения статического давления в нескольких сечениях по длине экспериментальной модели. Схема расположения сечений отбора показана на рис. 2.







Полные потери давления ΔP_i^{nonh} на *i*-ом участке экспериментальной модели складываются из потерь давления на трение ΔP_i^{mpeh} и местных потерь ΔP_i^{Mecm} на перемешивающей дистанционирующей решетке:

$$\Delta P_i^{\text{полн}} = \Delta P_i^{\text{трен.}} + \Delta P_i^{\text{мест.}} = \lambda \cdot \frac{L_i}{d_{\Gamma}} \cdot \frac{\rho \cdot \overline{w}^2}{2} + \xi_{\Pi \square P} \cdot \frac{\rho \cdot \overline{w}^2}{2}, \qquad (1)$$

где *L*_{*i*} – расстояние между сечениями отбора статического давления, м;

 \overline{w} – среднерасходная скорость рабочей среду через экспериментальную модель, м/с.

Потери давления на трение определяются экспериментальным путем на модели без перемешивающей дистанционирующей решетки. Для определения коэффициента гидравлического сопротивления решетки исследуемая конструкция устанавливается в модель, после чего по измеренному перепаду давлений в модели определяется КГС по соотношению:

$$\xi_{\Pi \Pi P} = \frac{2 \cdot \left(\Delta P_i^{n_{\partial H}} - \Delta P_i^{m_{\mathcal{P}}e_{H}}\right)}{\rho \cdot w}.$$
(2)

Результаты исследований

Исследования гидравлического сопротивления производились в диапазоне значений критерия Рейнольдса от 10 000 до 100 000. Широкий диапазон значений позволил определить нижнюю границу зоны автомодельности течения. Установлено, что сопротивление гладкого пучка стержней, дистанционирующих и перемешивающих дистанционирующих решеток начиная с значений критерия Рейнольдса 60 000 можно считать постоянным и не зависящим от критерия Рейнольдса, что свидетельствует об автомодельности течения [9].

На первом этапе исследований был определен коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) дистанционирующей решетки, который составил 0,8 (рис. 3).



Рис. 3. Гидравлическое сопротивление дистанционирующей решетки Fig. 3. Hydraulic resistance of the spacer grid

Для исследований влияния угла наклона лопаток на гидравлическое сопротивление решеток использовались экспериментальные модели с решетками, в которых угол наклона лопаток составлял 15°, 20°, 25°, 27,5°, 30°, 35°. Форма и размер лопаток выбирались таким образом, чтобы, независимо от угла наклона, затеснение поперечного сечения элементарных ячеек оставалось постоянным (8,51 мм²). В результате проведенных исследований были установлены значения КГС для каждого угла наклона лопаток (рис. 4).





Fig. 4. Hydraulic resistance of grids with different blade inclination angles: *a) inclination angle of* 15°; *b) inclination angle of* 20°; *c) inclination angle of* 25°; *d) inclination angle of* 27.5°; *d) inclination angle of* 30°; *e) inclination angle of* 35°; *g) inclination angle of* 40°

Увеличение угла наклона от 15 до 25° привело к росту коэффициента гидравлического сопротивления решетки менее 3 % с 1,05 до 1,08 (табл. 1). Зависимость КГС решетки от угла наклона описывается линейной функцией:

$$\xi = 0,004 \cdot \alpha + 0,986. \tag{3}$$

Таблица 1.

Гидравлическое сопротивление решеток в зависимости от угла наклона лопатки

Table 1.

Hydraulic resistance of grids depending on the blade inclination angle

Угол наклона лопатки	КГС решетки
15°	1,05
20°	1,07
25°	1,08
27,5°	1,2
30°	1,25
35°	1,36
40°	1,48

При изменении угла наклона от 27,5° до 40° наблюдается значительный рост КГС решетки (около 20 %) с 1,2 до 1,48. Зависимость КГС решетки от угла лопатки описывается линейной функцией:

$$\xi = 0,022 \cdot \alpha + 0,589$$
 (4)

В диапазоне углов наклона между 25 и 27,5° наблюдается скачкообразное увеличение сопротивления решетки на 10 % (рис. 5). Начиная с угла наклона лопатки 27,5°, рост гидравлического сопротивления решетки происходит более интенсивно, чем при меньших углах. Об этом можно судить по величине углового коэффициента в формулах аппроксимирующих прямых (3) и (4).



Рис. 5. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления перемешивающей дистанционирующей решетки от угла наклона смесительных лопаток

Fig. 5. Dependence of the hydraulic resistance coefficient of the mixing spacer grid on the inclination angle of the mixing blades

При установке смесительных лопаток на дистанционирующую решетку происходит увеличение гидравлического сопротивления от 31,3 до 85 % для углов наклона лопаток 15° и 40° соответственно. Результаты исследований показали, что при рассмотрении фактора гидравлического сопротивления нецелесообразно увеличивать угол наклона смесительных лопаток перемешивающих дистанционирующих решеток более 25°.

Набор экспериментальных данных послужил основой для создания базы данных, которая может быть использована для валидации расчетных кодов и программ комплексного математического моделирования с применением современных вычислительных машин [10]. Исследования влияния площади затеснения проходного сечения лопатками на гидравлическое сопротивление решеток проводилось для угла наклона лопаток 25°. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления перемешивающих решеток от площади затеснения проходного сечения лопатками имеет линейный характер (рис. 4) и описывается соотношением:

$$\xi = 0,05 \cdot S_{\Pi 0\Pi} + 0,9 \tag{5}$$

Увеличение площади затеснения с 6,8 до 10,6 мм² приводит к росту КГС на 20 % с 0,96 до 1,17. При сравнении с дистанционирующей решеткой установка лопаток с площадью затеснения проходного сечения от 6,8 до 10,6 мм² и углом наклона 25° увеличивает гидравлическое сопротивление от 18,8 до 46,3 % соответственно (рис. 6).



Рис. 6. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления перемешивающей дистанционирующей решетки от площади затеснения лопатками проходного сечения (угол наклона лопаток 25°)

Fig. 6. Dependence of the hydraulic resistance coefficient of the mixing spacer grid on the area of the flow section obstruction by the blades (blade inclination angle 25°)

Заключение

Проведенные исследования позволили определить интегральные зависимости, характеризующие влияние геометрических характеристик смесительных лопаток на гидравлическое сопротивление решеток.

Набор экспериментальных данных послужил основой для создания базы данных, которая может быть использована для валидации расчетных кодов и программ комплексного математического моделирования с использованием современных вычислительных машин.

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

Библиографический список

- 1. **Перепелица, Н.И.** Решетки со смесительными элементами для ТВС ВВЭР // Атомная энергия. 2020. Т. 128. Вып. 3. С. 123-130.
- 2. **Перепелица, Н.И.** Дистанционирующие решетки со смесительными элементами для TBC PWR. Часть 2. // Атомная техника за рубежом, 2018. № 4. С. 3-8.
- 3. Самойлов, О.Б. Перемешивающая решетка тепловыделяющей сборки ядерного реактора / О.Б. Самойлов, А.И. Романов, В.Б. Кайдалов [и др.] // Патент №2383954 С1. Бюл. «Изобретения. Полезные модели». 2016. № 23 (Электронная версия).
- 4. Самойлов, О.Б. Перемешивающая решетка тепловыделяющей сборки ядерного реактора / О.Б. Самойлов, А.И. Романов, В.Б. Кайдалов [и др.] // Патент №79211 U1. Бюл. «Изобретения. Полезные модели». 2008. № 35 (Электронная версия).
- 5. Дмитриев, С.М. Исследование локальной гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР / С. М. Дмитриев, А. В. Герасимов, А. А. Добров [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 2. С. 151-162. DOI 10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162
- 6. Дмитриев, С.М. Экспериментальные исследования гидродинамики потока теплоносителя за дистанционирующей и перемешивающей решетками TBCA-12PLUS реактора BBЭP-1000 / С.М. Дмитриев, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. 2017. № 1. С. 126-134.
- 7. Дмитриев, С.М. Экспериментальные исследования поля скорости потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР И ВБЭР / С.М. Дмитриев, И.В. Каратушина, А.Н. Пронин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 1(103). С. 113-118.
- 8. Самойлов, О.Б. Исследование эффективности пластинчатых решеток-интенсификаторов теплообмена в сборках типа ТВСА-Т. / О.Б. Самойлов, Д.Л. Шипов, А.В. Куприянов [и др.] // Атомная энергия. 2020. Т. 128. Вып. 1. С. 18-23.
- 9. Гухман, А.А. Введение в теорию подобия / А.А. Гухман М.: Высшая школа, 1973. 295 с.
- Добров, А.А. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021622378 Российская Федерация. ИЯЭ и ТФ-БД. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления перемешивающей решетки-интенсификатора ТВС реактора PWR от угла отгиба дефлектора: № 2021622278: заявл. 26.10.2021: опубл. 02.11.2021 / А.А. Добров, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Дата поступления в редакцию: 28.03.2025

Дата принятия к публикации: 05.05.2025

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК **629.33**

DOI 10.46960/1816-210X_2025_2_85

EDN CYUBQQ

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА НАГРУЗОЧНЫХ РЕЖИМОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

М.А. Душкин

ORCID: 0009-0007-4901-7953 e-mail: dushkinma@bmstu.ru Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана Москва, Россия

Я.Ю. Левенков ORCID: **0000-0001-6556-3232** e-mail: **levenkov_yy@bmstu.ru** Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана *Москва, Россия*

Рассмотрена задача повышения эффективности топологической оптимизации на основе метода конечных элементов при проектировании деталей транспортных средств путем уменьшения количества расчетных случаев. Для этого был проведен анализ влияния различных методов автоматизированного выбора нагрузок. В качестве примера рассмотрено проектирование поворотного кулака полноприводного беспилотного транспортно-технологического средства полной массой 800 кг.

Результаты проверочных расчетов подтверждают, что для получения оптимальной силовой схемы достаточно использования лишь ограниченного количества расчетных случаев, которые являются определяющими. Применение предложенной методики позволяет ускорить процесс топологической оптимизации более чем в 2 раза при минимизации податливости, а уменьшение количества расчетных в 2 раза при ограничении напряжений снижает временные затраты в 2,6 раза. Результаты работы могут быть использованы при проектировании высоконагруженных деталей минимальной массы для транспортных средств.

Ключевые слова: топологическая оптимизация, расчет на прочность, нагрузочные режимы, транспортные средства, расчетные случаи, метод конечных элементов, нагрузки, динамика твердых тел, силовая схема.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Душкин, М.А. Методика автоматизированного выбора нагрузочных режимов для проектирования высоконагруженных деталей транспортных средств с использованием топологической оптимизации / М.А. Душкин, Я.Ю. Левенков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 2. С. 85-102. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_85 EDN: CYUBQQ

THE METHOD OF AUTOMATED LOAD MODES SELECTION FOR DESIGNING HIGHLY LOADED VEHICLE PARTS USING TOPOLOGY OPTIMIZATION

M.A. Dushkin ORCID: 0009-0007-4901-7953 e-mail: dushkinma@bmstu.ru Bauman Moscow State Technical University *Moscow, Russia*

[©] Душкин М.А., Левенков Я.Ю., 2025

Ya.Yu. Levenkov ORCID: 0000-0001-6556-3232 e-mail: levenkov_yy@bmstu.ru Bauman Moscow State Technical University *Moscow, Russia*

Abstract. The article is devoted to increasing the topology optimization efficiency based on the finite element method in the design of vehicle parts by reducing the number of load cases. To achieve this, an analysis of the influence of various methods of automated load selection was carried out. As an example, the design of a steering knuckle for an all-wheel drive unmanned transport and technological vehicle with a gross weight of 800 kg is presented. The results of the verification calculations confirm that it is sufficient to use only a limited number of load cases, which are decisive, to obtain the optimal power circuit. The proposed method allows to speed up the topological optimization process more than twice when minimizing compliance, in addition, halving the number of load cases with stress constraints reduces computational time by 2.6 times. The obtained results can be used in the design of highly loaded parts of minimum mass for vehicles.

Key words: topology optimization, strength calculation, load modes, vehicles, load cases, finite element method, loads, rigid body dynamics, power circuit.

FOR CITATION: Dushkin M.A., Levenkov Ya.Yu. The method of automated load modes selection for designing highly loaded vehicle parts using topology optimization. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 2. Pp. 85-102. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_85 EDN: CYUBQQ

Введение

Современные транспортные средства постоянно совершенствуются в направлении повышения энергоэффективности, что обусловлено необходимостью снижения расхода топлива, увеличения запаса хода, уменьшения воздействия на окружающую среду и соблюдения все более строгих нормативов по выбросам [1-3]. Одним из ключевых способов повышения энергоэффективности является снижение массы автомобиля, поскольку даже небольшое уменьшение веса ведет к меньшему расходу энергии, улучшению динамических характеристик и повышению эксплуатационных качеств. Соответственно, вопрос оптимизации массы транспортного средства (TC) является одной из важнейших задач современного машиностроения.

Существует несколько методик снижения массы TC, включая использование современных легких материалов (алюминиевые и магниевые сплавы, композиты), усовершенствование конструктивных решений и применение передовых технологий проектирования [4-6]. Однако наиболее перспективным и эффективным направлением является применение топологической оптимизации. Этот метод позволяет проектировать детали с учетом реальных эксплуатационных нагрузок, распределяя материал таким образом, при котором достигается высокая эффективность его использования, благодаря чему обеспечивается достижение минимально возможной массы при сохранении необходимых прочностных и жесткостных характеристик. Применение топологической оптимизации дает значительное преимущество в решении задач снижения массы TC без ухудшения их конструкционной надежности [7-9].

При проектировании беспилотных TC повышенной проходимости необходимо учитывать специфические эксплуатационные условия: движение по неровным поверхностям, преодоление препятствий и интенсивные динамические нагрузки. Специальные TC подвергаются высоким нагрузкам при движении по пересеченной местности. Это требует учета различных динамических расчетных случаев, связанных с частыми изменениями как направления, так и величин нагрузок, которые проявляются в виде ударов и вибрации. Если не учитывать эти нагрузки, их воздействие может привести к потере работоспособности силового элемента [10].

Для повышения конструкционной надежности силовых элементов TC повышенной проходимости необходимо проводить анализ широкого спектра нагрузочных режимов, выделяя характерные случаи. Чем больше различных режимов нагружения рассматривается при проектировании, тем точнее можно определить силовую схему конструкции и снизить вероятность отказа отдельных деталей. Однако реализация такого подхода сопряжена с определенными сложностями. Во-первых, учет большого количества расчетных случаев требует значительных вычислительных мощностей. Во-вторых, процесс оптимизации усложняется увеличением объема данных и времени, необходимого для проведения расчетов.

В связи с этим, при топологической оптимизации TC высокой проходимости возникает необходимость разработки методики выбора наиболее нагрузочных случаев, которые определяют силовую схему конструкции и являются основными среди всего их многообразия. Такой подход позволит сократить объем вычислений и время оптимизации, сосредоточившись на расчетных случаях, определяющих силовую схему конструкции. Рационально выбранные нагрузочные случаи для последующей топологической оптимизации обеспечат дают возможность повышать эффективность применения данного метода, что позволяет добиться снижения массы конструкции при сохранении надежности и эксплуатационной прочности. Это является ключевой целью, которую необходимо достичь при проектирования современных TC.

Целью данной работы является разработка методики автоматизированного выбора нагрузочных режимов для проектирования силовых деталей транспортных средств с использованием метода топологической оптимизации и метода конечных элементов.

Общие принципы формирования списка нагрузочных режимов и получения нагрузок

В рамках исследования рассмотрен поворотный кулак полноприводного беспилотного транспортно-технологического средства (TTC) полной массой 800 кг. Спроектированный робот-транспортер имеет грузоподъемность 400 кг и способен буксировать прицеп массой до 500 кг. ТС приводится в движение двумя тяговыми электродвигателями, питающимися от литиевой батареи. Максимальная скорость движения составляет 71 км/ч, а запас хода при движении по дороге с асфальтобетонным покрытием со скоростью 50 км/ч равен 104 км. Основной особенностью разрабатываемого робота является его продольная и поперечная симметрия, позволяющая осуществлять движение без разворота. Также оба моста транспортера являются управляемыми, причем каждый имеет собственный привод поворота, что позволяет увеличить маневренность за счет малых радиусов поворота. Общий вид TC представлен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид разрабатываемого транспортного средства Fig. 1. General view of the vehicle under development

Для получения нагрузок, действующих на узлы и агрегаты проектируемого TC, в том числе, и на рассматриваемый в данной работе поворотный кулак, в программе расчета динамики связных тел (MBD) разработана динамическая модель TC. Подробное описание динамической модели беспилотного TTC и способы получения нагрузок описаны в работах [11-13]. На рис. 2 представлена твердотельная модель поворотного кулака с изображением точек воздействия силовых факторов, отмеченных маркерами, для которых определялись нагрузки в ходе моделирования движения TC для составленных расчетных случаев.

В ходе моделирования движения были получены силы, действующие в шаровых шарнирах, соединяющих кулак с рычагами подвески и рулевой тягой, силы, действующие со стороны колеса на установленный в кулаке ступичный подшипник, а также тормозные моменты, приведенные к оси вращения колеса.



Рис. 2. Твердотельная модель поворотного кулака с маркерами приложения нагрузок Fig. 2. Solid-state model of the steering knuckle with load application markers

В результате моделирования движения в программном комплексе динамики связных тел по списку нагрузочных режимов, состоящему из 31 пункта. Режимы описаны в [11]. В результате было получено 99 расчетных случаев для элементов подвески одного колеса. Отличие количества расчетных случаев от выбранных расчетными режимами объясняется тем, что при моделировании динамики движения TC, таких как «Движение по неровной дороге 4 или 5 категории эксплуатации», «Движение по неровной ОП со случайным профилем», «Удар в бордюр боковой поверхностью колес», нагрузки были получены в разные моменты времени моделирования.

Поскольку конструкция разрабатываемого TC является симметричной относительно продольной и поперечной плоскостей, детали подвески переднего и заднего мостов должны иметь идентичную конструкцию. Для обеспечения унификации деталей подвески при проектировании методом топологической оптимизации необходимо, чтобы нагрузки, полученные для каждого из четырех узлов подвески, должны быть приведены к одному узлу. В данном случае в качестве такого узла выбрана левая передняя подвеска. Подробнее метод приведения нагрузок описан в [11].

В результате приведения нагрузок к одному узлу общее количество расчетных случаев для одного поворотного кулака возросло в четыре раза и составило 396. Проведение топологической оптимизации по всем расчетным случаям представляется затруднительным, поскольку для этого требуются большие вычислительные мощности. Следует учесть, что в общее количество расчетных случаев входят и нагрузки, полученные для симметричных режимов нагружения.

Необходимо разработать метод, который в автоматическом режиме из всего перечня расчетных случаев позволит выбрать только те случаи, которые в наибольшей степени будут влиять на силовую схему, полученную в результате топологической оптимизации. Для анализа методов выбора расчетных случаев предложены методики, которые выбирают расчетные случаи по следующим критериям:

- максимальные значения проекций сил на оси локальной системы координат детали, взятые по модулю для каждого ее шарнира;
- максимальные значения проекций сил и моментов на оси локальной системы координат детали, взятые по модулю для каждого ее шарнира;
- максимальные значения проекций сил на оси локальной системы координат, действующие в каждом шарнире с учетом направления их действия (с учетом знака);
- максимальные значения проекций сил и моментов на оси локальной системы координат, действующие в каждом шарнире с учетом направления их действия.

На рис. За показаны вектора моментов сил, на рис. Зб – вектора сил, действующих в шарнирах поворотного кулака.



Рис. 3. Приложение нагрузок к узлам поворотного кулака Fig. 3. Applying loads to the steering knuckle nodes

Рассматриваемые алгоритмы анализируют значения силовых факторов в узлах и выдает номера наиболее нагруженных расчетных случаев согласно критериям, приведенным выше. Результаты работы алгоритмов по выбору расчетных случаев для проведения топологической оптимизации по выбранным критериям представлены в табл. 1-4.

Таблица 1.

Нагрузочные случаи для максимальных значений проекций сил на оси локальной системы координат детали, взятые по модулю для каждого ее шарнира

Table 1.

Load cases for maximum values of the modulus of force projections on the axes of the local coordinate system of the part for each of its hinges

№, п/п	Номер расчетного случая	Наименование расчетного случая	
1.	66	Движение по дороге 4-й категории 20 км/ч	
2.	98	Удар колесом	
3.	218	Неровности	
4.	267	Движение по дороге 4-й категории 20 км/ч	
5.	294	Удар колесом	

Таблица 2.

Нагрузочные случаи для максимальных значений проекций сил и моментов на оси локальной системы координат детали, взятые по модулю для каждого ее шарнира

Table 2.

Load cases for maximum values of the modulus of projections of forces and moments on the axes of the local coordinate system of the part for each of its hinges

№, п/п	Номер расчетного случая	Наименование расчетного случая	
1.	3	Торможение с максимальным моментом без переворота	
2.	4	Торможение с максимальным моментом с переворотом	
3.	16	Неровности	
4.	66	Движение по дороге 4-й категории 20 км/ч	
5.	98	Удар колесом	
6.	218	Неровности	
7.	267	Движение по дороге 4-й категории 20 км/ч	
8.	272	Движение по дороге 4-й категории 7 км/ч с прицепом	
9.	294	Удар колесом	

Таблица 3.

Нагрузочные случаи для максимальных значений проекций сил на оси локальной системы координат, действующие в каждом шарнире с учетом направления их действия

Table 3.

Load cases for maximum values of force projections on the axes of the local coordinate system, acting in each hinge, taking into account the direction of their action

№, п/п	Номер расчетного случая	Наименование расчетного случая	
1.	51	Движение по дороге 4-й категории 20 км/ч	
2.	66	Движение по дороге 4-й категории 20 км/ч	
3.	82	Движение по дороге 4-й категории 7 км/ч с прицепом	
4.	93	Удар колесом	
5.	98	Удар колесом	
6.	115	Неровности	
7.	118	Неровности	
8.	218	Неровности	
9.	294	Удар колесом	

Таблица 4.

Нагрузочные случаи для максимальных значений проекций сил и моментов на оси локальной системы координат, действующие в каждом шарнире с учетом направления их действия

Table 4.

Load cases for maximum values of projections of forces and moments on the axes of the local coordinate system, acting in each hinge, taking into account the direction of their action

<u>№</u> ,	Номер расчетного случая	Наименование расчетного случая	
11/11	2		
1.	3	Горможение с максимальным моментом без переворота	
2.	4	Торможение с максимальным моментом с переворотом	
3.	16	Неровности	
4.	51	Движение по дороге 4 категории 20 км/ч	
5.	66	Движение по дороге 4 категории 20 км/ч	
6.	82	Движение по дороге 4 категории 7 км/ч с прицепом	
7.	93	Удар колесом	
8.	98	Удар колесом	
9.	102	Торможение с максимальным моментом без переворота	
10.	115	Неровности	
11.	118	Неровности	
12.	135	Буксировка вперед под углом 30 °	
13.	143	Торможение на спуске в повороте	
14.	165	Движение по дороге 4-й категории 20 км/ч	
15.	218	Неровности	
16.	267	Движение по дороге 4-й категории 20 км/ч	
17.	272	Движение по дороге 4-й категории 7 км/ч с прицепом	
18.	294	Удар колесом	
19.	335	Буксировка назад под углом 0 °	

Анализ результатов выбора определяющих расчетных случаев показывает, что наиболее важными нагрузочными режимами являются экстремальные и аварийные, согласно классификации, представленной в [11].

Оценка эффективности методик выбора нагрузочных режимов

Для оценки возможности применения методик, позволяющих выбрать ограниченное число расчетных случаев для последующего их использования при топологической оптимизации силовых деталей TC, были проведены проектировочные расчеты поворотного кулака по всем расчетным случаям, а также по наиболее нагруженным расчетным случаям, представленным выше, в результате которых получены его силовые схемы в виде изоповерхностей равной плотности. Для проведения топологической оптимизации в программном комплексе *Siemens NX 8.5* была создана твердотельная модель пространства проектирования (рис. 4). Пространство проектирования – это ограниченная область, внутри которой происходит оптимальное распределение материала при топологической оптимизации. Пространство проектирования поворотного кулака разработано таким образом, чтобы обеспечить необходимые присоединительные размеры деталей подвески и колесно-ступичного узла, исключить пересечения подвижных частей подвески при ее работе, а также обеспечить собираемость конструкции и сохранить возможность доступа инструмента для сборки и обслуживания агрегатов.



Рис. 4. Твердотельная модель пространства проектирования Fig. 4. Solid-state model of the design space

На основе твердотельной модели создана конечно-элементная модель пространства проектирования, в которой выделены области, не участвующие в оптимизации (неизменяемые области), соответствующие местам крепления сопрягаемых деталей подвески и колесноступичного узла. Конечно-элементная модель пространства проектирования создана из объемных восьмиузловых конечных элементов (HEX8). Для передачи нагрузки от тормозного момента были использованы элементы CROD и CBEAM, которые через скобу тормозного механизма преобразуют тормозной момент в силы в проушинах крепления тормозного механизма. Сосредоточенные силы и моменты передаются с помощью элементов RBE2 и RBE3. Общий вид конечно-элементной модели представлен на рис. 5. Описание параметров конечно-элементной модели приведено в табл. 5.



Рис. 5. Общий вид расчетной конечно-элементной модели Fig. 5. General view of the computational finite element model

Таблица 5. Параметры конечно-элементной модели

 Table 5.

 Parameters of the finite element model

Параметр	КЭ	Величина
	HEX8	131613
	RBE2	6
Количество конечных элементов	RBE3	5
	CROD	1
	CBEAM	2
Суммарное количество конечных элементов		131630
Суммарное количество узлов		148133
Средний размер конечного элемента, мм		2



Рис. 6. Пример приложения нагрузок для расчетного случая «Торможение на спуске в повороте»

Fig. 6. An example of the application of loads for the load case of «Braking on a descent in a turn»

В качестве целевой функции для проведения топологической оптимизации поворотного кулака выбрана функция минимума потенциальной энергии деформации (жесткостной алгоритм) [14]. Ограничение задано в виде удельного остаточного объема материала относительно исходного объема пространства проектирования, остаточный объем не должен превышать 15 % от исходного. Механические свойства пространства проектирования и неизменяемых областей были заданы линейно-упругим материалом с модулем упругости E = 72000 МПа и коэффициентом Пуассона $\mu = 0,33$ (алюминиевый сплав АК7пч). Уравновешивание модели при приложении нагрузок осуществляется методом инерционного сглаживания (inertia relief). Чтобы изменение массы модели в процессе оптимизации не влияло на ее уравновешивание при расчете, плотность материала пространства проектирования задана равной нулю, а массово-инерционные характеристики заданы с помощью точечной массы в центре масс модели. Инерционная нагрузка распределена при помощи элемента связи RBE3 на узлы приложения нагрузок [15]. Оптимизация проводилась на компьютере с 8-ядерным процессором Intel Core i7-11700KF (3,6 ГГц, оперативное запоминающее устройство 32 Гб, SSD 476 Гб). При проведении топологической оптимизации были рассмотрены задачи с оптимизаци ей по всем 396 расчетным случаям и с расчетными случаями, представленными в табл. 1-4. Результаты расчетов представлены на рис. 7.



Рис. 7. Силовые схемы поворотного кулака
в виде изоповерхности равной плотности при значении ρ = 0,4:
а – все расчетные случаи, б – расчетные случаи с максимальными модулями сил,
в – расчетные случаи с максимальными модулями сил и моментов,
г – расчетные случаи с максимальными компонентами сил,
д – расчетные случаи с максимальными компонентами сил и моментов

Fig. 7. Power schemes of the steering knuckle in the form of an isosurface of equal density at a value of $\rho = 0.4$:

 $a-all \ load \ cases, \ 6-load \ cases \ with \ maximum \ force \ modules, \ e-load \ cases \ with \ maximum \ modules \ of forces \ and \ moments, \ z-load \ cases \ with \ maximum \ forces \ components, \ \partial-load \ cases \ with \ maximum \ components \ of \ forces \ and \ moments$

Временные затраты на оптимизацию и количество итераций для каждого набора нагрузочных режимов представлены в табл. 6. Результаты показывают, что использование выбранных расчетных случаев с использованием автоматизированных методов, рассмотренных выше, при проведении топологической оптимизации позволяют сократить время расчета более чем в два раза.

	Таблица 6.
Время расчета и количество итераций при оп	тимизации
	Table 6.

Расчетные случаи	Количество расчетных случаев	Количество итераций	Время расчета, ч:мин:с
Все расчетные случаи	396	44	03:43:54
Максимальные модули сил	5	39	01:45:18
Максимальные модули сил и моментов	9	42	01:51:52
Максимальные компоненты сил	9	39	01:47:43
Максимальные компоненты сил и моментов	19	42	01.54.46

Computational time and number of iterations for optimization

У силовых схем, полученных для расчетных случаев, определеные для максимальных значений проекций сил на оси локальной системы координат детали, взятые по модулю для каждого ее шарнира и для максимальных значений проекций сил на оси локальной системы координат, действующие в каждом шарнире с учетом направления их действия (рис. 76 и 7г), отсутствуют соединяющие места крепления тормозного суппорта конструктивные элементы. Недостаточность материала в этих зонах объясняется отсутствием в списке расчетных случаев, связанных с тормозными режимами, нагружение для которых задавались в виде тормозного момента. Данные силовые схемы не рассматривались в дальнейших проверочных расчетах. В целом основные силовые схемы детали, полученные при всех рассматриваемых подходах выбора нагрузок, в том числе, и для всех рассматриваемых расчетных случаев, имеют схожую структуру. Для оценки работоспособности силовых схем, полученных в результате топологической оптимизации, а также для оценки возможности применения ограниченного числа расчетных случаев при проведении топологической оптимизации, было проведено «сглаживание» силовых схем для проведения проверочных расчетов. Полученные в результате модели кулаков представлены на рис. 8.



Рис. 8. Сглаженные модели поворотного кулака, полученные при оптимизации: *a* – по всем расчетным случаям, б – по расчетным случаям с максимальными модулями сил и моментов, в – по расчетным случаям с максимальными компонентами сил и моментов

Fig. 8. Smoothed models of the steering knuckle after optimization: a - with all load cases, $\delta - with load cases with maximum modules of forces and moments,$ <math>s - with load cases with maximum components of forces and moments



Рис. 9. Огибающая эквивалентных напряжений по Мизесу, МПа, силовых схем, полученных при оптимизации:

а – по всем расчетным случаям, б – максимальные значения проекций сил и моментов
 на оси локальной системы координат детали, взятые по модулю для каждого ее шарнира,
 в – максимальные значения проекций сил и моментов на оси локальной системы координат,
 действующие в каждом шарнире с учетом направления их действия

Fig. 9. Envelope of equivalent von Mises stresses, MPa, of power schemes after optimization:
a – with all load cases, 6 – with load cases with maximum values of the modulus of projections of forces and moments on the axes of the local coordinate system of the part for each of its hinges,
6 – with load cases with maximum values of projections of forces and moments on the axes of the local coordinate system, acting in each hinge, taking into account the direction of their action

Прочностной расчет для рассматриваемых силовых схем проводился по всем расчетным случаям, полученным в результате динамического моделирования движения транспортера. Механические свойства материала заданы для алюминиевого сплава с модулем упругости E = 72000 МПа, коэффициентом Пуассона $\mu = 0,33$ и плотностью $\rho = 2660$ кг/м³. Масса каждой из сглаженных силовых схем равна 620 г, что в два раза меньше массы исходной конструкции поворотного кулака, изготовленного из чугуна. Результаты прочностного расчета полученных силовых схем представлены на рис. 9 в виде огибающей эквивалентных напряжений по Мизесу по всем расчетным случаям. Для результатов расчета каждой силовой схемы цветовая шкала напряжений ограничена значением 500 МПа.

Анализ полученных результатов расчета показывает, что распределение напряжений в силовых схемах, полученных в результате топологической оптимизации по ограниченному числу расчетных случаев, аналогично распределению напряжений в силовой схеме, оптимизированной по всем расчетным случаям. Наиболее точное совпадение распределения напряжений наблюдается в силовой схеме, расчетные случаи для которой выбирались по критерию максимальных значений проекций сил и моментов на оси локальной системы координат детали, взятые с учетом направления каждого ее шарнира. Максимальные напряжения во всех силовых схемах расположены в локальных зонах, что позволит устранить данные концентраторы за счет увеличения площади поперечного сечения структурных элементов и создания более плавных переходов при доведении конструкции после первичной интерпретации результатов топологической оптимизации.

Оценка эффективности методики на примере топологической оптимизации при условии минимума массы с ограничением максимальных действующих напряжений

Для получения оптимальной конструкции не всегда достаточно провести топологическую оптимизацию с целью максимизации жесткости конструкции, поскольку уровень напряжений в структурных элементах может быть достаточно высок, и для изготовления таких деталей необходимо применять высокопрочные материалы, что значительно увеличивает стоимость итоговой конструкции. Поэтому необходимо рассматривать задачу разработки конструкции минимальной массы, которая будет отвечать определенным прочностным характеристикам, т.е. задавать ограничение на напряжения в конструкции.

Решение задачи топологической оптимизации с ограничением по напряжениям является трудоемкой задачей, требующей больших вычислительных мощностей и существенных затрат машинного времени для проведения расчета [14, 16, 17], притом, время расчета зависит от количества учитываемых нагрузочных случаев, поэтому вопросы снижения их количества является актуальной задачей.

В качестве целевой функции была выбрана функция минимизации объема материала модели, ограничение задано в виде максимального напряжения в модели – 300 МПа. Топологическая оптимизация проводилась для двух групп нагрузочных режимов, полученных по критериям максимальных модулей сил и моментов (9 расчетных случаев) и максимальных компонентов сил и моментов (19 расчетных случаев). Силовые схемы, полученные при топологической оптимизации с ограничением напряжений, представлены на рис. 10. Временные затраты и количество итераций при оптимизации приведены в табл. 7.

Таблица 7.

Время расчета и количество итераций при оптимизации с ограничением напряжений

Table 7.

Computational time and number of iterations for stress-constrained optimization

Расчетные случаи	Количество расчетных случаев	Количество итераций	Время расчета, ч:мин:с
Максимальные модули сил и моментов	9	115	24:16:45
Максимальные компоненты сил и моментов	19	177	63:58:28



Рис. 10. Силовые схемы поворотного кулака в виде изоповерхности равной плотности при значении ρ = 0,4: a – расчетные случаи с максимальными модулями сил и моментов; б – расчетные случаи с максимальными компонентами сил и моментов

Fig. 10. Power circuits of the steering knuckle in the form of an isosurface of equal density at a value of ρ = 0.4:
a – load cases with maximum modules of forces and moments,
6 – load cases with maximum components of forces and moments

В результате оптимизации были получены силовые схемы, отличающиеся от результатов оптимизации жесткостного алгоритма. Конструкция в большей степени состоит из конструктивных элементов, близких к поверхностям, в отличие от жесткотного алгоритма, где преимущественно силовая схема имеет стрежневую структуру. В районах проушин крепления тормозного суппорта увеличилась плотность материала, больше объема появилось и в районе установки шаровой опоры рулевой тяги. Сглаженные модели поворотного кулака, для прочностного расчета, структура которых получена в результате топологической оптимизации с ограничением напряжений, показаны на рис. 11.

Временные затраты на проведение топологической оптимизации с ограничением напряжений возросли в 13 раз для расчетных случаев, выбранных по критерию максимальных значений проекций сил и моментов на оси локальной системы координат детали, взятые по модулю для каждого ее шарнира количество итераций возросло с 42 до 115. Для расчетных случаев для метода выбора нагрузок по максимальным значениям проекций сил и моментов на оси локальной системы координат детали, взятые по модулю для каждого ее шарнира количество итераций возросло с 42 до 115. Для расчетных случаев для метода выбора нагрузок по максимальным значениям проекций сил и моментов на оси локальной системы координат, действующие в каждом шарнире с учетом направления их действия количество итераций выросло с 42 до 177, а время расчета возросло в 33,4 раза. Увеличение количества расчетных случаев при топологической оптимизации с ограничением напряжений с 9 до 19 увеличивает время расчета в 2,6 раза.



б

Рис. 11. Сглаженные модели поворотного кулака, полученные при оптимизации с ограничением напряжений: а – по расчетным случаям с максимальными модулями сил и моментов, б – по расчетным случаям с максимальными компонентами сил и моментов

Fig. 11. Smoothed models of the steering knuckle after stress-constrained optimization:

a – with load cases with maximum modules of forces and moments,

 $\mathit{6-with}$ load cases with maximum components of forces and moments

Для сглаженных силовых схем также был проведен проверочный прочностной расчет. Результаты расчета по всем расчетным случаям для обеих силовых схем в виде огибающей эквивалентных напряжений по Мизесу представлены на рис. 12. Механические свойства также заданы для алюминивого сплава АК7пч. Масса каждой сглаженной модели составляет 906 г, что на 32 % меньше массы исходной конструкции поворотного кулака.

Анализ результатов проверочных расчетов показывает, что напряжения в силовой схеме не превышают ограниченных при топологической оптимизации 300 МПа, за исключением нескольких локальных зон, где напряжения составляют 450 МПа. Концентраторы напряжений расположены в местах крепления суппорта тормозного механизма и шарового пальца рулевой тяги. При этом у силовой схемы, полученной для расчетных случаев с максимальными значениями проекций сил и моментов на оси локальной системы координат, действующие в каждом шарнире с учетом направления их действия, максимальные напряжения в районах концентраторов на 150 МПа ниже, чем у силовой схемы, полученной для максимальных значений проекций сил и моментов на оси локальной системы координат детали, взятые по модулю для каждого ее шарнира. Для устранения локальных концентраторов напряжений обе силовые схемы могут быть доработаны.





б

Рис. 12. Огибающая эквивалентных напряжений по Мизесу, МПа, силовых схем, полученных при оптимизации с ограничением напряжений: *a* – по расчетным случаям с максимальными модулями сил и моментов, *б* – по расчетным случаям с максимальными компонентами сил и моментов

Fig. 12. Envelope of equivalent von Mises stresses, MPa, of power circuits after stress-constrained optimization:

a – with load cases with maximum modules of forces and moments, δ – with load cases with maximum components of forces and moments

Заключение

- В ходе исследования предложены алгоритмы выбора нагрузочных случаев для проектирования деталей методом топологической оптимизации. Применение расчетных случаев с использованием рассмотренных автоматизированных методов при проведении топологической оптимизации по жесткостному алгоритму позволяет сократить время расчета более чем в 2 раза.
- 2. Применение разработанных алгоритмов значительно сокращает объем вычислений, концентрируясь только на наиболее критичных режимах, что повышает эффективность проектирования и снижает время, затрачиваемое на расчеты. Например, при использовании алгоритма минимизации массы с ограничениями по напряжениям уменьшение количе-

ства расчетных случаев при топологической оптимизации с ограничением напряжений с 19 до 9 уменьшает время расчета в 2,6 раза.

- 3. На примере нагрузок, действующих на поворотный кулак подвески беспилотного мотовездехода, продемонстрировано, что существуют нагрузочные случаи, которые определяют основную силовую схему нагруженной детали. Проведенные расчеты и анализ оптимизированной конструкции подтвердили, что учет только этих расчетных случаев позволяет значительно снизить временные затраты на проектирование, при этом не снижая параметры прочности и жесткости детали. Повышенные значения напряжений носят локальный характер, что можно устранить путем доработки полученной силовой схемы.
- 4. Направление проекции максимального силового фактора существенно не влияет на общую структуру силовой схемы конструкции при использовании жесткостного алгоритма топологической оптимизации.
- 5. При выполнении работы получены силовые схемы поворотного кулака, имеющие значительно меньшую массу по сравнению с исходной деталью. Массы моделей, полученные при оптимизации с различными целевыми функциями, представлены в табл. 8. Применение топологической оптимизации позволяет снизить массу конструкции кулака от 30 до 50 %, обеспечив при этом требуемые прочностные характеристики.
- 6. Предложенный алгоритм обладает высокой адаптивностью и может применяться для оценки влияния новых нагрузочных режимов. В случае появления дополнительных расчетных случаев, не рассматривавшихся ранее, методика позволяет определить, оказывают ли они значительное влияние на силовую схему конструкции, еще до проведения процедуры топологической оптимизации. Это делает процесс проектирования более гибким, позволяя учитывать изменяющиеся условия эксплуатации.
- 7. Таким образом, использование разработанных алгоритмов выбора определяющих нагрузочных режимов позволяет существенно повысить эффективность применения метода топологической оптимизации на ранних стадиях проектирования высоконагруженных элементов ТС. Применение данной методики в машиностроении и автомобильной промышленности открывает новые перспективы для создания легких, прочных и энергоэффективных транспортных средств, что особенно актуально в условиях растущих требований к экологичности и экономичности современных автомобилей.

Таблица 8. Массы полученных силовых схем Table 8. The masses of the obtained power circuits

Наименование силовой схемы	Масса, кг	Снижение массы, %		
Исходная модель поворотного кулака	1,330	-		
Оптимизация с минимизацией податливости				
Все расчетные случаи	0,629	52,7		
Максимальные модули сил и моментов	0,615	53,7		
Максимальные компоненты сил и моментов	0,615	53,7		
Оптимизация с ограничением напряжений				
Максимальные модули сил и моментов	0,906	31,9		
Максимальные компоненты сил и моментов	0,906	31,9		

Библиографический список

- 1. Lutsey, N. Research Report UCD-ITS-RR-10-10 // Review of Technical Literature and Trends Related to Automobile Mass-Reduction Technology. May 2010. 2015. № April.
- 2. **Bailo, C.** Vehicle Mass Reduction / C. Bailo, Sh. Modi, M. Schultz et al. // Roadmap Study 2025-2035. 2020. P. 44.

- 3. **MacKenzie, D.** Determinants of US passenger car weight / D. MacKenzie, S. Zoepf // https://www.researchgate.net/publication/264440369_Determinants_of_US_passenger_car_weight DOI:10.1504/IJVD.2014.060066.
- 4. **Baron, J.** Identifying Real World Barriers to Implementing Lightweighting Technologies and Challenges in Estimating the Increase in Costs / J. Baron. Center for Automotive Research 3005 Boardwalk, ste. 200 Ann Arbor, mi 48108. 2016.
- Daehn, G.S. Environmentally Responsible Lightweight Passenger Vehicle Design and Manufacturing / G.S. Daehn, K.E. Daehn, O. Kuttner // Automot. Innov. Springer Nature Singapore, 2023. Vol. 6, № 3. P. 300-310
- 6. Czerwinski, F. Current trends in automotive lightweighting strategies and materials // Materials (Basel). 2021. Vol. 14, № 21.
- 7. **Topaç M.M.** Lightweight design of a rear axle connection bracket for a heavy commercial vehicle by using topology optimisation: A case study / M.M. Topaç, M. Karaca B. Aksoy L. Bilal // Mechanika. 2020. Vol. 26, № 1. P. 64-72. DOI:10.5755/j01.mech.26.1.23141.
- 8. **Французов, А.А.** Применение метода топологической оптимизации в задачах проектирования грузоподъемной техники / А.А. Французов, Я.И. Шаповалов, Д.С. Вдовин // Технические науки. Машиностроение и машиноведение. 2017. № 2 (42). С. 99-108.
- 9. Vdovin, D. Light frame design for quad bike using topology optimization / D. Vdovin, Y. Levenkov, V. Chichekin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing, 2019. Vol. 589, № 1. DOI:10.1088/1757-899X/589/1/012026.
- 10. Афанасьев, Б.А. Проектирование полноприводных колесных машин учебник для вузов. Т. 1 / Б.А. Афанасьев, Г.И. Гладов, Л.Ф. Жеглов [и др.]. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 496 с.
- 11. Левенков, Я.Ю. Проектирование направляющего аппарата подвески из алюминиевых сплавов для многоцелевого беспилотного транспортно-технологического средства с использованием метода топологической оптимизации /Я.Ю. Левенков, И.В. Чичекин, Д.С. Вдовин [и др.]. // Труды НАМИ. 2023. №2(293). С.42-59. DOI: 10.51187/0135-3152-2023-2-42-59. EDN: EGSVCS.
- 12. Вдовин, Д.С. Разработка методики создания динамической математической модели квадрицикла для расчета на ранних стадиях проектирования нагрузок, действующих на раму и ходовую часть / Д.С. Вдовин, И.В. Чичекин, Я.Ю. Левенков, А.Б. Фоминых // Труды НАМИ. 2021. № 2 (285). С. 46-57. DOI: 10.51187/0135-3152-2021-2-46-57. EDN: RUAVQH.
- Чичекин, И.В. Разработка математической динамической модели карьерного автосамосвала для определения нагрузок, действующих на раму в заданных режимах эксплуатации / И.В. Чичекин, Я.Ю. Левенков, Г.А. Арутюнян [и др.]. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. №2. С. 127-137. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_2_127
- 14. **Bendsoe, M.P.** Topology Optimization: Theory, Methods and Applications / M.P. Bendsoe, O. Sigmund. Berlin: Springer, 2003. P 365.
- 15. Левенков, Я.Ю. Влияние нагрузочных режимов на силовые схемы несущих элементов карьерных самосвалов, полученные с использованием метода топологической оптимизации / Я.Ю. Левенков, А.М. Устинова [и др.]. // Труды НАМИ. 2022. № 2 (289). С. 73-88. DOI: 10.51187/0135-3152-2022-2-73-88. EDN: SAGQZX.
- 17. Le, C. Stress-based topology optimization for continua / Chau Le, Julian A., Norato, T. Bruns et al. // Struct. Multidiscip. Optim. 2010. Vol. 41, N. 4. P. 605-620.

Дата поступления в редакцию: 19.02.2025

Дата принятия к публикации: 07.05.2025 УДК **629.331**

DOI 10.46960/1816-210X_2025_2_103 EDN RUFFBA

КИНЕТОСТАТИЧЕСКИЙ И СИЛОВОЙ АНАЛИЗ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

И.Р. Мавлеев

ORCID: 0000-0001-8993-5600 e-mail: mirkampi@mail.ru Казанский (Приволжский) федеральный университет (Набережночелнинский институт (филиал)) Набережные Челны, Россия

И.И. Салахов ORCID: 0009-0003-9039-5084 e-mail: udmkpfu210@mail.ru Казанский (Приволжский) федеральный университет (Набережночелнинский институт (филиал)) Набережные Челны, Россия

Предложена методика расчета кинематических и силовых параметров гидромеханических дифференциальных механизмов, определяющих возможность применения их в конструкциях бесступенчатых трансмиссий транспортных средств, вплоть до тяжелых грузовых автомобилей. Выявлены признаки, заложенные в основу классификации гидромеханических дифференциальных механизмов. Определены и проанализированы зависимости распределений потоков мощностей во всем диапазоне угловых скоростей, соответствующие разработанным передачам для заданных кинематических параметров дифференциального гидромеханического механизма. Приведены зависимости между моментами на звеньях гидромеханического дифференциального механизма, определенные по методике анализа работы шестеренных гидромашин. Представлен опытно-промышленный образец гидромеханического дифференциального механизма и один из вариантов сборочного чертежа, примененный в конструкции коробки передач легкового автомобиля малого класса.

Ключевые слова: трансмиссия, гидромеханический дифференциальный механизм, бесступенчатая передача, трансформатор вращающего момента, коробка передач, автоматическая передача, гидромашины, гидропривод.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мавлеев, И.Р. Кинетостатический и силовой анализ гидромеханических дифференциальных механизмов / И.Р. Мавлеев, И.И. Салахов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 2. С. 103-110. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_103 EDN: RUFFBA

KINETOSTATIC AND FORCE ANALYSIS OF HYDROMECHANICAL DIFFERENTIAL MECHANISMS

I.R. Mavleev ORCID: 0000-0001-8993-5600 e-mail: mirkampi@mail.ru Kazan Federal University – Naberezhnye Chelny Institute Naberezhnye Chelny, Russia

I.I. Salakhov ORCID: 0009-0003-9039-5084 e-mail: udmkpfu210@mail.ru Kazan Federal University – Naberezhnye Chelny Institute Naberezhnye Chelny, Russia

Abstract. The article proposes a method for calculating the kinematic and power parameters of hydromechanical differential mechanisms, which determine the possibility of their use in the designs of continuously variable transmissions of vehicles, including heavy trucks. The features underlying the classification of hydromechanical differential mechanisms are identified. The dependencies of the distributions of power flows in the entire range of angular veloci-

[©] Мавлеев И.Р., Салахов И.И., 2025

ties for the developed transmissions and specified kinematic parameters of the differential hydromechanical mechanism are determined and analyzed. The dependencies between moments on the links of a hydromechanical differential mechanism are determined using the method of analyzing the operation of gear hydraulic machines. An experimental industrial model of a hydromechanical differential mechanism and one of the variants of an assembly drawing used in the design of a gearbox for a small-class passenger car are presented.

Key words: transmission, hydromechanical differential mechanism, continuously variable transmission, torque transformer, gearbox, automatic transmission, hydraulic machines, hydraulic drive.

FOR CITATION: I.R. Mavleev, I.I. Salakhov. Kinetostatic and force analysis of hydromechanical differential mechanisms. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 2. Pp. 103-110. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_103 EDN: RUFFBA

Введение

Целью работы является кинематический и силовой анализ дифференциальных гидромеханических механизмов и определение возможности использования их в трансмиссии транспортных средств.

В кинематических схемах автоматических трансмиссий применяются планетарные передачи различных схем. Если все звенья планетарной передачи подвижны, она становится дифференциальным механизмом. Анализ сил и моментов в шестеренчатых гидромашинах определяет и экспериментально подтверждает возможность преобразования последних в гидромеханические дифференциальные механизмы в качестве основы бесступенчатых трансмиссий транспортных средств [1].

Кинематический и силовой анализ механизма

Классификация гидромеханических дифференциальных механизмов необходима для анализа возможностей данного типа передач. В качестве основного квалификационного признака был предложен тип зубчатого зацепления, применяемый в схеме гидромеханического дифференциального механизма. Дополнительным отличительным признаком гидромеханических дифференциальных механизмов является наличие привода входного звена. Также можно выявить влияние на особенности схем таких конструктивных параметров, как кратность действия гидромашины, наличие дополнительных дифференциальных ступеней и число сателлитов. В качестве примера рассмотрим схему гидромеханического дифференциального механизмо и двумя ведомыми сателлитами. На схеме области всасывания и нагнетания гидромашины разделены: для центральной шестерни – прямыми O_1F_1 и O_1F_1 , для ведомых сателлитов O_2F_2 , и $O_2 \cdot F_2 \cdot$ соответственно (рис. 1).

Баланс энергии равномерного вращения шестерен для насоса с ведомыми шестернями определяется по формуле:

$$p_{\mu}dV = (M_1\omega_1 + M_2\omega_2 + M_{2'}\omega_{2'})dt, \qquad (1)$$

где M_1 – момент на приводной шестерне, Н·м; M_2 , M_2 , M_2 , – моменты на ведомых сателлитах, Н·м; ω_1 , ω_2 , ω_2 , ω_2 , – угловые скорости вращения, рад/с.

Момент на центральной приводной шестерне определяется по аналогии для шестеренных гидромашин [2]:

$$M_{1} = p_{H} b \left(\frac{R_{a1}^{2} - \rho_{1}^{2}}{2} + \frac{R_{a1}^{2} - \rho_{1'}^{2}}{2} \right),$$
(2)

где R_{a1} – геометрический параметр центральной шестерни, определяемый по вершинам ее зубьев, м; ρ_1 и ρ_1 – радиусы зацепления, м.



Рис. 1. Кинематическая схема гидромеханического дифференциального механизма с центральным приводом:

ГН – гидронасос; 1 – входной вал; 2, 2' – сателлиты; Н – водило; А и А' – точки зацепления шестерен

Fig. 1. Kinematic diagram of a hydromechanical differential mechanism with a central drive: ΓH – hydraulic pump; 1 – input shaft; 2, 2' – satellites; H – carrier; A and A' – gear engagement points

Моменты на сателлитах гидромеханического дифференциального механизма:

$$M_2 = p_{\rm H} b \, \frac{R_{a2}^2 - \rho_2^2}{2} \,; \tag{3}$$

$$M_{2'} = p_{\mu} b \frac{R_{a2'}^2 - \rho_{2'}^2}{2}, \qquad (4)$$

где R_{a2} , R_{a2} – геометрические параметры сателлитов, определяемые по вершинам их зубьев, м; ρ_2 и ρ_2 – радиусы зацеплений сателлитов, м.

Передача мощности в гидромеханическом дифференциальном механизме осуществляется механическим потоком на водиле и гидравлическим потоком рабочей жидкости в гидронасосе.

Взаимосвязь между моментами определяется по формуле:

$$M_{\Gamma H} + M_{H} + M_{1} + M_{2} = 0, (5)$$

где $M_{\Gamma H}$ – момент на валу гидронасоса, Н·м; M_H – внешний момент, приложенный на водиле дифференциала, Н·м; M'_1 , M'_2 – гидростатические моменты на сателлитах, Н·м.

Введем коэффициент перераспределения моментов на шестернях передачи λ_н:

$$\lambda_{H} = \frac{M_{1}}{M_{2}} = \frac{z_{1} [12 + 3\pi \cos \alpha_{w} \cos(90 - \alpha_{w})] + 12 - \pi^{2} \cos^{2} \alpha_{w}}{z_{1} i_{12} [12 + 3\pi \cos \alpha_{w} \cos(90 + \alpha_{w})] + 12 - \pi^{2} \cos^{2} \alpha_{w}},$$
(6)

где z_1 – число зубьев ведущей шестерни; α_w – угол зацепления, град; i_{12} – передаточное число.

$$M_1 = M_2 \lambda_{\mu}. \tag{7}$$

Согласно принципу возможных перемещений, можно записать соотношение распределения мощностей в следующем виде:

$$N_1 = N_H + N_\Gamma, \tag{8}$$

где N_I – подведенная мощность, кВт; N_H – мощность на водиле (механический поток мощности), Вт; N_{Γ} – мощность гидравлического потока, Вт.

Мощность гидравлического потока определяется по формуле:

$$N_{\Gamma} = M_1 \omega_1 + M_2 \omega_2 \,. \tag{9}$$

Уравнение (9) с учетом коэффициента перераспределения моментов запишется как: $N_{\Gamma} = (M_1 + M_2 \omega_2 / \omega_1) \omega_1 = (M_1 + M_2 i_{21}) \omega_1 = (M_2 \lambda_{\mu} + M_2 i_{21}) \omega_1 = M_2 \omega_1 (\lambda_{\mu} + i_{21}).$ Относительная угловая скорость:

$$\omega_1 = \omega_1 - \omega_H. \tag{10}$$

С учетом выражения (10), гидравлический поток мощности можно определить как:

$$N_{\Gamma} = M_2 \left(\omega_1 - \omega_H \right) \left(\lambda_{\mu} + i_{21} \right). \tag{11}$$

Баланс мощностей можно представить в следующем виде:

$$M_1 \omega_1 + M_H \omega_H + M_2 (\omega_1 - \omega_H) (\lambda_H + i_{21}) = 0.$$
 (12)

или с учетом выражения (11):

$$|M_1\omega_1| = |M_2(1-i_{21})\omega_H| + |M_2(\omega_1 - \omega_H)(\lambda_H + i_{21})|.$$
(13)

Из уравнения (13):

$$M_{2}' = \left| \frac{M_{1}\omega_{1}}{\left| (1 - i_{21})\omega_{H} \right| + \left| (\omega_{1} - \omega_{H})(\lambda_{H} + i_{21}) \right|} \right|.$$
(14)

Анализ формулы (14) позволяет сделать вывод, что наибольшее влияние на момент гидростатических сил сопротивления оказывает внутреннее передаточное число гидронасоса. Задавшись передаточным числом гидронасоса, определяем текущие значения гидравлической и механической мощностей для диапазона угловых скоростей водила от 0 до ω_l (рис. 2). Анализируя уравнение (4), можно также сделать вывод, что угол зацепления α_w зубчатых колес оказывает меньшее влияние на коэффициент λ_{μ} , чем значение передаточного числа гидронасоса, причем при больших значениях передаточного числа это влияние становиться меньше. При этом увеличение числа ведомых колес не сказывается на перераспределении моментов, однако оказывает влияние на пульсацию давления.

Анализ распределения потоков мощности позволяет провести аналогию с конструкциями двухпоточных гидрообъемных передач, применяемых в трансмиссиях транспортных средств специального назначения и гусеничной техники [3]. Также просматривается возможность создания на основе рассмотренных передач гидрообъемных трансформаторов вращающего момента, которые можно применять в гидромеханических коробках передач вместо гидродинамических трансформаторов.



Рис. 2. Распределение потоков мощностей

Fig. 2. Distribution of power flows

Гидромеханические дифференциальные механизмы обратимы, следовательно, их можно использовать как гидронасос или гидромотор, что позволяет на базе этих механизмов

синтезировать бесступенчатые трансформаторы вращающего момента для трансмиссий транспортных средств. Максимальный коэффициент трансформации бесступенчатой трансмиссии, составленный из схем гидромеханических дифференциальных механизмов, определяется гидростатическим моментом на водиле гидронасоса. Силовой и кинематический анализа данных передач позволяет определить наиболее перспективные схемы по изменению максимального момента на водиле (табл. 1).

Таблица 1.

Перспективные схемы гидромеханических дифференциальных механизмов

Table 1.

Prospective schemes of hydromechanical differential mechanisms




В лаборатории Набережночелнинского института КФУ был разработан и испытан опытный образец гидромеханического дифференциального механизма (рис. 3). Испытания подтвердили принцип работы, заложенный в теорию подобных передач, а также легли в основу разработанных трансмиссий для легковых и грузовых транспортных средств.



Рис. 3. Опытный образец гидромеханического дифференциального механизма (гидронасос с шестернями внутреннего зацепления)

Fig. 3. Experimental model of a hydromechanical differential mechanism (hydraulic pump with internal gears)

Опытные исследования подтвердили работоспособность предлагаемых механизмов, а результаты исследований гидромеханического дифференциального механизма были использованы при проектировании автоматической бесступенчатой трансмиссии легкового транспортного средства (рис. 4.) Также в ходе дальнейшего исследования дифференциальных гидромеханических механизмов, а также используя основные свойства дифференциальных механизмов с передаточными числами меньше единицы, была разработаны трансмиссия с дифференциальным делителем [4].



Рис. 4. Конструкции автоматической бесступенчатой трансмиссии легкового транспортного средства

Fig. 4. Designs of automatic continuously variable transmission of a passenger car

Выводы

1. Предложенные гидромеханические дифференциальные механизмы представляют собой новый вариант дифференциальных двухпоточных гидрообъемных механических передачи, обладающих принципиальным отличием, а именно, отсутствием жесткого закрепления на корпусе водила передачи.

2. Гидромеханические дифференциальные механизмы представляют собой шестеренчатые гидромашины с двумя степенями свободы, что обеспечивает возможность регулирования гидравлического и механического потоков мощности. Это, в свою очередь, создает предпосылки для бесступенчатого изменения вращающего момента на выходном валу и открывает перспективы использования их в трансмиссиях транспортных средств.

3. Для автоматической бесступенчатой трансмиссии существуют наиболее рациональные схемы передачи. Выбор той или иной схемы необходимо осуществлять с учетом ряда факторов, таких как тип транспортного средства (легковые, грузовые, специального назначения), плавность работы, возможность работы при высоком КПД в диапазоне автоматического регулирования.

4. Значение максимального момента на водиле (опорного момента) зависит от схемы механизма и представляют собой, с учетом коэффициентов перераспределения моментов, линейные зависимости от внутренних передаточных чисел механизма.

Библиографический список

- 1. I.I. Salakhov, I.R. Mavleev V.V. Voloshko et al. Analysis workflows gear hydraulic machines. Biosciences. Biotechnology Research Asia. 2016. № 13(2). Pp. 779-784. DOI:10.13005/bbra/2097.
- 2. Галеева, Р.А. Объемные гидромашины / Р.А. Галеева, Р.А. Сунарчин. Уфа: УАИ, 1984. 174 с.
- 3. Шарипов, В.М. Конструирование и расчет тракторов / В.М. Шарипов. М.: Машиностроение, 2004. 590 с.
- 4. **Мавлеев, И.Р.** Модульная трансмиссия тяжелых грузовых автомобилей / И.Р. Мавлеев, И.И. Салахов, В.В. Волошко // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. № 2 (121). С. 162-168.

Дата поступления в редакцию: 20.02.2024

Дата принятия к публикации: 06.03.2025 УДК **629.365**

DOI 10.46960/1816-210X_2025_2_111 EDN ZXSDKB

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО КРУИЗ-КОНТРОЛЯ И ЭКСТРЕННОГО ТОРМОЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Б.В. Падалкин

ORCID: 0009-0005-2766-6966 e-mail: padalkin@bmstu.ru Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана *Москва, Россия*

А.А. Стадухин ORCID: **0000-0003-1414-3435** e-mail: **ant.m9@ya.ru** Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана *Москва, Россия*

В.С. Майер

ORCID: 0009-0007-1017-8207 e-mail: vmayer2002@bk.ru Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана *Москва, Россия*

В.Б. Холоденко

ORCID: 0000-0002-3678-608X e-mail: kholodenko@bmstu.ru Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Москва, Россия

Предложен ряд алгоритмов системы управления беспилотной транспортной машины с функциями адаптивного круиз-контроля и автоматического экстренного торможения. Данная система позволяет поддерживать дистанцию до впереди идущего транспортного средства, экстренно останавливаться перед неожиданно возникающим препятствием и поддерживать заданную скорость движения. Описанный алгоритм адаптивного круиз-контроля нацелен на повышение безопасности участников дорожного движения. Преимущество автоматизированной системы управления перед оператором заключается в нивелировании человеческого фактора, а также высокой скорости реакции и точности действий. Представлена математическая модель движения беспилотной машины, предназначенная для проверки и настройки предложенной системы управления, реализующей функции адаптивного круиз-контроля. Используя данные о скорости препятствия и дистанции до препятствия, система может сформировать управляющее воздействие, необходимое для безопасного движения автомобиля, исключая вероятность столкновения. Имитационное компьютерное моделирование показывает работоспособность системы при основных сценариях использования. Приведены данные об экспериментальном исследовании оборудования, предназначенного для проверки предложенных алгоритмов на практике, а также создания полнофункциональной системы управления движения движением беспилотной транспортной машины.

Ключевые слова: адаптивный круиз-контроль, предотвращение столкновений, система безопасности автомобиля, беспилотное вождение, система экстренного торможения.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Падалкин, Б.В. Моделирование системы адаптивного круиз-контроля и экстренного торможения беспилотного транспортного средства / Б.В. Падалкин, А.А. Стадухин, В.С. Майер, В.Б. Холоденко // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 2. С. 111-124. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_111 EDN: ZXSDKB

[©] Падалкин Б.В., Стадухин А.А., Майер В.С., Холоденко В.Б., 2025

UNMANNED VEHICLE ADAPTIVE CRUISE CONTROL AND EMERGENCY BRAKING SYSTEM SIMULATION

B.V. Padalkin

ORCID: 0009-0005-2766-6966 e-mail: padalkin@bmstu.ru Bauman Moscow State Technical University Moscow, Russia

A.A. Stadukhin

ORCID: 0000-0003-1414-3435 e-mail: ant.m9@ya.ru Bauman Moscow State Technical University *Moscow, Russia*

V.S. Mayer ORCID: 0009-0007-1017-8207 e-mail: vmayer2002@bk.ru Bauman Moscow State Technical University *Moscow, Russia*

V.B. Kholodenko ORCID: 0000-0002-3678-608X e-mail: kholodenko@bmstu.ru Bauman Moscow State Technical University Moscow, Russia

Abstract. The paper proposes a number of algorithms for the control system of an unmanned vehicle with adaptive cruise control and automatic emergency braking functions. This system allows to maintain a distance from the vehicle in front, make an emergency stop in front of an unexpected obstacle and maintain a set speed. The described adaptive cruise control algorithm is aimed at improving the road safety. The advantage of the automated control system over an operator is the elimination of the human factor, as well as high reaction speed and accuracy of actions. A mathematical model of the motion of an unmanned vehicle is presented. The model is developed to test and adjust the proposed control system implementing the functions of adaptive cruise control. The system can generate the control action necessary for the safe movement of the vehicle, eliminating the possibility of a collision using data on the speed of the obstacle and the distance to the obstacle. Computer simulation shows the system's performance under basic scenarios. Data on the experimental study of equipment designed to test the proposed algorithms in practice, as well as the results of development a fully functional control system for the movement of an unmanned vehicle are provided.

Key words: adaptive cruise control, collision prevention, vehicle security system, unmanned driving, emergency braking system.

FOR CITATION: B.V. Padalkin, A.A. Stadukhin, V.S. Mayer, V.B. Kholodenko. Unmanned vehicle adaptive cruise control and emergency braking system simulation. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 2. Pp. 111-124. DOI: 10.46960/1816210X_2025_2_111 EDN: ZXSDKB

Введение

Существующие системы адаптивного круиз-контроля и экстренного торможения (ККЭТ) уже находят свое применение в серийных автомобилях и других технических системах. С каждым поколением автомобилей они становятся все более совершенными, поэтому исследования в данном направлении по-прежнему актуальны, особенно в контексте охраны интеллектуальной собственности разработчиков автомобилей и создания подобных отечественных систем (т.е. импортозамещения). Кроме того, ККЭТ являются необходимыми для безопасного функционирования беспилотных транспортных средств (БТС), главное требование к движению которых – безопасность. Использование алгоритмов ККЭТ в системе управления БТС может уменьшить нагрузку на его оператора и снизить опасность для окружающих людей и машин. Типичные задачи беспилотного движения – следование за машиной-

лидером или по обозначенной траектории. С этой целью на автомобиль устанавливаются различные устройства технического зрения, способные распознать дорогу, машины и объекты, а также определить расстояние до различных преград. Применение технического зрения в автомобилях и беспилотных платформах является одним из наиболее исследуемых направлений для транспортной отрасли. В контексте данной статьи наиболее интересны следующие исследования.

В работе [1] приведено описание системы помощи водителю, сформулированы основные проблемы и задачи, связанные с анализом дорожной обстановки, при этом не исследуется случай экстренной остановки перед неожиданно возникающим препятствием. Работа [2] посвящена проблеме разработки алгоритма функционирования адаптивного круиз-контроля, работающего в условиях, меняющихся в широких пределах передаточного отношения трансмиссии и скорости движения грузового автомобиля. Работа [3] содержит исследование эффективности системы управления беспилотным транспортным средством. В работе [4] приведена методика по подбору коэффициентов ПИД регулятора для системы обычного (не адаптивного) круиз-контроля.

В данной статье предлагается рассмотреть вопросы разработки системы ККЭТ БТС, обладающей следующей функциональностью:

- поддержание заданной оператором скорости;
- поддержание скорости машины-лидера с учетом соблюдения безопасной дистанции;
- выполнение экстренной остановки в случае внезапного возникновения препятствия.

Имитационная модель динамики автомобиля как объекта управления

С целью отработки алгоритмов управления торможением и адаптивного круизконтроля была разработана имитационная компьютерная модель прямолинейного движения БТС, структурная схема которой представлена на рис. 1. Прямолинейное движение корпуса машины моделируется с использованием дифференциального уравнения (1). При этом считается, что на корпус действуют только сила воздушного сопротивления P_{wx} и силы продольной реакции опоры R_{xi} , *i*-й оси.

В расчете динамики корпуса ускорение машины \ddot{x} рассчитывается исходя из силы воздушного сопротивления P_{wx} и сил продольной реакции опоры R_{xi} , *i*-й оси (1):

$$m \cdot \ddot{x} = \sum_{i=1}^{2} R_{xi} - P_{wx} \tag{1}$$

где m – масса БТС, кг; R_{xi} – сила продольной реакции опоры і-й оси, H; P_{wx} – сила воздушного сопротивления, H; \ddot{x} – ускорение автомобиля, м/с².

В дальнейшем используется обозначение *а*_{*x*}.

Сила воздушного сопротивления P_{wx} пропорциональна квадрату скорости машины V_x (2):

$$P_{wx} = 0.5 \cdot V_x^2 \cdot c_x \cdot F_l \cdot \rho_v \tag{2}$$

где c_x – аэродинамический коэффициент машины; F_l – площадь лобового сечения, м²; ρ_v – плотность воздуха, кг/м³; V_x – скорость машины, м/с.

Нормальные составляющие реакции опоры R_{z1} и R_{z2} , действующие на колеса, рассчитывается исходя из суммы сил и моментов (3):

$$\begin{cases} R_{z1} = G - R_{z2} \\ R_{z2} = a_x \cdot m \cdot h_c + P_{wx} \cdot h_c + f \cdot G \cdot r_{k0} + G \cdot L \end{cases}$$
(3)

где R_{z1} и R_{z2} – нормальные реакции опоры, действующие на оси, H; L – колесная база БТС, м; G – вес БТС, H; h_c – высота центра масс БТС, м; f – коэффициент сопротивления качению колеса; r_{k0} – свободный радиус колеса, м.



Рис. 1. Структурная схема имитационной модели автомобиля:

h_y и h_т – коэффициенты использования двигателя и тормозной системы;
 M_{дв} и M_т – моменты, получаемый от двигателя и тормозной системы;
 M_c – момент сопротивления прямолинейному движению; R_z и R_x – нормальная и продольная реакции опоры, действующие на колесо; P_w – сила воздушного сопротивления;
 V_x и a_x – линейная скорость и ускорение автомобиля; x₀₆ и V₀₆ – расстояние до препятствия и скорость препятствия; W_{дв} и W_к – угловая скорость ротора двигателя и колеса

Fig. 1. Structural diagram of the vehicle simulation model:

 h_y and h_m – engine and brake system utilization rates; $M_{\partial 6}$ and M_m – moments obtained from the engine and braking system; M_c – moment of resistance to rectilinear motion; R_z and R_x – normal and longitudinal support reactions acting on the wheel; P_w – air resistance force; V_x and a_x – linear velocity and acceleration of the vehicle; $x_{o\delta}$ and $V_{o\delta}$ – distance to the obstacle and speed of the obstacle; $w_{\delta 6}$ and w_{κ} – angular velocity of the engine rotor and wheel

Расчетная схема автомобиля представлена на рис. 2.



Рис. 2. Расчетная схема автомобиля для предложенной модели движения Fig. 2. Computational scheme of the vehicle for the proposed model of movement

Продольную составляющую реакции опоры R_{xi} , *i*-й оси, действующей на колеса, можно определить с помощью выражения (4):

$$R_{xi} = \mu_{si} \cdot R_{zi} \tag{4}$$

где µ_{si} – коэффициент взаимодействия колеса с опорным основанием для i-й оси; R_{zi} – сила нормальной реакции опоры i-й оси, H.

Коэффициент взаимодействия колеса с опорным основанием μ_{si} , i-й оси считается по следующей формуле (5):

$$\mu_{si} = \mu_{smax} \cdot \left(1 - e^{-\frac{S_{ki}}{S_0}}\right) \cdot \left(1 + e^{\frac{S_{ki}}{S_1}}\right)$$
(5)

где μ_{smax} – коэффициент взаимодействия колеса с опорным основанием при полном контакте; S_{ki} – коэффициент скольжения i-й оси; S_0 и S_1 – константы.

Коэффициент скольжения S_{ki} , i-й оси, рассчитывается, исходя из режима движения колеса (6):

$$S_{ki} = \frac{V_{c\kappa i}}{\max(\omega_{\kappa i} \cdot r_{k0}, V_x)}$$
(6)

где V_{cki} – скорость скольжения і-й оси, м/с; ω_{ki} – скорость вращения і-й оси, 1/с.

Момент сопротивления движению M_{ci} , i-й оси, и качению M_f , i-й оси, вычисляются с использованием формул (7 и 8):

$$M_{ci} = M_{fi} + r_{k0} \cdot R_{xi} \tag{7}$$

$$M_{fi} = r_{k0} \cdot f \cdot R_{zi} \tag{8}$$

 M_{ci} – момент сопротивления движению і-й оси, Н·м; M_{fi} – момент сопротивления качению і-й оси, Н·м.

Для простоты силовую установку автомобиля в данной работе предлагается представить в виде источника постоянной механической мощности, с ограничением на максимальный крутящий момент (9):

$$\begin{cases}
M_{\mu} = M_{\mu} + h_{y}, 0 \le \omega_{\mu} < \frac{N_{\mu}}{M_{\mu} + max} \\
M_{\mu} = \frac{N_{\mu}}{\omega_{\mu}} \cdot h_{y}, \frac{N_{\mu}}{M_{\mu} + max} \le \omega_{\mu} < \omega_{\mu} + max
\end{cases}$$
(9)

где $N_{\rm d}$ – мощность двигателя, Вт; $M_{\rm d}$ – момент двигателя, Н·м; $\omega_{\rm d}$ – угловая скорость двигателя, 1/с; $M_{\rm dmax}$ – максимальный момент двигателя, Н·м; $\omega_{\rm dmax}$ – максимальная скорость вращения двигателя, 1/с; $h_{\rm y}$ – степень использования двигателя, меняется в диапазоне 0...1.

Тормозная система также моделируется упрощенно, в соответствии с уравнением (10):

$$M_{\rm T} = h_{\rm T} \cdot M_{\rm Tmax} \tag{10}$$

где $M_{\text{т}max}$ — максимальный момент тормозной системы, Н·м; $h_{\text{т}}$ — степень использования тормозной системы, меняется в диапазоне 0...1.

Трансмиссия моделируется, исходя из системы уравнений (11), для определенности машина считается заднеприводной:

$$\int_{J_1} \dot{\omega}_{\kappa 1} = -M_{\rm T} - M_{\rm c1} \int_{J_2} \dot{\omega}_{\kappa 2} = u_{\rm T} \cdot M_{\rm d} - M_{\rm T} - M_{\rm c2}$$
 (11)

где J_1 и J_2 – приведенные к ведомому и ведущему колесам моменты инерции, кг·м; $\dot{\omega_{k1}}$ и $\dot{\omega_{k2}}$ – угловые ускорения ведомой и ведущей осей, $1/c^2$.

Приведенные к ведомому и ведущему колесам моменты инерции считаются по следующим формулам (12 и 13):

$$J_1 = 2 \cdot J_k \tag{12}$$

$$J_2 = u_{\rm T}^2 \cdot J_{\rm A} + 2 \cdot J_k \tag{13}$$

где $J_{\rm K}$ – моменты инерции каждого колеса, кг·м; $J_{\rm A}$ – моменты инерции двигателя, кг·м; $u_{\rm T}$ – передаточное число трансмиссии.

Передаточное число трансмиссии можно определить с помощью выражения (14):

$$\omega_{\rm d} = \frac{\omega_{\rm K2}}{u_{\rm T}} \tag{14}$$

 $\omega_{\kappa 2}$ – угловая скорость ведущего колеса, 1/с.

Математическая модель работы технического зрения БТС (автомобильного микроволнового радара) представлена системой управлений (15). Исходя из условий эксперимента, выбирается V_0 – начальная скорость, t_{co6} – время начала эксперимента, Δx_0 – дистанция до препятствия в момент времени t_{co6} . До момента времени t_{co6} препятствие находится вне зоны видимости радара, исходя из чего система управления его не учитывает и находится в состоянии обычного круиз контроля. По наступлению t_{co6} система переходит в состояние адаптивного круиз-контроля, принудительного или экстренного торможения.

$$x_{0} = x + 200, t \le t_{co6}$$

$$x_{0} = x + \Delta x_{0} + V_{0} \cdot (t - t_{co6}), t \ge t_{co6}$$
(15)

где x_0 – координата препятствия в абсолютной системе координат, м; Δx_0 – дистанция до препятствия в момент времени t_{cof} , м; V_0 – скорость препятствия, м/с; х – координата БТС в абсолютной системе координат, м; t – текущее время моделирования, с.

Структура системы управления адаптивного круиз-контроля и экстренного торможения

Предлагаемая система ККЭТ задает воздействие на педаль газа или тормоза, исходя из пути, необходимого для остановки машины, а также значений сигналов пропорциональнодифференциального регулятора адаптивного круиз-контроля и пропорционального регулятора обычного круиз-контроля (рис. 3).



Рис. 3. Система управления торможением и ускорением:

h_{aк} и **h**_к – управляющие воздействия адаптивного и обычного круиз-контролей; **V**_k – заданная величина скорости для круиз-контроля; **x**_к – заданная дистанция для адаптивного круиз-контроля; Δ**V** и Δ**x** – ошибки скорости и расстояния; **x**_{ост} – необходимый для остановки путь

Fig. 3. Braking and acceleration control system:

 $h_{a\kappa}$ and h_{κ} – control actions of adaptive and conventional cruise controls; V_{κ} – set speed value for cruise control; x_{κ} – set distance for adaptive cruise control; ΔV and Δx – speed and distance errors; x_{ocm} – distance required to stop Исходя из данных, полученных с радара, можно рассчитать дистанцию необходимую для остановки (16):

$$x_{\rm oct} = \frac{(V_x - V_0)^2}{2 \cdot a_{\rm T}},\tag{16}$$

где $a_{\rm T}$ – максимальное замедление транспортного средства, м·c².

Замедление транспортного средства при торможении можно вычислить по формуле (17):

$$a_{\rm T} = \mathbf{g} \cdot \boldsymbol{\mu}_{100},\tag{17}$$

где μ_{100} – коэффициент сцепления при 100 процентном буксовании; g = 9,81 – ускорение свободного падения, м/с².

Необходимую дистанцию между машиной и препятствием необходимо определить по формуле (18):

$$x_{\Pi} = V_x \cdot 2, \tag{18}$$

Система управления имеет два регулятора: пропорциональный принимает на вход разность между заданной и текущей скоростями и необходим для поддержания скорости, пропорционально-дифференциальный – принимает на вход дистанцию до объекта; пропорциональная составляющая отвечает за сближение машины и препятствия, дифференциальная составляющая отвечает за поддержание БТС скорости, равной скорости движущегося впереди объекта. Алгоритм адаптивного круиз-контроля имеет четыре состояния (рис. 4).



Рис. 4. Алгоритм системы управления Fig. 4. Control system algorithm

Состояние «Круиз-контроль» необходимо для поддержания заданной скорости в то время, когда впереди транспортного средства отсутствует препятствие. Если оно появляется в области действия радара, система переходит в состояние «Адаптивный круиз-контроль». Данное состояние необходимо для следования за препятствием. Для избегания превышения скорости значения пропорционального и пропорционально-дифференциального регуляторов сравниваются между собой. Если дистанция до препятствия меньше, чем 2,5 расчетные дистанции торможения, система переходит в состояние «Принудительное торможение», которое происходит, пока дистанция до препятствия не станет больше, чем 10 расчетных дистанций торможения. Если дистанция до препятствия становится меньше, чем 1,5 расчетные дистанции торможения, система переходит в состояние «Экстренное торможение» и происходит принудительное торможение до полной остановки. Из этого состояния система не может выйти без участия оператора.

Указанные настройки системы управления (временные интервалы и дистанции торможения) выбраны на основе опыта работы с представленной здесь моделью. В реальных условиях настройки следует выбирать исходя из динамики транспортной машины и комфорта участников движения.

Описание вычислительных экспериментов

Были исследованы четыре основные ситуации: остановка перед неожиданно возникающим неподвижным препятствием, преследование неожиданно возникающего неподвижного препятствия, остановка перед неподвижным препятствием, преследование подвижного препятствия. Основные численные параметры эксперимента представлены в табл. 1.

> Таблица 1. Основные численные параметры эксперимента Table 1.

Main numerical parameters of the experiment

	······································
Значения PD регулятора адаптивного круиз-контроля	P = 0,03
	D = 0,2
Значения Р регулятора обычного круиз-контроля	P = 1
Полная масса машины, кг	500
Высота центра масс, м	0,3
Габаритная высота машины, м	1,2
Габаритная ширина машины, м	1,6

По условиям первого эксперимента БТС начинает ускоряться, пока не достигнет скорости 60 км/ч. На 15-й секунде на расстоянии 30 м неожиданно появляется неподвижное препятствие (рис. 5).



Рис. 5. Методика первого эксперимента

Fig. 5. Methodology of the first experiment

Поскольку дистанция до препятствия меньше, чем 1,5 расчетные дистанции торможения, система переходит в состояние «Экстренное торможение» и тормозит до полной остановки (рис. 6).



Рис. 6. Управляющее воздействие, скорость и дистанция до препятствия Fig. 6. Control action, speed and distance to obstacle

По результатам первого эксперимента можно сказать, что транспортное средство незамедлительно перешло в состояние «Экстренное торможение» до полной остановки, что в выбранных условиях эксперимента позволило избежать столкновения. По условиям второго эксперимента на скорости 60 км/ч на расстоянии 30 м неожиданно появляется подвижное препятствие, движущееся в попутном направлении со скоростью 10 км/ч (рис. 7).



Рис. 7. Методика второго эксперимента Fig. 7. Methodology of the second experiment

Так как дистанция до препятствия меньше, чем 2,5 расчетные дистанции, но больше, чем 1,5 расчетные дистанции, система переходит в состояние «Экстренное торможение» и тормозит, пока дистанция до препятствия не станет больше, чем 10 расчетных дистанций торможения. После этого система переходит в состояние «Адаптивный круиз-контроль» и начинает сближение с препятствием, пока не окажется на расстоянии 3 м (рис. 8).



Рис. 8. Степень использования двигателя и тормозной системы, скорость и дистанция до препятствия

Fig. 8. Engine and brake system usage, speed and distance to obstacle

По результатам второго эксперимента можно сказать, что TC незамедлительно переходит в состояние «Принудительное торможение» до момента, пока скорости БTC и препятствия не сравняются, что позволяет избежать столкновения. После этого система управления сократила дистанцию в режиме «Адаптивный круиз-контроль». В процессе эксперимента не было обнаружено перерегулирования или иного процесса негативного характера, способного повлечь аварийную ситуацию. По условиям третьего эксперимента на скорости 60 км/ч на расстоянии 180 м появляется неподвижное препятствие (рис. 9).



Рис. 9. Методика третьего эксперимента Fig. 9. Methodology of the third experiment

Поскольку расстояние до препятствия больше, чем 2,5 расчетные дистанции, система переходит в состояние адаптивного круиз-контроля. Управляющее воздействие пропорционально-дифференциального регулятора больше, чем пропорционального регулятора, поэтому система еще 4 сек движется с максимально разрешенной скоростью, после чего начинает

ее плавно снижать вплоть до полной остановки. Система узнала о препятствии заблаговременно, и перехода в экстренные состояния удалось избежать (рис. 10).







По результатам третьего эксперимента можно сказать, что транспортное средство, не переходя в экстренные режимы, сократило дистанцию, после чего снизило скорость вплоть до полной остановки. В процессе эксперимента не было обнаружено перерегулирования или циклического процесса потенциально способных повлечь аварийную ситуацию.

По условиям четвертого эксперимента на скорости 60 км/ч на расстоянии 180 м появляется подвижное препятствие со скоростью 55 км/ч (рис. 11).



Рис. 11. Методика четвертого эксперимента Fig. 11. Methodology of the fourth experiment

Поскольку расстояние до препятствия больше, чем 2,5 расчетные дистанции, система переходит в состояние адаптивного круиз-контроля. Управляющее воздействие пропорцио-

нально-дифференциального регулятора больше, чем пропорционального регулятора, поэтому БТС до 150 сек движется с максимально разрешенной скоростью, после чего, избегая торможения, начинает ее плавно снижать до скорости движущегося впереди объекта (рис. 12).



Рис. 12. Степень использования двигателя и тормозной системы, скорость и дистанция до препятствия

Fig. 12. Engine and brake system usage, speed and distance to obstacle

По результатам четвертого эксперимента можно сказать, что БТС, не переходя в экстренные режимы, сократило дистанцию, после чего снизило скорость вплоть до скорости препятствия.

Предварительные натурные эксперименты и заключение

С целью подготовки к полноценному натурному испытанию предложенной системы ККЭТ были проведены исследования на специальном стенде (рис. 13). Он состоял из микроволнового радара MR-76 [5], питаемого от отдельного аккумулятора и подключенного к ЭВМ с помощью преобразователя интерфейсов CAN-USB. ЭВМ содержала специальное программное обеспечение, способное получать сигналы от радара и преобразовывать их в декартовы координаты, связанные с радаром. В качестве объектов наблюдения (т.е. «препятствий») выступали люди, которые совершали перемещение по заданным на рис. 13 траекториям с различной скоростью.



Рис. 13. Схема эксперимента:

1 — испытательная установка в составе ЭВМ, микроволнового радара и преобразователя интерфейсов; 2 — траектория перемещения регистрируемых объектов

Fig. 13. Scheme of the experiment:

1- test setup consisting of a computer, microwave radar and interface converter; 2- trajectory of movement of registered objects

Результаты обработки данных, зарегистрированных радаром в процессе эксперимента, представлены на графике (рис. 14).



Рис. 14. Сравнение заданных траекторий объектов и траекторий, полученных с помощью стенда:

1 – заданная траектория объектов, 2 – зарегистрированная стендом траектория объектов

Fig. 14. Comparison of the given trajectories of objects and the trajectories obtained in the experiment:

1 - given trajectory of objects, 2 - registered trajectory of objects

Полученные в результате натурного и вычислительных экспериментов данные позволяют судить о возможности создания на основе представленной аппаратной части и разработанного алгоритма эффективной системы ККЭТ. Данную систему предполагается использовать для увеличения безопасности испытаний макетных образцов транспортных машин, а также для отработки технологии автоматического движения транспортной машины за машиной-лидером.

Библиографический список

- 1. Зайцев, Э.М. Разработка системы адаптивного круиз-контроля // Наука без границ. 2020. Вып. 3. С. 68-75.
- 2. Волков, В.Г. Синтез и нейросетевая реализация ПИ регулятора адаптивного круиз-контроля грузового автомобиля / В.Г. Волков, Д.Н. Демьянов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Вып. 11. С. 707-713.
- 3. **Ho Lee J.**, K. Yeom. Efficient self-driving control for lead vehicle following in a mixed traffic environment. Energy Reports. 2023. Vol. 9. November.
- 4. **Turan, A.** PID controller design with a new method based on proportional gain for cruise control system. Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 2024. Vol. 17, March.
- 5. AEB/ACC Radar MR76 [Электронный ресурс] URL: http://en.nanoradar.cn/Article/detail/id/ 285.html (дата обращения: 20.10.2024).

Дата поступления в редакцию: 04.12.2024

Дата принятия к публикации: 06.03.2025

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Бухнин Алексей Викторович – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Гордеев Максим Михайлович – магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Дубков Иван Андреевич – магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Жучков Роман Николаевич – ведущий научный сотрудник Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики, канд. техн. наук

Козелков Андрей Сергеевич – начальник научно-исследовательского отдела Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики, д-р физ.- мат. наук

Коротченко Анатолий Григорьевич – доцент Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского; канд. физ.-мат. наук

Мелешкин Николай Викторович – старший научный сотрудник Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики

Тимофеева Ольга Павловна – заведующая кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент Сморякова Валентина Михайловна – ассистент Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Стручков Андрей Викторович – старший научный сотрудник Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научноисследовательского института экспериментальной физики, канд. физ.-мат. наук

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Богданова Елена Викторовна – начальник бюро Бюро моделирования и расчетов РУ типа БН, ГТ-МГР, ТВР АО «ОКБМ Африкантов»

Болнов Владимир Анатольевич – заместитель начальника отдела прочности АО «ОКБМ Африкантов»

Гришин Даниил Михайлович – Инженерконструктор 3 категории АО «ОКБМ Африкантов»

Дмитриев Сергей Михайлович – ректор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор

Лапшин Денис Александрович – начальник бюро отдела прочности АО «ОКБМ Африкантов», канд. техн. наук

Малкин Сергей Алексеевич – начальник бюро развития программно-методического обеспечения и взаимосвязанных расчетов АО «ОКБМ Африкантов», канд. техн. наук

Пронин Алексей Николаевич – старший научный сотрудник НИЛ «Научно-исследовательская лаборатория теплогидравлики ядерных энергетических установок нового поколения» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Душкин Максим Александрович – студент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Левенков Ярослав Юрьевич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э Баумана, канд. техн. наук

Мавлеев Ильдус Рифович – доцент Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета, канд. техн. наук

Майер Владимир Сергеевич – студент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Падалкин Борис Васильевич – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э Баумана, д-р техн. наук, доцент

Салахов Ильдар Ильгизарович – доцент Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета, канд. техн. наук

Стадухин Антон Алексеевич – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э Баумана, д-р техн. наук, доцент

Холоденко Вячеслав Борисович – старший преподаватель Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

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.

ется 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

ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

№ 2 (149)

Ответственный редактор: В.И. Казакова

Редакция: 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24 rsl@nntu.ru Свободная цена

Подписано в печать: 07.06.2025 Дата выхода в свет 21.06.2025. Формат 60х84 ¹/₈. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 8,50. Тираж 300 экз. Заказ . Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. Типография НГТУ. Адрес университета и типографии: 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24