

**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*

**№ 3 (142)**

**Нижний Новгород 2023**

УДК 050(06)  
ББК 9я54  
Т 78

Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2023. № 3 (142). – 136 с.

*Выходит 4 раза в год*

### **Журнал включен ВАК при Минобрнауки России**

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

**Главный редактор А.А. Куркин**

### **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Члены редколлегии: Н.Ю. Бабанов, В.В. Беляков, В.А. Горбунов, С.М. Дмитриев, Н.Ю. Золотых, Г.О. Котиев, В.Н. Ланцов, М.А. Легчанов, В.С. Макаров, В.Р. Милов, 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 и управление в технических и социальных системах»  
**М.А. Легчанов** – ответственный секретарь рубрики «Энергетические системы и комплексы»  
**В.С. Макаров** – 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**

<i>Пелиновский Дмитрий Ефимович</i>	PhD, проф. математики, Университет Мак Мастер, Гамильтон, Онтарио, Канада
<i>Палкович Ласло</i>	Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия
<i>Варлаки Петер</i>	Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия
<i>Виджай Кумар Чакка</i>	PhD, проф., Университет Шив Надар, Индия
<i>Ялчинер Ахмет</i>	д., проф., METU, директор OERC, Турция

### **УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:**

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

Электронная версия журнала:  
<https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-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, 2023

**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*

**№ 3 (142)**

**Nizhny Novgorod 2023**

*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.N. Lantsov, V.S. Makarov, V.R. Milov, 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 «Informatics and Management in Technical and Social Systems»

**M.A. Legchanov** – Executive Secretary of the Section «Energy Systems and Complexes»

**V.S. Makarov** – Executive Secretary of the Section «Mechanical Engineering and Transport»

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

**EDITORIAL COUNCIL**

**Chairman**

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

**Members of Editorial Council**

***Pelinovski Dmitri***

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

***László Palkovics***

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

***Péter Várlaki***

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

***Vijay Kumar Chakka***

PhD, Doctor of Philosophical Science, Professor  
Shiv Nadar University (India)

***Yalciner Akhmet***

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

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

*Electronic version of the journal:  
<https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva>*

© Nizhny Novgorod State Technical University  
n.a. R.E. Alekseev, 2023



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ</b> .....	<b>7</b>
<b>Катаева Л.Ю., Масленников Д.А.</b> Оптимизация загрузки вагона на основе динамического программирования с мемоизацией и коэффициентом неудобства .....	<b>7</b>
<b>Кокоулина М.В., Епифанова А.С., Куркина О.Е., Куркин А.А., Винокуров М.С., Епифанов С.А.</b> Океанографическая геоинформационная онлайн-система для расчета и анализа характеристик внутренних волн в стратифицированных бассейнах .....	<b>18</b>
<b>Кузнецов И.В., Халиман В.В., Фалеева Е.В., Пономарчук Ю.В.</b> Анализ алгоритмов шумоподавления и классификации при распознавании движений на базе поверхностной электромиографии .....	<b>30</b>
<b>Тимофеева О.П., Гордеев М.М., Санников А.Н.</b> Графовые нейронные сети в решении задач с сетевой структурой .....	<b>43</b>
<b>ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ</b> .....	<b>51</b>
<b>Волков В.Ю., Голибродо Л.А., Крутиков А.А., Кудрявцев А.Ю.</b> Моделирование конвекции Релея-Бенара в кубической полости с использованием коммерческих кодов ANSYS CFX и STAR-CCM+ .....	<b>51</b>
<b>Дикова Т.С., Цветкова Д.Д., Терехова А.М.</b> Исследование топлива с кюриевой фракцией в реакторе РБЕЦ .....	<b>63</b>
<b>Полуничев В.И., Кабина М.С.</b> Исследование процессов растворения, выделения и переноса газов в первом контуре реакторных установок и их влияния на точность поддержания давления в первом контуре .....	<b>71</b>
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО</b> .....	<b>82</b>
<b>Акрамов Б.Н., Исматов И.А.</b> О кинематических возможностях замкнутых зубчатых дифференциальных механизмов с цилиндрическими колесами .....	<b>82</b>
<b>Баженов Е.Е., Бондарь В.Н., Крудышев В.В., Новопашин Л.А.</b> Алгоритм управления силовыми потоками в трансмиссии сочлененной транспортной системы на основе нечеткой логики .....	<b>90</b>
<b>Коростелев С.А., Талалаев Д.В., Лишин А.В.</b> Оценка режимов нагружения упругих элементов подрессоривания силовой установки лесохозяйственного трактора .....	<b>105</b>
<b>Назаренко С.В., Косицын Б.Б., Падалкин Б.В., Стадухин А.А.</b> Метод определения закона энергоэффективного движения беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках .....	<b>116</b>
<b>НАШИ АВТОРЫ</b> .....	<b>131</b>

## CONTENTS

<b>COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS .....</b>	<b>7</b>
<b>L.Yu. Kataeva, D.A. Maslennikov.</b> Optimization of wagon loading based on dynamic programming with memoization and inconvenience factor .....	7
<b>M.V. Kokoulina, A.S. Epifanova, O.E. Kurkina, A.A. Kurkin, M.S. Vinokurov, S.A. Epifanov.</b> Oceanographic online geo-information system for calculation and analysis of the internal wave characteristics in stratified basins .....	18
<b>I.V. Kuznetsov, V.V. Haliman, E.V. Faleeva, Yu.V. Ponomarchuk.</b> Analysis of noise reduction and classification algorithms for motion recognition based on surface electromyography .....	30
<b>O.P. Timofeeva, M.M. Gordeev, A.N. Sannikov.</b> Graph neural networks in solving problems with a network structure .....	43
 <b>NUCLEAR POWER AND ATOMIC POWER ENGINEERING .....</b>	 <b>51</b>
<b>V.Yu. Volkov L.A. Golibrodo, A.A. Krutikov, A.Yu. Kudryavtsev.</b> Simulation of Rayleigh-Benard convection in a cubic cavity using commercial codes ANSYS CFX and STAR-CCM+ ....	51
<b>T.S. Dikova, D.D. Tsvetkova, A.M. Terekhova.</b> Study of fuel with a curium fraction in the RBEC reactor .....	63
<b>V.I. Polunichev, M.S. Kabina.</b> Investigation of the processes of dissolution, release and transfer of gases and their influence on the accuracy of maintaining pressure in the primary circuit of reactor plants .....	71
 <b>MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION .....</b>	 <b>82</b>
<b>B.N. Akramov, I.A. Ismatov.</b> On kinematic capabilities of closed gear differential mechanisms with cylindrical wheels .....	82
<b>E.E. Bazhenov, V.N. Bondar', V.V. Krudyshev, L.A. Novopashin.</b> Power flow control algorithm based on fuzzy logic for transmission of an articulated transport system .....	90
<b>S.A. Korostelev, D.V. Talalaev, A.V. Lishin.</b> Analysis of strain modes of the elastic elements of the forestry tractor power unit suspension system .....	105
<b>S.V. Nazarenko, B.V. Kositsyn, B.V. Padalkin, A.A. Stadukhin.</b> Method for determining the law of energy efficient movement of an unmanned wheeled vehicle during cyclic cargo transportation .....	116
 <b>AUTHORS .....</b>	 <b>131</b>

---

## ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

---

УДК 656.2

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_7

### ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАГРУЗКИ ВАГОНА НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ С МЕМОИЗАЦИЕЙ И КОЭФФИЦИЕНТОМ НЕУДОБСТВА

**Л.Ю. Катаева**ORCID: 0000-0001-9217-9324 e-mail: [kataeval2010@mail.ru](mailto:kataeval2010@mail.ru)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
Филиал Самарского государственного университета путей сообщения  
в г. Нижнем Новгороде  
*Нижний Новгород, Россия*

**Д.А. Масленников**ORCID: 0000-0002-7819-4007 e-mail: [dmitrymaslennikov@mail.ru](mailto:dmitrymaslennikov@mail.ru)

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

На основе решения типовых задач упаковки показано, что классические эвристики хорошо работают для упаковки разнообразных объектов по размеру и уступают предложенному методу на основе программирования с мемоизацией и определением коэффициента неудобства для каждого типа объектов при большом количестве размещаемых объектов каждого типа. Отличительная особенность данной задачи – наличие большого количества грузов с ограниченным набором их типов. Для решения можно использовать метод динамического программирования, суть которого можно свести к рекурсивному разбиению загружаемого вагона размещаемым объектом на подконтейнеры по плоскостям. В дальнейшем вагон также может называться подконтейнером. Недостатком такого подхода является избыточное разбиение пространства за счет гильотинной резки даже в случае отсутствия ее необходимости, что несколько снижает эффективность упаковки, но позволяет получить оптимальное решение в такой постановке. Предлагаемый алгоритм позволяет осуществить более плотную упаковку, минимизируя количество используемых контейнеров. Предложенное решение актуально в условиях интенсификации эксплуатации подвижного состава и перехода на высокоскоростное движение, особенно при использовании прямоугольных объектов.

**Ключевые слова:** загрузка вагона, оптимизация, динамическое программирование, коэффициент неудобства.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Катаева, Л.Ю. Оптимизация загрузки вагона на основе динамического программирования с мемоизацией и коэффициентом неудобства / Л.Ю. Катаева, Д.А. Масленников // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 7-17. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_7

### OPTIMIZATION OF WAGON LOADING BASED ON DYNAMIC PROGRAMMING WITH MEMOIZATION AND INCONVENIENCE FACTOR

**L.Yu. Kataeva**ORCID: 0000-0001-9217-9324 e-mail: [kataeval2010@mail.ru](mailto:kataeval2010@mail.ru)

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Branch of Samara State Transport University in the city of Nizhny Novgorod  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**D.A. Maslennikov**

ORCID: **0000-0002-7819-4007** e-mail: **dmitrymaslennikov@mail.ru**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Under conditions of more intensive operation of rolling stock and transition to high-speed traffic, the issues of more efficient operation of rolling stock become urgent. The use of typical rectangular objects for transportation makes this task urgent. A distinctive feature of the problem under consideration is the presence of a large number of cargoes with a limited set of types. To solve this problem we can use the method of dynamic programming, the essence of which can be reduced to the recursive division of the loaded wagon by the placed object into subcontainers on the planes. Hereafter, the wagon can also be referred to as a subcontainer. The disadvantage of this approach is excessive space partitioning due to guillotine cutting, even if it is not necessary, which somewhat reduces the efficiency of packaging, but it allows us to obtain an optimal solution in this formulation. It is shown that classical heuristics work well for packing objects of different sizes and give way to the proposed method based on programming with memoization and defining inconvenience coefficients for each type of objects with a large number of objects of each type. This allows for more dense packing by minimizing the number of containers used.

**Key words:** loading of a railway car, optimization, dynamic programming, inconvenience coefficient.

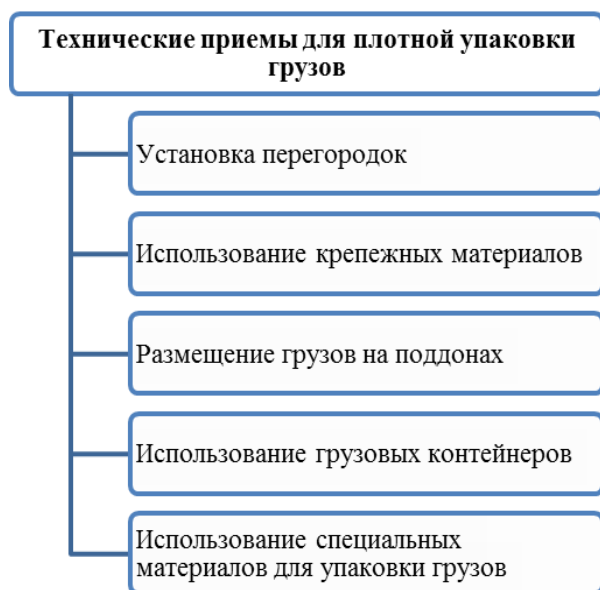
**FOR CITATION:** L.Yu. Kataeva, D.A. Maslennikov. Optimization of wagon loading based on dynamic programming with memoization and inconvenience factor. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 3. Pp. 7-17.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_7

## Введение

Решение задачи оптимального размещения грузов в вагоне позволяет увеличить эффективность их эксплуатации и существенной экономии ресурсов. Данные задачи являются NP-трудными задачами и даже при применении эвристических методов достаточно сложны для 3D-случая [1, 2]. Разработанные алгоритмы для данной задачи [3, 4] и комбинаторные методы имеют экспоненциально растущую сложность [5]. Динамическое программирование позволяет оценивать последствия каждого шага на горизонт вплоть до полного решения, однако данный подход применяется для более простых задач (упаковка груза в одномерные контейнеры). Следует отметить всплеск интереса к таким задачам, начиная с 2012 г., что может объясняться появлением новых технических перспектив полной автоматизации процесса погрузки и новых возможностей вычислительных технологий [6-9]. Наибольшее количество научных исследований проводится в сфере разработки алгоритмов решения задачи о размещении блоков заданных размеров в контейнере-параллелепипеде.

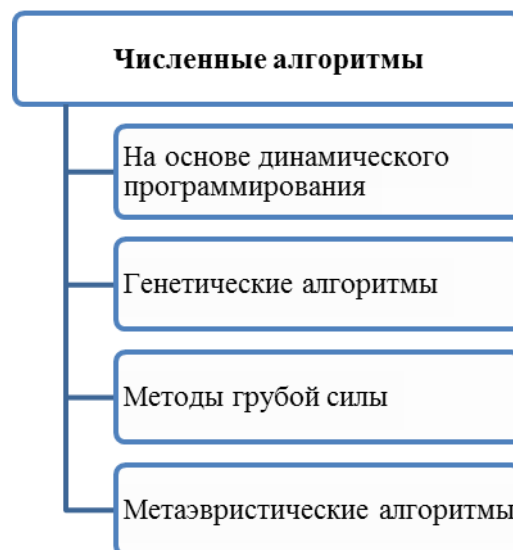
Начиная с первых железнодорожных перевозок и по настоящее время, люди постоянно обращаются к задаче об оптимальной загрузке вагонов при перевозке грузов. На заре развития перевозок люди использовали технические приемы, позволяющие обеспечить безопасность и сохранность грузов (рис. 1). Впоследствии появление вычислительных машин и развитие математической науки позволило создать большое разнообразие алгоритмов для решения поставленной задачи (рис. 2).

Алгоритмы, в основе которых лежит динамическое программирование в качестве целевой функции, как правило, используют минимизацию затрат на перевозки при заданных ограничениях. Эволюционные принципы используются при реализации различных видов генетических алгоритмов с учетом доступного пространства для укладки грузов и ограничений на размеры ящиков. Методы грубой силы по своей сути являются алгоритмами перебора всех возможных вариантов укладки. Такие методы работают медленно и, как правило, с ограниченным набором ящиков. Эвристические алгоритмы (рой частиц, отжиг и др.) используют, по сути, стохастический поиск. Они более производительны и не имеют жестких размеров на количество укладываемых предметов и их разнообразие. При этом следует отметить, что каждый из данных численных алгоритмов находит применение в решении рассматриваемого класса задач в зависимости от конкретных условий.



**Рис. 1. Наиболее распространенные технические приемы, применяемые на железнодорожном транспорте**

**Fig. 1. The most common technical methods used in rail transport**



**Рис. 2. Численные алгоритмы для решения задачи оптимизации упаковки грузов**

**Fig. 2. Numerical algorithms for solving the problem of packing optimization**

Эффективность каждого из перечисленных методов зависит от ограничений на размеры и количество, требований к оптимальности, количеству укладываемых грузов и др. Именно большое количество параметров задачи определяет, какой из перечисленных алгоритмов наиболее приемлем в конкретном случае. При этом надо учитывать, что методы полного перебора весьма неэффективны при больших наборах данных и конкретных требованиях к результату, зато генетические и метаэвристические методы с данными задачами справляются более успешно. Для упрощения алгоритмов и увеличения их эффективности при решении задачи о загрузке вагона группами контейнеров разного размера можно использовать наборы ключевых эвристик и их комбинаций (рис. 3).

В настоящее время, в связи с возросшим грузооборотом на транспорте, возрастает интерес к задаче об оптимальной загрузке вагонов. С одной стороны, разработка современных алгоритмов позволит не только решить задачу эффективной упаковки грузов в вагоне, но и даст возможность автоматизировать сам процесс погрузки, создавая карту последовательности с указанием места положения каждого груза. С другой стороны, более плотная укладка уменьшает вероятность повреждения груза и обеспечивает сбалансированное распределение груза с учетом центра тяжести вагона и равномерного распределения нагрузки по вагону. Все это может повысить безопасность и надежность перевозки грузов. Напротив, в результате неправильной укладки грузов в вагоне ущерб может быть причинен не только грузоотправителю и грузополучателю, но также и компании, осуществляющей перевозку.

Особо отметим, что при нарушениях правил перевозки опасных грузов последствия могут сказаться не только на экономике региона, но и страны в целом. Вот почему авторы полагают, что решение данной задачи на современном этапе развития железнодорожного транспорта становится основой эффективности и экономичности транспортировки грузов. Существующие алгоритмы предназначены для упаковки грузов различных размеров, а случай ограниченного количества типов предметов недостаточно исследован. Эти алгоритмы далеко не совершенны и имеют ряд ограничений, не способствующих их успешному внедрению в процесс полной автоматизации процесса загрузки вагонов. В то же время развитие ма-

тематики и техники позволяет взглянуть на решение задачи оптимальной загрузки вагонов по-новому, находя нетривиальные решения для задачи загрузки вагонов типовыми грузами.

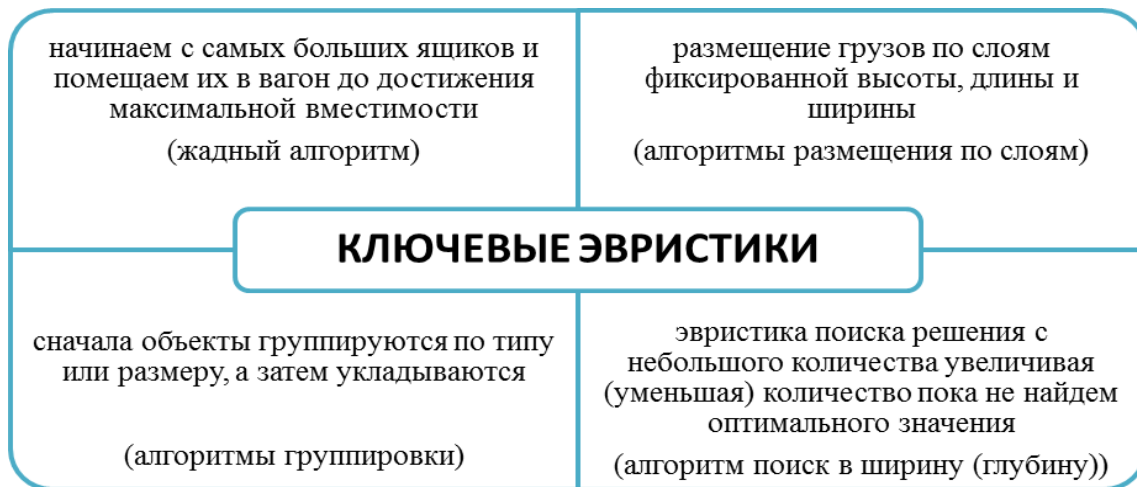


Рис. 3. Эвристики, часто используемые при решении задачи оптимизации загрузки вагона

Fig. 3. Frequently used heuristics used in solving the wagon load optimization problem

Цель данного исследования – разработка более простого подхода к решению задачи оптимальной загрузки вагонов ограниченным набором типов грузов при их количестве введением алгоритма склейки подконтейнеров, снижения размерности задачи до трех и снятия ограничения на горизонт планирования.

### Формулировка задачи об оптимальной загрузке вагонов ограниченным набором типов грузов при неограниченном их количестве и методы ее решения

Предположим, что имеется множество вагонов, в каждом из которых есть пространство для груза в форме прямоугольного параллелепипеда. Требуется загрузить все имеющиеся объекты в минимально возможное количество вагонов. В качестве целевой функции рассматривается отношение объема объектов к отношению объема использованных вагонов. Для теоретического исследования при вычислении целевой функции объем последнего вагона принимается равным объему груза в нем. Этот прием позволяет более сравнивать различные алгоритмы размещения груза.

Рассматривается задача размещения  $n$  типов объектов с размерами  $c_{i,j}$ , в минимально возможное количество контейнеров с размерами  $b_j$ . Для каждого объекта также определяются допустимые варианты вращения. Количество каждого типа объекта  $q_i$ . Общее количество объектов  $h$ . Код допустимых типов вращения  $req_i$ . Центр масс каждого объекта соответствует его геометрическому центру.  $i = \overline{1, n}$  – номер типа объекта,  $j = \overline{1, 3}$  – номер координаты. Вращение груза рассматривается как перестановка размеров  $[c_{i,1}, c_{i,2}, c_{i,3}]$ . Код допустимых типов вращения определяет допустимые значения типов поворота для всех объектов соответствующего типа с учетом соотношений:

$$req_i = \begin{cases} 1, & \text{запрещено вращать данный объект} (r = 1) \\ 2, & \text{разрешается горизонтальное вращение} (1 \leq r \leq 2) \\ 3, & \text{разрешается любое вращение} (1 \leq r \leq 6) \end{cases}$$

Типы поворотов  $r = \overline{1,6}$  определяются перестановками размеров соответственно  $[c_{i,1}, c_{i,2}, c_{i,3}] [c_{i,2}, c_{i,1}, c_{i,3}] [c_{i,1}, c_{i,3}, c_{i,2}] [c_{i,3}, c_{i,1}, c_{i,2}] [c_{i,2}, c_{i,3}, c_{i,1}] [c_{i,3}, c_{i,2}, c_{i,1}]$ .

Постановка не включает требования к наличию опоры для последующих объектов, т.е. допустимо размещение объектов, при котором они не перекрываются друг с другом, не выходя за границы контейнера. Решением задачи оптимизации является определение числа контейнеров  $n_b$ , для каждого объекта номера контейнера, куда его следует разместить, типа поворота и положения. Формально такое решение представляется набором переменных  $n_b$  – число контейнеров;  $x_{m,0}$  – номер контейнера, в который помещается объект;  $x_{m,1}, x_{m,2}, x_{m,3}$  – минимальные координаты объекта в контейнере,  $r_m$  – тип поворота;  $m$  – номер объекта. Для формулирования ограничения обозначим координаты каждого объекта как номер контейнера и координаты в нем, что задает пространство  $\{1, 2, \dots, n_b\} \times R^3$ . Номер контейнера обозначается нулевой координатой, а пространственное положение координатами от 1 до 3. В таком пространстве множество точек контейнера определяется соотношением:

$$B_i = \{p \in \{1, 2, \dots, n_b\} \times R^3 \mid (p_0 = t) \wedge (0 \leq p_1 \leq b_1) \wedge (0 \leq p_2 \leq b_2) \wedge (0 \leq p_3 \leq b_3)\}.$$

Множество точек объекта определяется:

$$O_m = \{p \in \{1, 2, \dots, n_b\} \times R^3 \mid (p_0 = x_{m,0}) \wedge (x_{m,1} \leq p_1 \leq x_{m,1} + c_{m(i,r_1)}) \wedge (x_{m,2} \leq p_2 \leq x_{m,2} + c_{m(i,r_2)}) \wedge (x_{m,3} \leq p_3 \leq x_{m,3} + c_{m(i,r_3)})\}$$

где  $c_{m(i,r_j)}$  – размеры объекта  $m$ . Тройка чисел  $(i, r, j)$  определяет соответственно номер типа объекта, номер поворота и номер координаты.

Ограничения, накладываемые на размещение объектов в контейнерах:  $\forall m_1, m_2, m_1 \neq m_2 : \mu(O_{m_1} \cap O_{m_2}) = 0$ , где  $\mu$  – мера множества, соответствующая объему множества. Это ограничение требует, чтобы объекты не перекрывались, при этом допускается только пересечение границ объектов. В данной постановке предметы не могут выходить за границы контейнеров, а также запрещено размещать предметы в большем числе контейнеров, чем было выбрано  $\forall m : \mu\left(O_m \setminus \left(\bigcup_{t=1}^{n_b} B_t\right)\right) = 0$ .

Целью размещения является минимизация числа используемых контейнеров для размещения всех объектов. Для более эффективного сравнения различных подходов к решению задачи в качестве целевой функции, из числа использованных контейнеров вычитается доля незанятого объема в последнем контейнере. Такой подход позволяет выявить более эффективный метод упаковки объектов, даже если он не привел к уменьшению числа контейнеров. Целевая функция определяется соотношением  $F = n_b - 1 + V \rightarrow \min$ , где  $V$  – доля объема последнего контейнера, заполненного объектами.

В данной работе рассматривается случай ограниченного количества размеров однотипных прямоугольных объектов. Для ее решения можно использовать метод динамического программирования, суть которого сводима к рекурсивному разбиению контейнера размещаемым объектом на подконтейнеры по плоскостям. В дальнейшем контейнер также может называться подконтейнером. Недостатком такого подхода является избыточное разбиение пространства за счет гильотинной резки даже в случае отсутствия ее необходимости, что несколько снижает эффективность упаковки, но позволяет получить оптимальное решение в такой постановке. Еще одним недостатком классического подхода динамического программирования является увеличение размерности таблицы для хранения результатов на число типов объектов, что может приводить к неприемлемому увеличению объема вычислений и оперативной памяти.

Для устранения описанных недостатков в данной работе предложено отказаться от учета числа оставшихся предметов и введения алгоритма склейки подконтейнеров, имеющих

общую грань. Вместо учета числа оставшихся объектов используется бинарная переменная, показывающая, есть ли предметы данного типа, которые следует упаковать. Недостаток такого подхода проявляется в случае, когда объекты данного типа закончились, в алгоритм динамического программирования оценивал каждый подконтейнер с учетом возможности размещения объектов этого типа. В этом случае алгоритм динамического программирования пересчитывает ценность объемов уже без учета возможности размещения данного предмета, что приводит к снижению эффективности упаковки. Достоинством данного подхода является снижение размерности таблицы в алгоритме динамического программирования до размерности геометрии, что дает возможность выполнять решение за разумное время. В отличие от известных эвристик, такой подход позволяет оценить эффект укладки в контейнер каждого объекта без ограничения горизонта планирования.

Проблему необоснованного разделения объемов за счет гильотинного разреза можно смягчить путем введения процедуры склеивания объемов, имеющих смежные грани. Суть этой процедуры состоит в том, что при разбиении объема на подконтейнеры выполняется проверка того, есть ли у него общая грань со всеми остальными незаполненными подконтейнерами. В этом случае происходит объединение двух смежных подконтейнеров в один. За счет использования хэш-таблиц время выполнения данного процесса не зависит от числа проверяемых подконтейнеров. Процедура склеивания позволяет существенно увеличить эффективность упаковки объектов. Алгоритм динамического программирования не учитывает повышение эффективности упаковки за счет склейки подконтейнеров, что может приводить к недооценке склеиваемых объемов. Данный недостаток сглаживается в случае, если алгоритм может размещать сразу группу однотипных объектов. В этом случае уменьшается потребность в склеивании подконтейнеров и их оценка более точна.

Предложенный в данном исследовании алгоритм динамического программирования реализован в отдельной функции  $DP$ . В классическом варианте реализации данного метода объем вычислений напрямую зависит от структуры таблицы для хранения промежуточных результатов. Размерность таблицы определяется как сумма числа измерений геометрии и типов объектов (если они учитываются в таблице), что может приводить к нарастанию вычислительной сложности, выходящей за пределы практической применимости. В настоящей работе применяется упрощенная версия алгоритма, которая не учитывает количество оставшихся предметов. Это позволяет сократить размерность задачи до размерности геометрии. Для повышения производительности используется мемоизация, благодаря этому вычисления выполняются только для тех размеров подконтейнеров, которые используются.

В качестве входных аргументов выступают вектор ( $B$ ), состоящий из значений размеров анализируемого контейнера (подконтейнера), бинарный вектор ( $Q$ ), показывающая для каждого типа объекта его наличие или отсутствие и вектор весов объектов ( $W$ ), показывающий ценность единицы объема для каждого объекта, предназначенный для работы различных эвристик. Выходными аргументами в рамках одной задачи однозначно определяются для подконтейнера с размерами  $B$  с учетом возможности положить в него доступные объекты согласно вектору  $Q$  и их весам  $W$  являются оценка ( $v$ ) подконтейнера (то есть максимальная ценность объектов, которую можно достичь, размещая объекты в подконтейнере с точки зрения алгоритма динамического программирования), вектор ( $P$ ), содержащий число объектов каждого типа, размещаемых в подконтейнере, номер типа объекта ( $ib$ ), размещение которого в углу данного подконтейнера обеспечит максимальную оценку всего подконтейнера, номер перестановки размеров объекта ( $rb$ ), соответствующий его вращению (может принимать целые значения от 1 до 6 по числу перестановок трех размеров)

Для решения поставленной задачи на первом этапе необходимо проверить, есть ли вычисленный результат для данного набора аргументов ( $B, Q, W$ ), к которому имеется доступ в кэше. Если результат уже есть, он может быть использован без повторного вычисления. Если результат отсутствует в кэше, происходит переход к алгоритму, и результаты вычислений добавляются в кэш.



Далее, для каждого объекта и возможных способов его расположения выполняется попытка поместить его в текущий подконтейнер. Если это возможно, оставшееся пространство разбивается на три подконтейнера. Затем для каждого из них рекурсивно запускается алгоритм с теми же значениями аргументов  $Q$  и  $W$ . Таким образом, для объекта  $i$  и его поворота  $r$  определяется следующая величина:

$$v_{i,r} = (c_{i,1}c_{i,2}c_{i,3})W_i + DP(B_x, Q, W) + DP(B_y, Q, W) + DP(B_z, Q, W),$$

где  $B_x, B_y, B_z$  – представляют собой размеры прямоугольных подконтейнеров, которые вместе с объектом под номером  $i$  и с учетом его поворота  $r$  полностью заполняют контейнер  $V$ . Значения функции  $DP$  вычисляются рекурсивно с учетом кэширования. После проведения описанной процедуры для всех типов объектов и всех их допустимых поворотов, определяются значения  $i$  и  $r$ , которые обеспечат максимальное значение оценки подконтейнера ( $v$ ). Такое решение является оптимальным с точки зрения динамического программирования.

Разработанный алгоритм решения задачи оптимизации загрузки обладает весьма полезной особенностью – возможностью совмещения с другими эвристиками и метаэвристиками. Наличие индикатора эффективности размещения каждого эффекта, работающего без ограничения горизонта планирования, может быть добавлено в качестве корректирующего коэффициента, что может повысить эффективность использования эвристик. Добавление каждого объекта в контейнер не требует полного пересчета таблицы динамического программирования, что обеспечивает высокую производительность при совмещении данного результата с эвристиками.

Для повышения эффективности работы алгоритма вводится величина характеризующая неудобство объекта для загрузки, которые будут в последствии загружаться последними. Для объекта типа  $i$  относительное неудобство ( $W_i$ ) вычисляется по формуле и определяет его ценность:

$$W_i = (b_1b_2b_3) / DP(b, Q_i, W'),$$

где  $Q_i$  – вектор из  $n$  элементов, в котором координата с номером  $i$  равна 1, а остальные 0,  $W' = 1$  – вектор из  $n$  единиц.

Полученная оценка соответствует части объема контейнера, который может быть заполнен, используя только предметы одного типа. Чем больше заполненная объемная доля контейнера, тем более удобным считается этот тип объектов. По результатам вычислений вес каждого объекта назначается равным относительному неудобству ( $W_i$ ). Использование данной эвристики приводит к приоритетному помещению неудобных объектов. Удобные объекты помещаются в том случае, когда это способствует заполняемости контейнера за счет комбинирования типов объектов.

На следующем этапе переходим к алгоритму «Размещение объектов». При создании нового контейнера, весь его объем помещается в единственный подконтейнер в стеке. Для верхнего подконтейнера применяется функция «Динамическое программирование» с учетом текущих весов и доступных на данный момент типов объектов, с помощью которой определяется, какой объект и в каком положении следует разместить. Если таких объектов нет, данный подконтейнер удаляется. В противном случае выполняется помещение объекта, а оставшееся пространство разбивается на три подконтейнера методом, аналогичным описанному в алгоритме динамического программирования. После этого каждый новый подконтейнер добавляется в стек и выполняется поиск подконтейнеров со смежными гранями. Если поиск завершается успехом, выполняется их слияние. Это снижает негативные эффекты от гильотинного разбиения пространства. Если объекты всех типов закончились, то задача решена. Если в данном контейнере не остается подконтейнеров, контейнер считается полностью упакованным, и для оставшихся объектов создается следующий контейнер.

### Результаты исследования и их обсуждение

Для тестирования предложенного алгоритма была рассмотрена модельная задача по укладке 8-ми предметов  $W1$  размерами  $10 \times 10 \times 2$  и 16-ти предметов  $W2$  размерами  $2 \times 2 \times 2$  без ограничений вращения в контейнеры размером  $12 \times 12 \times 12$ . Данная задача имеет оптимальное решение, сводящееся к полной загрузке одного контейнера всеми имеющимися предметами. Схема размещения показана на рис. 4. Это решение очевидно является оптимальным. Решение, основанное на методе [10, 11] обеспечивает загрузку только 4 из 8 предметов  $W1$  и 16 предметов  $W2$ , что соответствует заполняемости 53,7 %.

Основной причиной высокой эффективности алгоритма, предложенного в настоящей работе для данного примера, является его способность оценивать ценность подконтейнеров с учетом возможности размещения в них объектов на полную глубину планирования. Однако данное преимущество имеет место только для ограниченного класса задач с большим количеством однообразных объектов. Для более детального исследования работы алгоритма в реальных условиях рассматривался типичный вагон, представленный на рис. 5 и имеющий размеры  $15724 \times 2764 \times 3050$  мм, его вес 26 т, а объем  $138 \text{ м}^3$ . Исходные данные для задачи приведены в табл. 1, а загруженность вагонов – в табл. 2.

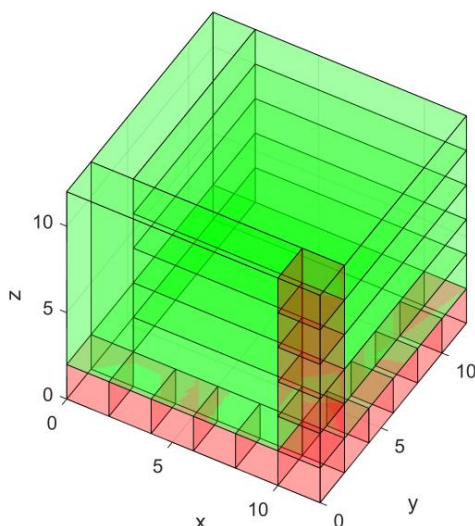


Рис. 4. Схема размещения объектов для модельной задачи

Fig. 4. Layout of objects for the model problem



Рис. 5. Крытый типовой вагон

Fig. 5. Covered typical wagon

**Таблица 1.**  
**Характеристики контейнеров и объектов**

**Table 1.**  
**Containers and objects characteristics**

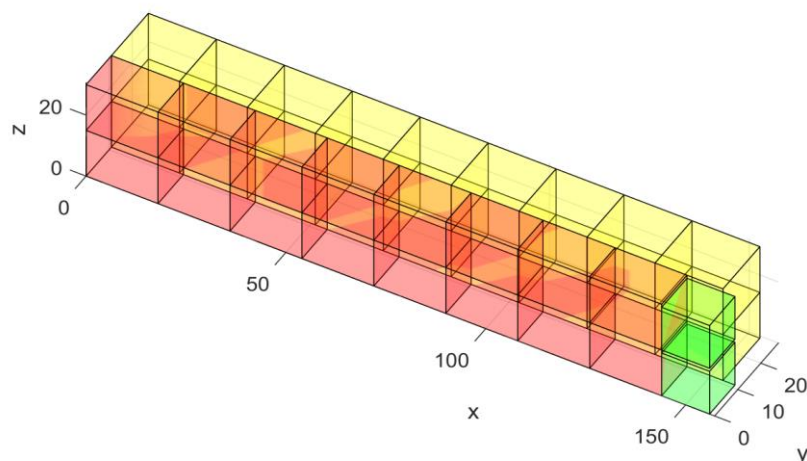
	Длина	Ширина	Высота	Количество
Контейнер	15724	2764	3050	-
Объект 1	1500	1800	1100	81
Объект 2	1400	1200	1100	97
Объект 3	1200	1400	1400	32
Объект 4	1600	1500	1700	70
Объект 5	1300	1900	1100	88

**Таблица 2.**  
**Заполняемость контейнеров**

**Table 2.**  
**Occupancy of containers**

№ контейнера	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Заполняемость, %	94,04	94,04	94,04	93,21	82,54	90,85	90,85	90,85	38,91

Наиболее неудобный предмет соответствует желтому цвету, поэтому он является приоритетным при упаковке, в то время как другие предметы упаковываются по остаточному принципу. Тем не менее, за счет различия в размерах такой подход позволяет поучить высокую степень заполняемости пространства контейнера. На рис. 6 показана схема упаковки, идентичная для первых трех вагонов. Как видно из табл. 2, они упакованы наиболее плотно.

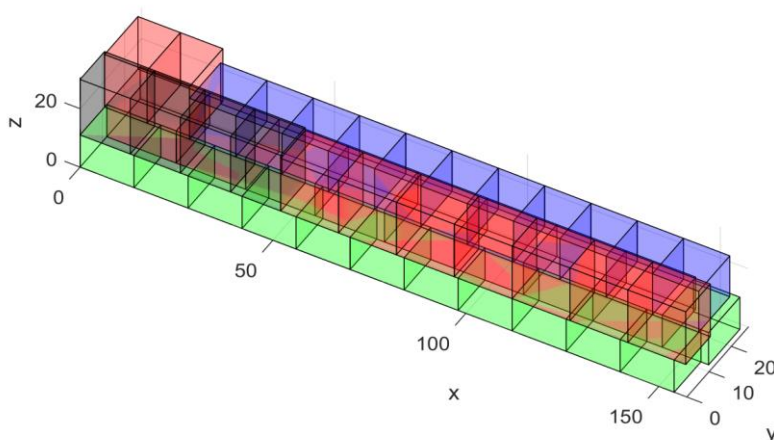


**Рис. 6. Размещение груза первого вагона**

**Fig. 6. Cargo placement of the first wagon**

Падение эффективности упаковки за счет исчерпания предметов одного типа показана на рис. 7. В процессе размещения предметов происходит исчерпания предметов, обозначенных красным цветом, вследствие чего это место занимает менее эффективно предметами, соответствующими синему цвету. Причиной этого является оценка подконтейнеров алгоритмом динамического программирования без учета реального числа оставшихся предметов.

Нивелирование этого недостатка метода возможно только путем повышения размерности алгоритма динамического программирования.



**Рис. 7. Размещение груза в пятом вагоне при исчерпании одного из типов объектов**

**Fig. 7. Cargo placement in the fifth car when one of the types of objects is exhausted**

Особенностью задач по упаковке грузов во множество контейнеров является большая вероятность низкой заполняемости последнего из них. С практической точки зрения незанятое место в последнем контейнере является негативным фактором, тем не менее, при теоретических исследованиях отсутствие груза для более полной загрузки последнего контейнера не является недостатком алгоритма упаковки, поэтому предлагается пренебречь незанятым пространством последнего контейнера. Это повышает чувствительность целевой функции даже к несущественным изменениям качества алгоритма.

### Выводы

Использование разработанного алгоритма обеспечивает более плотную загрузку контейнеров в случае, когда существует небольшое количество типов-размеров объектов, а число самих объектов велико. Классические эвристики для решения задачи упаковки контейнера эффективны, как правило, для случая различных размеров объектов, так как не предназначены для просмотра вариантов упаковки объектов по всему доступному объему.

Предлагаемый метод, основанный на динамическом программировании с мемоизацией и вычислением коэффициента неудобства объектов, позволяет получить эффективность упаковки, минимизируя количество использованных вагонов.

### Библиографический список

1. **Курейчик, В.В.** Применение генетического алгоритма решения задачи трехмерной упаковки / В.В. Курейчик, Д.В. Заруба, Д.Ю. Запорожец // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. Т. 132. № 7. С. 8-14.
2. **Курейчик, В.В.** Гибридный подход для решения задачи 3 -х мерной упаковки / В.В. Курейчик, А.Е. Глушенко, А.Н. Орлов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2016. №. 6 (179). С. 45-53.
3. **Гладков, Л.А.** Решение задачи трехмерной упаковки разногабаритных объектов с использованием бионических методов / Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова, Е.С. Скубриева // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013. Т. 144, №. 7. С. 35–41.

4. **Псиола, В.В.** О приближенном решении трехмерной задачи об упаковке на основе эвристик // Интеллектуальные системы. 2007. Т. 11. № 1. С. 83-100.
5. **Ху, Т.Ч.** Комбинаторные алгоритмы / Т.Ч. Ху, М.Т. Шинг. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2004. – 330 с.
6. **Юдаков, П.В.** Задача о трехмерной упаковке и методы ее решения. Обзор // Инженерный вестник. 2015. № 6. С. 12.
7. **Ягудин, Р.Р.** Решение задачи оптимизации упаковки многогранников в параллелепипедную область на основе построения годографа вектор – функции плотного размещения // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика, телекоммуникации и управление. 2012. № 5 (157). С. 58-62.
8. **Акеб, Н. А** Look-Forward Heuristic for Packing Spheres into a Three-Dimensional Bin // 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems. 2014. P. 397-404.
9. **Чеканин А.В.** Алгоритмы эффективного решения задачи ортогональной упаковки объектов / А.В. Чеканин, В.А. Чеканин // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2013. Т. 53. №. 10. С. 1639-1648.
10. **Li X.** A genetic algorithm for the three-dimensional bin packing problem with heterogeneous bins / X. Li, Z. Zhao, K.A. Zhang // IIE Annual Conference. Proceedings. – Institute of Industrial and Systems Engineers (IIE), 2014. С. 2039.
11. **Dube, E.** Optimizing three-dimensional bin packing through simulation / E. Dube, L.R. Kanavathy, P. Woodview // Sixth IASTED International Conference Modelling, Simulation, and Optimization. – 2006.

*Дата поступления  
в редакцию: 10.05.2023*

*Дата принятия  
к публикации: 11.07.2023*

УДК 004.415

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_18

## ОКЕАНОГРАФИЧЕСКАЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ОНЛАЙН-СИСТЕМА ДЛЯ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ ВОЛН В СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ БАССЕЙНАХ

**М.В. Кокоулина**

ORCID: 0000-0001-5890-3649 e-mail: kokoulinamaria97@gmail.com

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

**А.С. Епифанова**

ORCID: 0000-0003-1061-0964 e-mail: epifanova.anastasia.s@gmail.com

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

**О.Е. Куркина**

ORCID: 0000-0002-4030-2906 e-mail: oksana.kurkina@mail.ru

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

**А.А. Куркин**

ORCID: 0000-0003-3828-6406 e-mail: aakurkin@nntu.ru

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

**М.С. Винокуров**

ORCID: 0000-0001-7003-9726 e-mail: crz@mvinokurov.ru

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

**С.А. Епифанов**

ORCID: 0009-0000-5585-6082 e-mail: epifanov.s.a@yandex.ru

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

Представлена океанографическая геоинформационная онлайн-система для расчета и анализа дисперсионных, кинематических, нелинейных, силовых и транспортных характеристик внутренних волн, предназначенная для хранения и быстрого доступа к ним. В работе используются данные температуры и солёности из международного гидрологического атласа WOA18, сведения о батиметрии – из атласа GEBCO-2022, данные горизонтального потока воды для компонент прилива – из модели TPXO8. Представлена схема онлайн-системы, рассмотрены основные режимы её работы. Приведено описание расчетных блоков, входящих в систему, а также пользовательского интерфейса и функциональных возможностей. Описана схема базы данных, обеспечивающей хранение результатов обработки и анализа исходных данных. Рассмотрены основные инструменты, используемые при разработке онлайн-системы. Разработанная система уникальна и актуальна для данного класса геофизических приложений, может использоваться при планировании как численных, так и натуральных экспериментов.

**Ключевые слова:** геоинформационная онлайн-система, обработка данных, база данных, Python, гидрологические данные, WOA18, GEBCO-2022, TPXO8, внутренние волны, Мировой океан.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кокоулина, М.В. Океанографическая геоинформационная онлайн-система для расчета и анализа характеристик внутренних волн в стратифицированных бассейнах / М.В. Кокоулина, А.С. Епифанова, О.Е. Куркина, А.А. Куркин, М.С. Винокуров, С.А. Епифанов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 18-29. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_18

## OCEANOGRAPHIC ONLINE GEOINFORMATION SYSTEM FOR CALCULATION AND ANALYSIS OF THE INTERNAL WAVE CHARACTERISTICS IN STRATIFIED BASINS

**M.V. Kokoulina**

ORCID: **0000-0001-5890-3649** e-mail: **kokoulinamaria97@gmail.com**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.S. Epifanova**

ORCID: **0000-0003-1061-0964** e-mail: **epifanova.anastasia.s@gmail.com**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**O.E. Kurkina**

ORCID: **0000-0002-4030-2906** e-mail: **oksana.kurkina@mail.ru**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.A. Kurkin**

ORCID: **0000-0003-3828-6406** e-mail: **aakurkin@nntu.ru**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**M.S. Vinokurov**

ORCID: **0000-0001-7003-9726** e-mail: **crz@mvinokurov.ru**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**S.A. Epifanov**

ORCID: **0009-0000-5585-6082** e-mail: **epifanov.s.a@yandex.ru**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** An online oceanographic information system for the calculation and analysis of dispersion, kinematic, nonlinear, force and transport characteristics of internal waves is presented. It is designed to store and quickly access these characteristics. We use temperature and salinity data from the international hydrological atlas WOA18, bathymetry data from the atlas GEBCO-2022, and horizontal water flow data for tidal components from the TPXO8 model. A scheme of the online system is given. It describes calculation blocks, user interface, functionality and main modes of the system. The scheme of the database, which provides storage of the results of processing and analysis, is presented. The main tools used in the development of the online system are described. The developed system is unique and relevant for this class of geophysical applications. It may be used for planning both numerical and in-situ experiments.

**Key words:** online geoinformation system, data processing, database, Python, hydrological data, WOA18, GEBCO-2022, TPXO8, internal waves, World Ocean.

**FOR CITATION:** M.V. Kokoulina, A.S. Epifanova, O.E. Kurkina, A.A. Kurkin, M.S. Vinokurov, S.A. Epifanov. Oceanographic online geo-information system for calculation and analysis of the internal wave characteristics in stratified basins. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № . Pp. 18-29. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_18

## Введение

Внутренние волны, наблюдаемые во всех акваториях Мирового океана, являются важным элементом его динамической структуры. Известно большое количество работ, посвященных исследованию воздействия интенсивных внутренних волн на процессы, протекающие в стратифицированных акваториях: перераспределение потоков тепла, импульса, перемешивание вод, горизонтальный и вертикальный обмен, формирование рельефа дна и др. [1-9]. Также установлено, что они оказывают влияние на прибрежные и морские гидротехнические сооружения [10, 11]. Из-за недостаточного объема натурных данных для изучения внутренних волн часто используются массивы усредненных и сглаженных измерений из международных (*World Ocean Atlas* [12] и *Generalized Digital Environmental Model* [13]) и российских (ЕСИМО – единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане, <http://esimo.ru/portal/>) гидрологических атласов. Сведения о вертикальном распределении плотности (температуры и солёности) позволяют проводить предварительный анализ, дающий общее представление о ряде характеристик внутренних волн и свойствах нелинейных динамических процессов, зависящих от внешних условий среды. По гидрологическим профилям можно определить различные экзогенные (т.е. диктуемые средой) параметры: вертикальную структуру, дисперсионные кривые для бароклинных мод, различные характеристики длинных волн и прочие. Кроме того, связанные с волновой динамикой стратифицированных вод океанографические физические задачи, как правило, предполагают проведение значительной предобработки данных [14]. Соответственно, создание онлайн-системы, содержащей характеристики внутренних волн, рассчитанные по данным из различных гидрологических атласов, а также позволяющей строить карты этих параметров для различных акваторий Мирового океана, является актуальной задачей.

## Описание исходных гидрологических данных

Данные гидрологических атласов неоднократно использовались для проведения различных исследований в акваториях Мирового океана [15-17], например, для решения практических задач: нахождения модового состава, построения дисперсионных кривых [18-20], оценки действия модуляционной неустойчивости в рамках уравнений Гарднера и нелинейного уравнения Шрёдингера, нахождения критической (минимальной) частоты внутренних волн, а также расстояния, на котором развивается неустойчивость [21], исследования потенциала внутренних волн в переносе наносов и связи с развитием эрозионных зон [22, 23], оценки скоростей волн и других параметров [24-30].

В работе используются данные температуры и солёности из международного гидрологического атласа *World Ocean Atlas 2018* (WOA18). В этом климатологическом атласе с открытым исходным кодом представлена сводная информация о гидрофизических параметрах морской воды и их сезонных изменениях. Он содержит массивы усредненных и сглаженных данных об измерениях температуры, солёности и других гидрологических параметров [12]. Данные WOA18 представлены на регулярной сетке с разрешением 5, 1 или 1/4°; они представляют собой вертикальные профили температуры и солёности, усредненные за год, сезон и месяц на стандартных уровнях от 0 до 5500 м. Главным преимуществом этого атласа по сравнению с *GDEM* или российским ЕСИМО является интуитивно понятный интерфейс сайта и простота доступа к данным в любом удобном формате (netCDF, csv, ASCII, ArcGIS). Также в работе использовались данные Общей батиметрической карты Мирового океана *GEBCO* (*General Bathymetric Chart of the Oceans*, <https://www.gebco.net> – общедоступный цифровой атлас батиметрии Мирового океана). Последняя версия *GEBCO-2022* содержит набор данных батиметрии с разрешением 15 угловых секунд. Значения данных регистрируются по центру пикселя, т.е. они относятся к высотам (м) в центре ячеек сетки. Данные горизонтального потока воды для компонент прилива обычно берутся из



расчетов по приливной модели *TPXO 8* (A *TOPEX/Poseidon Global Tidal Model*), основанной на данных спутниковой альтиметрии [31, 32]. Исходя из этой модели, прилив можно рассчитать в любой точке Мирового океана и для любого периода времени. Информация об исходных данных для расчетов характеристик внутренних волн, а также их источниках, представлена в табл. 1.

**Таблица 1.**  
**Исходные гидрологические данные из *WOA18*, *GEBCO-2022*, *TPXO 8***

**Table 1.**  
**Input hydrological data from *WOA18*, *GEBCO-2022*, *TPXO 8***

Исходные данные (единицы измерения)	Пространственное разрешение	Источник
Температура, $T$ (°C)	1/4 градуса	WOA18
Соленость, $S$ (PSU)		
Глубина, $H$ (м)	15 угловых секунд	GEBCO-2022
Интегрированный по глубине зональный перенос Компонента (E/W), $U$ (м/с)	1/6 градуса	TPXO 8
Интегрированный по глубине меридиональный перенос Компонента (N/S), $V$ (м/с)		

Исходные данные хранятся в формате *NetCDF*, который часто используется для работы с научными данными, преимущественно в области океанологии, климатологии, метеорологии, и в различных геоинформационных системах. Он является самодокументируемым и позволяет хранить многомерные массивы (временные ряды, географические карты и т.д.), а также их метаданные (например, единицы измерения, координаты, описание переменных). Каждый файл содержит универсальный описывающий его структуру заголовок, массивы, сохраненные в нем, и набор пар ключ-значение для хранения произвольных атрибутов. На рис. 1 приведен пример файла *NetCDF* из атласа *WOA18* (красной рамкой выделены атрибуты переменной «lat»).

```
netcdf woa18_5564_t00_01 {
  dimensions:
    nbounds = 2 ;
    lat = 180 ;
    lon = 360 ;
    depth = 102 ;
    time = 1 ;
  variables:
    int crs ;
      crs:grid_mapping_name = "latitude_longitude" ;
      crs:epsg_code = "EPSG:4326" ;
      crs:longitude_of_prime_meridian = 0.f ;
      crs:semi_major_axis = 6378137.f ;
      crs:inverse_flattening = 298.2572f ;
    float lat(lat) ;
      lat:standard_name = "latitude" ;
      lat:long_name = "latitude" ;
      lat:units = "degrees_north" ;
      lat:axis = "Y" ;
      lat:bounds = "lat_bnds" ;
    float lat_bnds(lat, nbounds) ;
      lat_bnds:comment = "latitude bounds" ;
```

**Рис. 1.** Пример файла *NetCDF* [12]

**Fig. 1.** Example of a *NetCDF* file [12]

## Архитектура геоинформационной системы

Проект реализован на языке *Python* (в кроссплатформенной среде разработки *PyCharm*), поскольку геоинформационная система расположена в открытом доступе на сайте Научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева в разделе «Проекты» ([https://lmmnad.nntu.ru/ru/projects/property\\_IW/](https://lmmnad.nntu.ru/ru/projects/property_IW/)), серверная часть которого написана на этом языке программирования. Для чтения данных в формате *NetCDF* используется библиотека *NetCDF4*. Схема разработанной системы представлена на рис. 2.

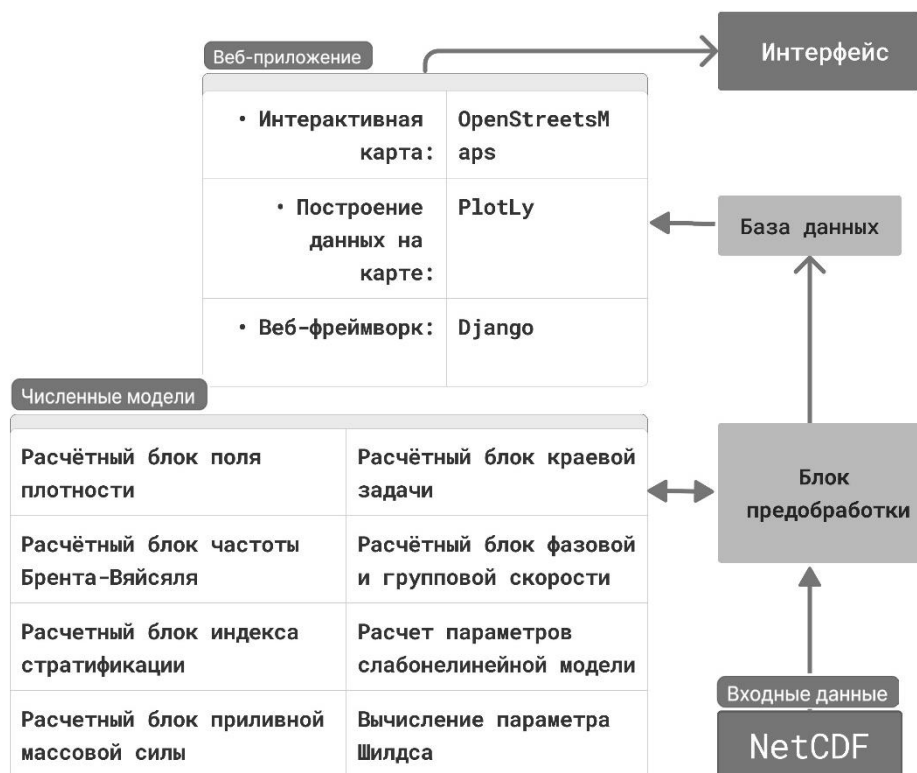


Рис. 2. Схема разработанной геоинформационной системы

Fig. 2. The scheme of the developed geoinformation system

После чтения входные данные проходят предобработку и подготовку к дальнейшим расчетам в соответствии с требованиями конкретной модели. Это связано с тем, что при вычислениях, например, приливной объемной силы плавучести, используется несколько атласов, имеющих разный формат и разрешение сетки: вектор градиента батиметрии был рассчитан на исходной сетке *GEBCO 2022* (15 угловых секунд), затем данные были интерполированы на самую грубую сетку. Результирующий массив значений этой силы представлен на сетке, горизонтальное разрешение которой определяется пространственным разрешением входных данных атласа *WOA18* (1/4 °). Данные из модели *TPXO 8* выгружены на заданную пользовательскую сетку (1/4 °) в массивы библиотеки NumPy.

Все расчетные блоки, представленные на рис. 2, базируются на вычислении профиля плотности. На основе исходных данных с помощью уравнения состояния морской воды *TEOS10* (реализация термодинамического уравнения морской воды на языке *Python* доступна по ссылке [github.com/TEOS-10/GSW-Python](https://github.com/TEOS-10/GSW-Python)) для каждой точки расчетной области проведено вычисление профиля плотности, на основе которого рассчитан профиль частоты Вяйсяля-Брента. Во всех расчетах были исключены точки, в которых профиль плотности содержал большой процент инверсий (>20 %), и точки с глубиной меньше 10 м.

Расчетный блок индекса стратификации в качестве входных данных принимает распределение плотности и вычисляет [33-35] значение индекса стратификации  $I$  (здесь и далее обозначения в скобках соответствуют названию полей в схеме базы данных (рис. 3)) в конкретной точке. Эта величина показывает, сколько энергии необходимо для полного перемешивания водяного столба единичного объема. Зоны с более ярко выраженными вертикальными перепадами плотности морской воды характеризуются большими значениями индекса стратификации и представляют собой благоприятную среду для более интенсивных бароклинных процессов с высокой плотностью потоков бароклинной энергии, что может быть использовано при планировании гидротехнических работ и хозяйственной деятельности. Также наряду с картами индекса стратификации могут использоваться карты приливной массовой силы [36-38], которые также представлены в системе. Для вычисления этой величины необходимы данные об изменении частоты Вьясяля-Брента, батиметрии  $H$  (табл. 1) и приливах  $U, V$  (табл. 1). Пространственное изменение приливной массовой силы  $F$  позволяет выявить наиболее вероятные зоны генерации внутренних волн. Также одной из основных задач при исследовании внутренних волн является вычисление бароклинных мод и дисперсионных кривых (*mode* и *omega* соответственно). Данные характеристики находятся из решения задачи Штурма-Лиувилля и позволяют лучше понять структуру волнового поля [39, 40]. В данном комплексе проводится расчет трех низших бароклинных мод для диапазона волновых чисел и соответствующих им дисперсионных кривых. На основе зависимости частоты внутренних волн от волнового числа вычислены значения фазовой скорости и групповой. Данный функционал представлен в отдельном расчетном блоке. В блоке, отвечающем за расчет коэффициентов слабонелинейной модели, реализовано решение краевой задачи в длинноволновом приближении, на основе которого выполняется расчет дисперсии ( $\beta$ ), квадратичной ( $\alpha$ ) и кубической нелинейности ( $\alpha_1$ ) [41-43].

Перед запуском расчетов по всему Мировому океану численные алгоритмы были отлажены на модельных данных, и проведено сравнение полученных результатов с результатами других авторов [18, 19, 35, 44]. После этого проведен расчет перечисленных характеристик для каждого узла сетки. Результаты обработки и анализа исходных данных хранятся в базе данных, ее схема приведена на рис. 3. База данных состоит из трех таблиц: «Географические координаты», «Изображения» и «Массив». Каждая из них содержит первичный ключ (*id*) – значение, которое уникально для каждой записи. В таблице «Географические координаты» для каждого узла расчетной сетки хранятся следующие данные: широта (*LAT*), долгота (*LON*), максимальное ( $T_{max}$ ) и минимальное ( $T_{min}$ ) значения температуры, максимальное ( $S_{max}$ ) и минимальное ( $S_{min}$ ) значения солёности, максимальное ( $N_{max}$ ) и минимальное ( $N_{min}$ ) значения частоты Вьясяля-Брента и глубина залегания максимального значения ( $P_{dep}$ ), индекс стратификации ( $I$ ), массовая сила плавучести ( $F$ ), фазовая скорость длинных внутренних волн ( $c$ ), коэффициент дисперсии ( $\beta$ ), коэффициент квадратичной нелинейности ( $\alpha$ ), коэффициент кубической нелинейности ( $\alpha_1$ ) и в виде ссылок на графические объекты – результаты вычисления фазовой и групповой скорости (*cp\_cg*), дисперсионные кривые (*omega*).

В таблице «Изображения» для каждой географической точки (узла) хранятся номера мод (*mode*) и ссылки на соответствующие изображения (*path*).

В таблице «Массив» для каждого узла содержатся массивы величин (исходные значения температуры и солёности, а также плотность и частота Вьясяля-Брента) (*data\_array*), выгруженные на стандартных глубинах (*height*) от 0 до 5500 м.

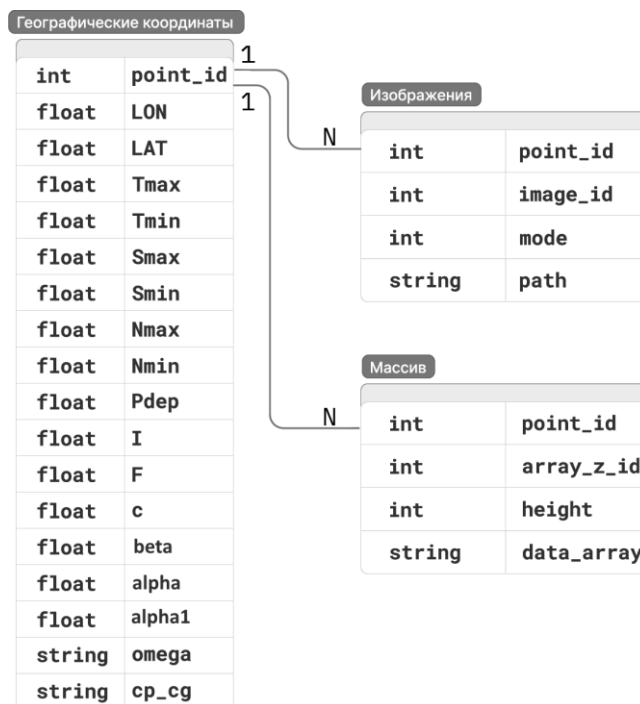


Рис. 3. Схема базы данных, содержащей результаты обработки и анализа исходных данных

Fig. 3. The scheme of the database containing the results of processing and analysis of initial data

### Веб-интерфейс

Для быстрого и удобного доступа к рассчитанным характеристикам внутренних волн был реализован веб-интерфейс с использованием *Django* – высокоуровневого веб-фреймворка, который предназначен для быстрого и удобного создания веб-приложений. Он предоставляет готовые решения для таких задач, как работа с базами данных, аутентификация, обработка форм, кеширование и др. Результаты расчетов отображаются на интерактивной карте мира. В рамках нашего веб-приложения используется открытая карта мира *OpenStreetMap* (<https://www.openstreetmap.org>). Она позволяет пользователям взаимодействовать с данными, нажимая на точки на карте и выводя информацию о конкретных географических локациях. Для доступа к проекту необходима авторизация на сайте <https://lfnad.nntu.ru/>. На главной странице (рис. 4) представлена интерактивная карта Мирового океана, на которой точками оранжевого цвета отмечены исходные данные, полученные из атласа *WOA18*. В этом разделе пользователю доступен просмотр данных температуры, солености, профиля плотности, рассчитанного на основе исходных данных с помощью уравнения состояния морской воды *TEOS10*, а также профиль частоты Вьясяля-Брента. При нажатии на выбранный узел расчетной сетки сведения отображаются в виде графических объектов, которые могут быть сохранены в формате *jpg*. Также в таблицу выводятся максимальные и минимальные значения температуры, солености, плотности, частоты плавучести для выбранной точки. Все результаты доступны как для лета, так и для зимы. Для выбора сезона встроен переключатель *RadioButton*. Справа от карты расположены кнопки для перехода к результатам расчетов. Разделы «Индекс стратификации», «Приливная массовая сила» и «Коэффициенты слабонелинейной модели» имеют схожий интерфейс (с возможностью выбора сезона зима/лето). Доступно два режима просмотра информации: в виде исходных данных (по точкам из атласа *WOA18*, как на главном окне (рис. 4)) и в виде цветовой карты (рис. 5). В первом режиме пользователь может посмотреть значения в конкретной точке Мирового океана, второй режим удобен для отображения пространственного изменения характеристики. Функционал реализован с применением библиотеки *Plotly*.

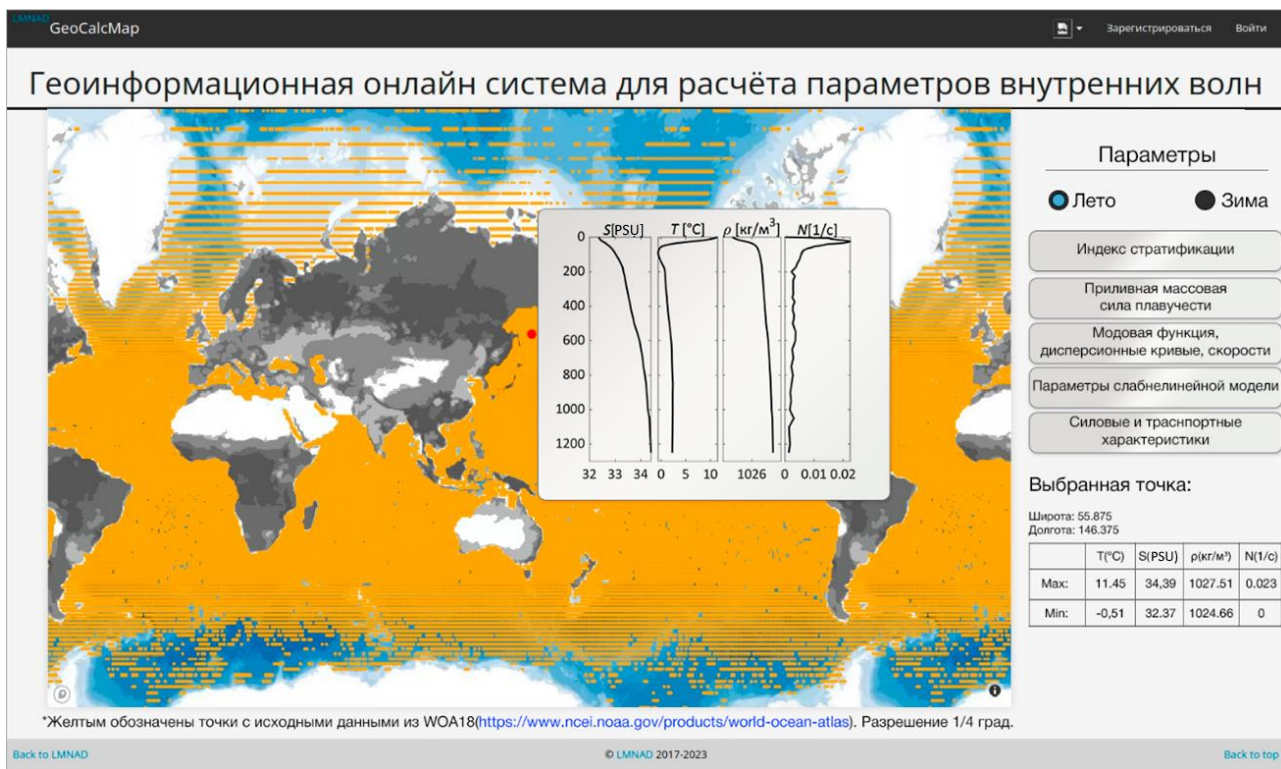


Рис. 4. Главная страница океанографической геоинформационной онлайн-системы

Fig. 4. The main page of the online geo-information system

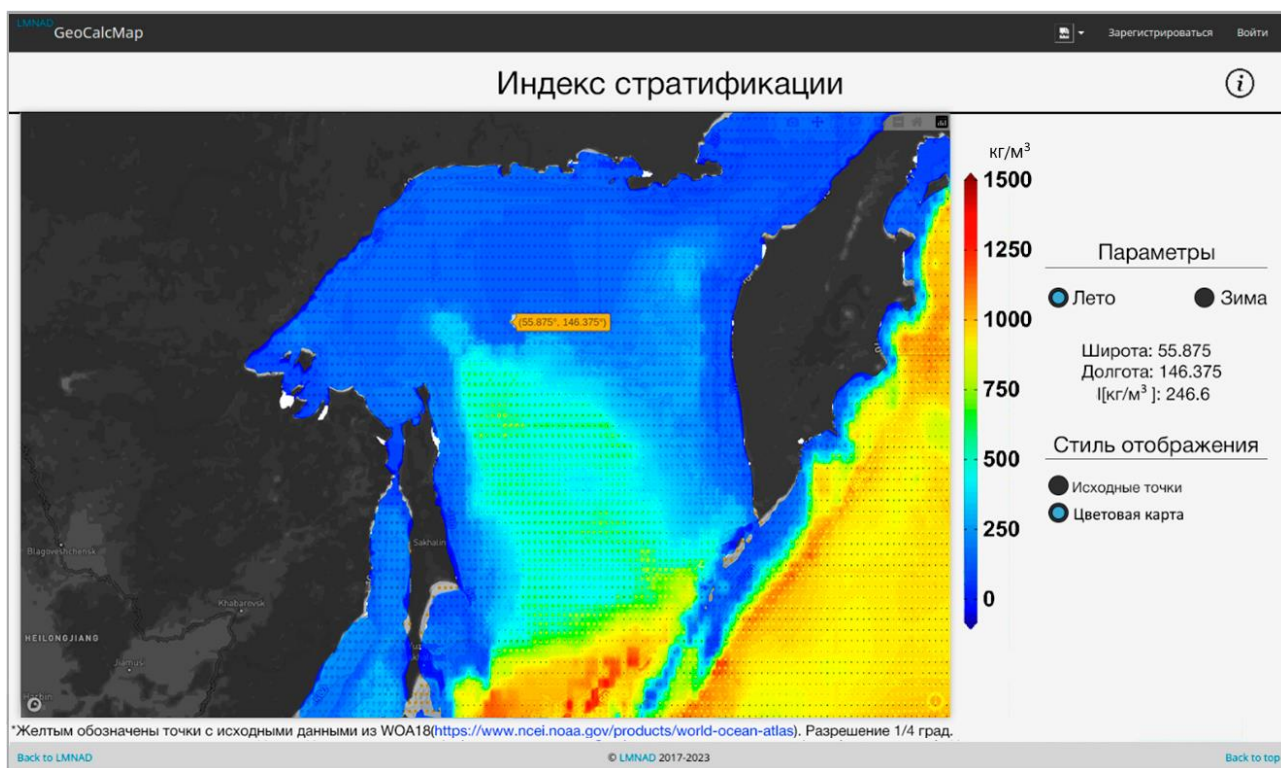


Рис. 5. Интерфейс страницы «Индекс стратификации» (режим цветовой карты)

Fig. 5. Interface of the «Stratification Index» page (color map mode)



Также в правом верхнем углу расположена кнопка («i») для вызова раздела «Справка», который содержит сведения об интерфейсе и теоретический материал. Эта функция доступна из любого раздела системы. Раздел «Модовая функция, дисперсионные кривые, скорости» предоставляет доступ к информации о вертикальной структуре бароклинных волн и их дисперсионных характеристиках. Вывод данных осуществляется в виде графических объектов при нажатии на точку сетки во всплывающем окне (рис. 6).

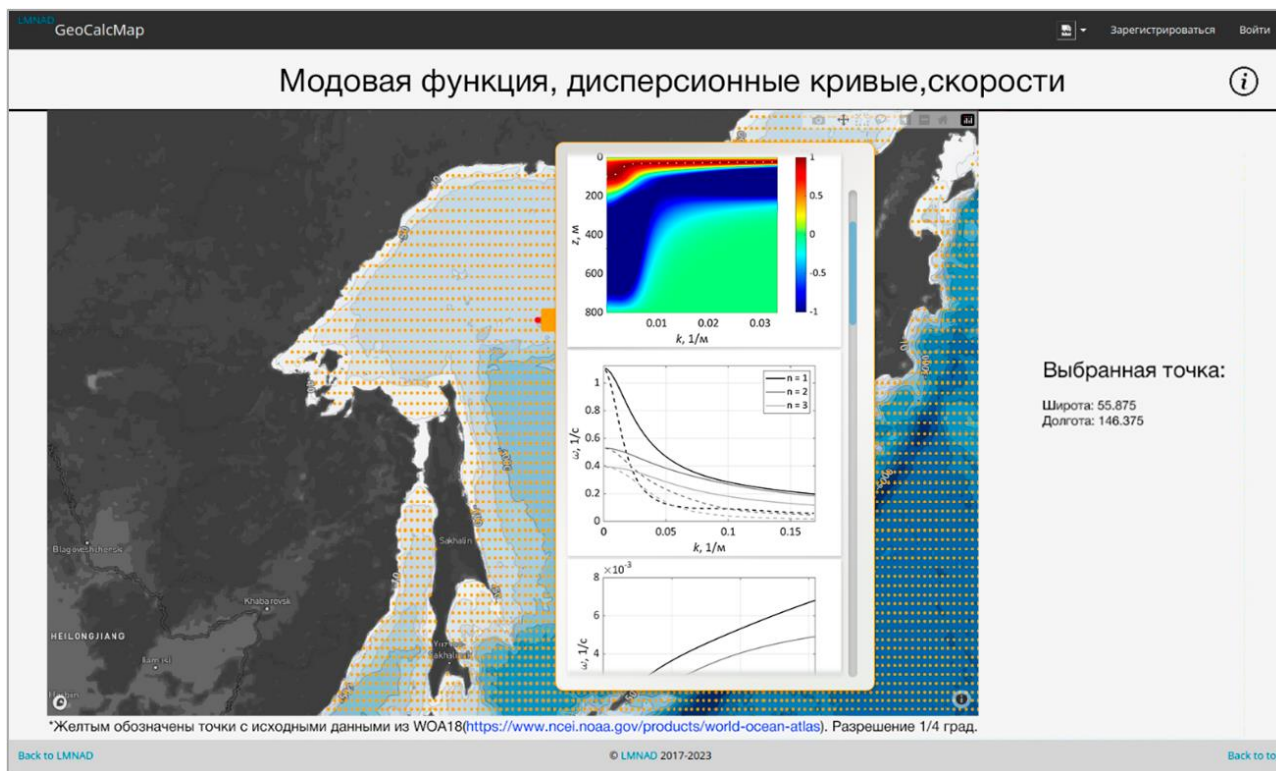


Рис. 6. Интерфейс страницы «Модовая функция, дисперсионные кривые, скорости»

Fig. 6. Interface of the «Mode function, dispersion curves, velocities» page

Раздел «Силовые и транспортные характеристики» находится в разработке. В нем планируется реализовать вычисление параметра Шилдса по заданной амплитуде придонной скорости с учетом значения волнового числа/частоты и вертикальной структуры для волн соответствующей моды и определение вероятностных уровней смещения для несвязного грунта известной фракции.

### Выводы

Проведены расчеты дисперсионных, кинематических, нелинейных характеристик внутренних волн на основе данных открытого гидрологического атласа *WOA18*, а также с использованием данных батиметрии из атласа *GEBCO-2022* и данных прилива из модели *TPXO8*. Реализованы математические модели для расчета всех перечисленных параметров внутренних гравитационных волн. Создана база данных для хранения рассчитанных характеристик. Для удобного и быстрого доступа к данным разработана океанографическая геоинформационная онлайн-система, которая позволяет производить расчет и анализ кинематических, нелинейных, дисперсионных, силовых и транспортных характеристик внутренних волн в Мировом океане. Приведено описание структуры, интерфейса и функциональности системы. Проект имеет большой потенциал дальнейшего развития и совершенствования как в плане математических моделей, так и в аспекте практического применения.

*Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023-0004 «Нелинейная волновая динамика прибрежной зоны в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия») и при поддержке гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-70.2022.1.5, а также стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам (СП-692.2021.5).*

### Библиографический список

1. **Краусс, В.** Внутренние волны / В. Краусс. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 272 с.
2. **Морозов, Е.Г.** Океанские внутренние волны / Е.Г. Морозов. – М.: Наука, 1985. – 151 с.
3. **Сабинин К.Д.** Волны внутри океана / К.Д. Сабинин, К.В. Коняев. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 272 с.
4. **Bogucki, D.** Sediment resuspension and mixing by resonantly generated solitary waves / D. Bogucki, T. Dikky, L.G. Redekopp // *Journal of Physical Oceanography*. – 1997. – V. 7. – P.1181-1196.
5. **Mak Kinnan, J.A.** Mixing on the late-summer new England shelf-solibores, shear and stratification / J.A. Mak Kinnan, M.C. Gregg // *Preprint. AGU*, 1999 – V. 4. – 19 p.
6. **Muller, P.** Diapycnal mixing and internal waves / P. Muller, M. Briscoe // *Oceanography*. – 2000 – V. 13. – № 2. – P. 98-103.
7. **Reeder, D.B.** Very large subaqueous sand dunes on the upper continental slope in the South China Sea generated by episodic, shoaling deep-water internal solitary waves / D.B. Reeder, B.B. Ma, Y.J. Yang // *Marine Geology*. – 2011. – V. 279. – P.12–18.
8. **Талипова, Т.Г.** Моделирование динамики интенсивных внутренних волн на шельфе / Т.Г. Талипова, Е.Н. Пелиновский, А.А. Куркин, О.Е. Куркина // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2014. – Т. 50. – № 6. – С. 714-722.
9. **Kurkina, O.E.** Propagation regimes of interfacial solitary waves in a three-layer fluid / O.E. Kurkina, A.A. Kurkin, E.A. Rouvinskaya, T. Soomere // *Nonlinear Processes in Geophysics*. – 2015. – V. 22. – № 2. – P. 117-132.
10. **Song, Z.J.** Comparisons of internal solitary wave and surface wave actions on marine structures and their responses / Z.J. Song, B. Teng, Y. Gou, L. Lu, Z.M. Shi, Y. Xiao, Y. Qu // *Applied Ocean Research*. – 2011. – V. 33. – № 2. – P. 120-129.
11. **Рувинская, Е.А.** Перенос частиц при распространении бризеров внутренних гравитационных волн / Е.А. Рувинская, О.Е. Куркина, А.А. Куркин, А.А. Наумов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2015. – Т. 8. – № 3. – С. 53-61.
12. **Boyer, T. P.** World Ocean Atlas 2018 / T. P. Boyer, H. E. Garcia, R. A. Locarnini, M. M. Zweng, A.V. Mishonov, J.R. Reagan, K.A. Weathers, O.K. Baranova, D. Seidov, I.V. Smolyar // *NOAA National Centers for Environmental Information*. – 2018.
13. **Fox, D.N.** The Modular Ocean Data Assimilation System (MODAS) / D.N. Fox, W.J. Teague, C.N. Barron, M.R. Carnes, C.M. Lee // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. – 2002. – V.19. – P. 240-252.
14. **Кокоулина, М.В.** О создании океанографической геоинформационной онлайн системы для расчета и анализа характеристик внутренних волн / М.В. Кокоулина // *Сборник материалов 33-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам*. – 2023.
15. **Тюгин, Д.Ю.** Программный комплекс для численного моделирования внутренних гравитационных волн в мировом океане / Д.Ю. Тюгин, О.Е. Куркина, А.А. Куркин // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2011. – Т. 4. – № 2. – С. 32-44.
16. **Тюгин, Д.Ю.** Повышение производительности программного комплекса для моделирования внутренних гравитационных волн IGW Research с помощью Intel® Parallel Studio XE 2013 / Д.Ю. Тюгин, А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский, О.Е. Куркина // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2012. – Т. 5. – № 3. – С. 89-95.
17. **Рувинская, Е.А.** Первая версия информационной системы обработки и анализа данных натурных измерений внутренних волн в океане / Е.А. Рувинская, А.С. Епифанова, М.В. Кокоулина // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. – 2020. – Т. 3(130). – С. 53-63.
18. **Grigorenko, K.S.** Internal Waves Kinematic Characteristics in the Central Atlantic in 2014–2015 / K.S. Grigorenko, S.M. Khartiev // *Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes*

- (2018) 4th International Scientific School for Young Scientists, Ishlinskii Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences. – Springer International Publishing, 2019. – P. 22-32.
19. **Grigorenko, K.S.** Investigations of Internal Waves in the Seas of Russia and in the Central Atlantic / K.S. Grigorenko, S.M. Khartiev // Conference on Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. – 2017. – P. 28-34.
  20. **Kurkina, O.** Vertical structure of the velocity field induced by mode-I and mode-II solitary waves in a stratified fluid / O. Kurkina, E. Rouvinskaya, A. Kurkin, A. Giniyatullin, E. Pelinovsky // The European Physical Journal E. 2018 – V. 41. – № 3. – P. 1-8.
  21. **Kurkin, A.A.** Modulation Instability Charts for Internal Waves / A.A. Kurkin, A.R. Giniyatullin, O.E. Kurkina, L.V. Talalushkina, T.G. Talipova // The Thirteenth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2017. – 2017. – P. 1259-1266.
  22. **Kurkina, O.** Mapping the internal wave field in the Baltic Sea in the context of sediment transport in shallow water / O. Kurkina, T. Talipova, E. Pelinovsky, T. Soomere // Journal of Coastal Research. – 2011. – P. 2042-2047.
  23. **Zhang, W.** Internal solitary waves control offshore extension of mud depocenters on the NW Iberian shelf / W. Zhang, I. Didenkulova, O. Kurkina, Y. Cui, J. Haberkern, R. Aepfler, A.I. Santos, H. Zhang, T.J. Hanebuth // Marine Geology. – 2019. – V. 409. – P. 15-30.
  24. **Kurkin, A.** Comparative analysis of the first baroclinic Rossby radius in the Baltic, Black, Okhotsk, and Mediterranean seas / A. Kurkin, O. Kurkina, A. Rybin, T. Talipova // Russian Journal of Earth Sciences. – 2020. – V. 20. – № 4. – P. 8.
  25. **Rouvinskaya, E.A.** Mapping of the Baltic Sea by the types of density stratification in the context of dynamics of internal gravity waves / E.A. Rouvinskaya, D.Y. Tyugin, O.E. Kurkina, A.A. Kurkin // Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika. – 2018. – V. 11. – № 1. – P. 46-51.
  26. **Kurkin, A.** Internal waves in the Mediterranean Sea: mapping and transformations / A. Kurkin, O. Kurkina, T. Talipova, E. Pelinovsky, E. Rouvinskaya // The Twelfth International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2015. – 2015. – P. 836-846.
  27. **Kurkina, O.** Kinematic parameters of internal waves of the second mode in the South China Sea / O. Kurkina, T. Talipova, T. Soomere, A. Giniyatullin, A. Kurkin // Nonlinear Processes in Geophysics. – 2017. – V. 24. – № 4. – P. 645-660.
  28. **Kurkina, O.** Propagation regimes and populations of internal waves in the Mediterranean Sea basin / O. Kurkina, E. Rouvinskaya, T. Talipova, T. Soomere // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2017. – V. 185. – P. 44-54.
  29. **Kurkina, O.** The impact of seasonal changes in stratification on the dynamics of internal waves in the Sea of Okhotsk / O. Kurkina, T. Talipova, T. Soomere, A. Kurkin, A. Rybin // Estonian Journal of Earth Sciences. – 2017. – V. 66. – № 4. – P. 238-255.
  30. **Grimshaw, R.** Internal solitary waves: propagation, deformation and disintegration / R. Grimshaw, E. Pelinovsky, T. Talipova, O. Kurkina // Nonlinear Processes in Geophysics. – 2010. – V. 17. – № 6. – P. 633.
  31. **Egbert, G.D.** Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides / G.D. Egbert, S.Y. Erofeeva // Journal of Atmospheric and Oceanic technology. – 2002. – V. 19. – № 2. – P. 183-204.
  32. **Padman, L.** A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean / L. Padman, S. Erofeeva // Geophysical Research Letters. – 2004. – V. 31. – № 2.
  33. **Hamada, T.** Stratification potential-energy anomaly index standardized by external tide level / T. Hamada, S. Kim // Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2021. – V. 250. – Art. No. 107138.
  34. **Ueno, H.** Stratification in the northern Bering Sea in early summer of 2017 and 2018 / H. Ueno, M. Komatsu, Z. Ji, R. Dobashi, M. Muramatsu, H. Abe, K. Imai, A. Ooki, T. Hirawake // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. – 2020. – V. 181. – Art. No. 104820.
  35. **Ladd, C.** Stratification on the Eastern Bering Sea shelf revisited / C. Ladd, P.J. Stabenro // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. – 2012. – V. 65. – P. 72-83.
  36. **Baines, P.G.** The generation of internal tides by flat-bump topography / P.G. Baines // Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts. – 1973. – V.20. – № 2. – P. 179-205.
  37. **Baines, P.G.** On internal tide generation models / P.G. Baines // Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers. – 1982. – V. 29. – № 3. – P. 307-338.



38. **Kokoulina, M.V.** Geographical and seasonal distribution of tidal body force field in the Sea of Okhotsk in the context of internal wave dynamics / M.V. Kokoulina, O.E. Kurkina, E.A. Rouvinskaya, A.A. Kurkin // Russian Journal of Earth Sciences. – 2022. – V. 22. – № 6. – Art. No. ES6013.
39. **Миропольский, Ю.З.** Динамика внутренних гравитационных волн в океане / Ю.З. Миропольский. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 302 с.
40. **Булатов, В.В.** О расчете собственных функций и дисперсионных кривых основной вертикальной спектральной задачи уравнения внутренних гравитационных волн / В.В. Булатов, Ю.В. Владимиров // Математическое моделирование. – 2007. – Т. 19. – № 2. – С. 59-67.
41. **Grimshaw, R.** Higher-order Korteweg-de Vries models for internal solitary waves in a stratified shear flow with a free surface / R. Grimshaw, E. Pelinovsky, O. Poloukhina // Nonlinear Processes in Geophysics. – 2002. – V. 9. – № 3-4. – P. 221-235.
42. **Grimshaw, R.** Simulation of the transformation of internal solitary waves on oceanic shelves / R. Grimshaw, E. Pelinovsky, T. Talipova, A. Kurkin // Journal of Physical Oceanography. – 2004. – V. 34. – № 12. – P. 2774-2791.
43. **Holloway, P.E.** A nonlinear model of internal tide transformation on the Australian North West shelf / P.E. Holloway, E.N. Pelinovsky, T.G. Talipova, B. Barnes // Journal of Physical Oceanography. – 1997. – V. 27. – № 6. – P. 871-896.
44. **Wang, W.** Distinct Variability between Semidiurnal and Diurnal Internal Tides at the East China Sea Shelf / W. Wang, R. Robertson, Y. Wang, C. Zhao, Z. Hao, B. Yin, Z. Xu // Remote Sensing. – 2022. – V. 14. – № 11. – Art. No. 2570.

*Дата поступления  
в редакцию: 16.05.2023*

*Дата принятия  
к публикации: 07.07.2023*

УДК 004.896

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_30

## АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ШУМОПОДАВЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ ДВИЖЕНИЙ НА БАЗЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭЛЕКТРОМИОГРАФИИ

**И.В. Кузнецов**

ORCID: 0000-0002-9110-2816 e-mail: [ivankuznetsov@festu.khv.ru](mailto:ivankuznetsov@festu.khv.ru)  
Дальневосточный государственный университет путей сообщения  
Хабаровск, Россия

**В.В. Халиман**

ORCID: 0009-0007-4657-9440 e-mail: [vv.khaliman@mail.ru](mailto:vv.khaliman@mail.ru)  
Дальневосточный государственный университет путей сообщения  
Хабаровск, Россия

**Е.В. Фалеева**

ORCID: 0009-0003-5146-0007 e-mail: [elena\\_ha2004@mail.ru](mailto:elena_ha2004@mail.ru)  
Дальневосточный государственный университет путей сообщения  
Хабаровск, Россия

**Ю.В. Пономарчук**

ORCID: 0000-0002-2531-030X e-mail: [yulia.ponomarchuk@gmail.com](mailto:yulia.ponomarchuk@gmail.com)  
Дальневосточный государственный университет путей сообщения  
Хабаровск, Россия

Представлен аналитический обзор работ, проведенных в области исследований ЭМГ-сигнала в различных сферах и работ, связанных с изучением эффективности различных методов шумоподавления и распознавания движений. Результаты анализа позволили предположить, что многие классификаторы обладают достаточной эффективностью при решении задачи распознавания движений. Рассмотрены как вопросы эффективности классификации движений в целом, так и, в частности, определения движений в режиме реального времени. Кроме того, поставлены вопросы об эффективности использования ансамблей классификаторов и применения выбора метода шумоподавления в режиме реального времени.

**Ключевые слова:** распознавание движений, машинное обучение, электромиография, человеко-машинный интерфейс.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кузнецов, И.В. Анализ алгоритмов шумоподавления и классификации при распознавании движений на базе поверхностной электромиографии / И.В. Кузнецов, В.В. Халиман, Е.В. Фалеева, Ю.В. Пономарчук // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 30-42.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_30

## ANALYSIS OF NOISE SUPPRESSION AND CLASSIFICATION ALGORITHMS FOR MOVEMENT RECOGNITION BASED ON SURFACE ELECTROMYOGRAPHY

**I.V. Kuznetsov**

ORCID: 0000-0002-9110-2816 e-mail: [ivankuznetsov@festu.khv.ru](mailto:ivankuznetsov@festu.khv.ru)  
Far Eastern State Transport University  
Khabarovsk, Russia

**V.V. Khaliman**

ORCID: **0009-0007-4657-9440** e-mail: **vv.khaliman@mail.ru**

Far Eastern State Transport University  
*Khabarovsk, Russia*

**E.V. Faleeva**

ORCID: **0009-0003-5146-0007** e-mail: **elena\_ha2004@mail.ru**

Far Eastern State Transport University  
*Khabarovsk, Russia*

**Yu.V. Ponomarchuk**

ORCID: **0000-0002-2531-030X** e-mail: **yulia.ponomarchuk@gmail.com**

Far Eastern State Transport University  
*Khabarovsk, Russia*

**Abstract.** One of the urgent problems in the development of human-machine interfaces is motion recognition. There are several approaches to solving it. Each of them has both advantages and disadvantages, and a large number of different systems have been built on their basis. These systems have found their application in a variety of fields, from the fabrication of highly functional prostheses to the gaming industry. One such approach is the use of electromyography (EMG). This method seems to be promising due to the potentially easy way to use the devices that apply it. However, the challenge of analyzing the EMG signal due to the large number of factors affecting its shape as well as its susceptibility to noise. This article reviews previously conducted research in the field of EMG signal analysis in various areas, as well as studies of the effectiveness of various noise reduction and motion recognition methods. The results of the analysis suggest that many classifiers have sufficient efficiency in solving the problem of motion recognition. This raises the question of both the effectiveness of motion classification in general, and in particular the detection of movements in real time. In addition, the efficiency of using ensembles of classifiers, as well as the application of the choice of noise reduction method in real time, is questioned.

**Key words:** motion recognition, machine learning, electromyography, human-machine interface.

**FOR CITATION:** I.V. Kuznetsov, V.V. Haliman, E.V. Faleeva, Yu.V. Ponomarchuk. Analysis of noise reduction and classification algorithms for motion recognition based on surface electromyography. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 3. Pp. 30-42. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_30

## Введение

Распознавание движений – одна из актуальных проблем развития человеко-машинных интерфейсов. Существует несколько подходов к ее решению, на их основе построены многочисленные системы, которые применяются в различных областях, начиная с изготовления высокофункциональных протезов и заканчивая игровой индустрией. К этим подходам относятся: использование микроэлектромеханических систем (МЭМС), анализ видеопотока, а также анализ внутренних сигналов человеческого тела.

В случае использования микроэлектромеханических систем положение человека в пространстве определяется с помощью различных сенсоров, таких как гироскопы и акселерометры, на основе показаний которых возможно судить о направлении и скорости совершаемого движения. К известным устройствам, работа которых основана таким образом, относятся контроллер *PlayStation Move* [1], а также шлем виртуальной реальности *HTC Vive* [2]. Методы, основанные на анализе видеопотока, определяют положение человека, его позу, а также совершаемые им движения и их траектории с использованием средств машинного обучения и компьютерного зрения. Наиболее известными устройствами, функционирующим по этому принципу, являются контроллер *Microsoft Kinect* [3], *Cyberglove* [4] и браслет *Microsoft Digits* [5]. При обработке внутренних сигналов человеческого тела устройства определяют позу человека, а также совершаемые им движения, основываясь на изменении сигналов электромиограмм (ЭМГ), ЭКГ и/или других, что позволяет судить о сокращении

или расслаблении тех или иных мышц или их групп; примерами устройств такого рода могут выступать *Thalnic Labs Myo* и *Logbar Ring*. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. В частности, методы распознавания движений на основе анализа видеопотока требовательны к условиям внешней среды, что ограничивает сферу их применения, в то время как использование МЭМС может оказаться дорогостоящим. Недостатком распознавания движений на основе анализа внутренних сигналов человеческого тела является высокая сложность в силу индивидуальных характеристик сигнала для каждого человека. При проектировании жестовых интерфейсов важную роль играют следующие факторы: размер устройства, его форм-фактор, необходимость использования дополнительных устройств, а также возможность интеграции устройств в более сложные системы, как на программном, так и на аппаратном уровне.

Особый интерес среди рассмотренных подходов вызывает распознавание движений на основе данных электромиографии. Электромиография (ЭМГ) представляет собой метод регистрации биоэлектрической активности мышц, позволяющий определить состояние нервно-мышечной системы [6]. Такой подход нашел широкое применение в сфере изготовления протезов, однако он может быть применен и для здоровых людей. Устройства, построенные на основе анализа ЭМГ, обладают малым размером и могут быть применимы в самых разных ситуациях, что обуславливается их слабой зависимостью от параметров внешней среды. Это делает анализ ЭМГ одним из перспективных методов построения жестового человеко-машинного интерфейса.

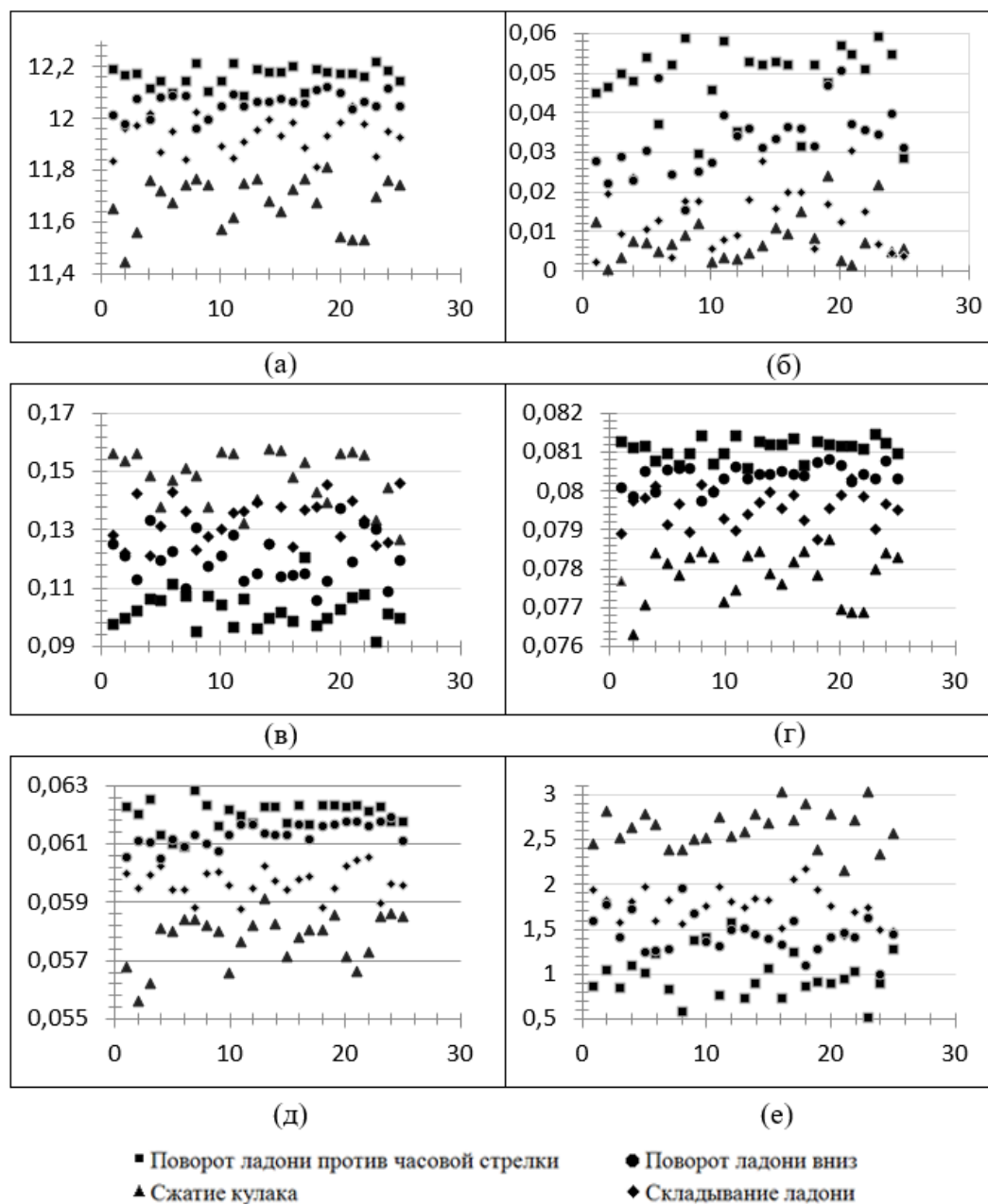
На практике часто используемым является метод поверхностной электромиографии (пЭМГ), что обуславливается его безопасностью в случае использования неспециалистами. Устройства, использующие пЭМГ оперируют суммарным сигналом группы мышц для распознавания движений. В ходе исследований был выражен ряд проблем, которые требуют решения для более качественной реализации таких интерфейсов. К таковым относятся зашумленность сигнала, распознавание паттернов движения, а также цена конечных устройств и возможность их интеграции в сторонние системы.

### Сферы применения анализа ЭМГ-сигнала

Преимущественно анализ ЭМГ-сигнала для распознавания движений нашел свое применение в сфере медицины – для восстановления двигательной активности и диагностики заболеваний, связанных с опорно-двигательной системой. Так, авторы [7] предлагают использование электромиографии для реабилитации нижних конечностей. Для повышения точности сигнала авторы предлагают использовать методы нечетких С-средних, дискретного вейвлет-преобразования и метод анализа главных компонент. Результат применения данных алгоритмов предлагается использовать в качестве входных данных для адаптивной системы нечеткого ввода-вывода.

Статья [8] описывает носимое устройство для мониторинга верхней конечности. Была разработана программная платформа для анализа данных для визуализации информации ЭКГ /ЭМГ и интегрирована в модуль управления роботизированными перчатками. Авторы отмечают высокую актуальность выделения платформы считывания сигналов в отдельный модуль, указывая, что это позволит создавать большое количество конечных устройств с меньшими ресурсными затратами. Кроме того, результаты экспериментов позволяют создать новую методику целостного мониторинга индивидуальной информации ЭКГ и ЭМГ, которая потенциально может быть применена при обучении реабилитации верхних конечностей в соответствии с конкретными условиями лечения и требованиями пользователей. В [9] Приведено описание мобильной платформы виртуальной реальности на основе метода биологической обратной связи по данным электромиографии для восстановления функций верхних конечностей. Авторами показана возможность создания такой платформы, а также ее достоинства в виде дешевой стоимости и мобильности. Для распознавания движений использовалось три признака. Полученные авторами результаты согласуются с исследованием [10]. В

частности, при использовании даже одного канала считывания сигнала, наблюдается хорошая разделяемость небольшого числа движений по признакам (рисунок 1). Схожий принцип работы имеет система, предложенная авторами [11]. В статье описывается комплекс, предназначенный для визуализации активности мышц с помощью технологий дополненной реальности. Авторы используют специальный электромиограф для получения сигнала, далее на его основе формируются изображения дополненной реальности.



**Рис. 1. Признаки выбранных классов движений для 25 образов обучающей выборки:**  
 (а) сумма значений ЭМГ-сигнала; (б) минимальное значение; (в) максимальное значение; (г) среднее арифметическое; (д) среднее абсолютное отклонение; (е) сумма разностей соседних значений

**Fig. 1. Features of selected classes of movements for 25 images of the training sample:**  
 (a) sum of EMG signal values; (б) minimum value; (в) maximum value; (г) arithmetic mean;  
 (д) mean absolute deviation; (е) sum of differences of neighboring values

Авторами [12] представлена методика реабилитации, основанная на экзоскелете нижних конечностей, интегрированном с человеко-машинным интерфейсом (НМИ). НМИ исполь-

зуются для записи и обработки мультимодальных сигналов, собранных с помощью интерфейса «мозг-машина» на основе изображений движения стопы (МІ) и многоканальных электромиографических (EMG) сигналов, записанных от мышц ног. Данные получены с помощью сертифицированного усилителя NVX 52 (ООО «Медицинские компьютерные системы», Россия). При считывании ЭМГ использованы рекомендации SENIAM. Необработанные данные ЭЭГ и ЭМГ были отфильтрованы полосовыми фильтрами с частотными диапазонами от 8 до 15 Гц и от 10 до 300 Гц соответственно. Также был применен режекторный фильтр для устранения помех от напряжения питания на частоте 50 Гц. Результаты экспериментов показали, что небольшого количества электродов ЭЭГ (семь электродов) достаточно для обеспечения эффективного онлайн-контроля. Управление вспомогательными устройствами с помощью сигналов ЭЭГ или ЭМГ они могут иметь большое применение в реабилитации. Авторы указывают, что сигналы ЭМГ не являются надежным источником для определения начала движения у пациентов со спазмом. В свою очередь, системы, основанные на ЭЭГ, показали высокий уровень ложноположительных результатов. Поэтому сочетание мультимодальных данных должно быть особенно актуальным.

Авторы [13] при проектировании прототипа протеза провели сравнительный анализ методов решающих деревьев и опорных векторов для задачи решения классификации движений. Данные ЭМГ снимались с помощью браслета Myo Armband. Авторами было обнаружено, что метод опорных векторов показывает большую точность, нежели метод решающих деревьев – до 99,9 % с использованием кубического ядра. В [1414] была предложена классификация и распознавание жестов рук с использованием сигналов электромиографии (ЭМГ) для управления протезом верхней конечности. В этом исследовании сигналы ЭМГ измерялись с помощью встроенной системы с помощью браслета управления жестами MYO. После извлечения данных ЭМГ из MYO был применен метод контролируемой классификации для распознавания различных движений рук. Классификация была выполнена с использованием 5-кратной методики перекрестной проверки под наблюдением квадратичного дискриминантного анализа (QDA), машины опорных векторов (SVM), случайного леса, усиленного градиентом, ансамбля (упакованного дерева) и ансамбля (подпространства K-ближайших соседей) классификатора. Выполнение этих классификаторов показывает общую точность 83,9 % в случае ансамбля, что выше, чем у других классификаторов.

Анализ мышечной активности находит свое применение и в спорте. Так, авторы [15] используют электромиографию для анализа активности предплечья во время упражнений на тягу зависит от типа хвата и пола. Авторами был применен фильтр Баттерворта и алгоритм сглаживания сигнала с помощью среднего квадратического. Для обработки работы с сигналом использовалось ПО *AcqKnowledge Data Analysis*. Авторы [16] рассмотрели различия в максимальной мышечной активации (EMGPEAK) или средней выпрямленной переменной мышечной активации (EMGARV) во время хвата в положении лежа, хвата с пронацией, нейтрального хвата и упражнений на подтягивание со скакалкой. Девятнадцать мужчин, тренированных в силе ( $24,9 \pm 5$  лет;  $1,78 \pm 0,74$  м;  $81,3 \pm 11,3$  кг;  $22,7 \pm 2,5$  кг м<sup>2</sup>), вызвались принять участие в исследовании. Поверхностная электромиография (ЭМГ) была собрана с восьми мышц комплекса плечо-рука-предплечье. Результаты показывают, что EMGPEAK и EMGARV комплекса плечо-рука-предплечье во время полных повторений вариантов подтягивания схожи, несмотря на различную ориентацию рук; однако существуют различия между концентрической и эксцентрической фазами каждого подтягивания.

### Методы предобработки ЭМГ-сигнала

Анализ литературы позволяет сделать вывод о большой актуальности исследований как в медицинской сфере, так и в области спорта. Наибольший интерес вызывают задачи повышения точности распознавания движений, их количества, а также удобства повседневного использования систем для распознавания движений. Для решения данных задач многочисленные исследования идут в сферах предобработки поступающих сигналов, а также в обла-

сти методов распознавания и классификации движений на основе данных как обработанных, так и необработанных электромиограмм. ЭМГ-сигнал нестационарен по своей природе и подвержен зашумлению. Для корректной классификации движений на его основе требуется предобработка. При этом электромиограммы разных людей лежат в разных пределах, что также усложняет процесс классификации. Предобработка ЭМГ-сигналов призвана минимизировать отношение сигнал/шум, а также нормализовать его значения, что может привести к повышению точности классификации.

Авторы [11] отмечают, что возможно использование широкого спектра алгоритмов, включая спектральное оценивание, как с помощью преобразований Фурье, так и с использованием вейвлет-преобразования, адаптивные фильтры, искусственные нейронные сети и т.д. Авторы [17] в своем обзоре указывают, что несмотря на множество подходов к обработке сигналов, в большинстве случаев используются фильтры верхних частот в диапазоне от 10 до 50 Гц (иногда выше) и фильтры нижних частот около 500 Гц, а также режекторные фильтры для устранения помех в линии электропередачи на частоте 50/60 Гц. Кроме того, применяются полосовые фильтры, а также усилители сигнала. Усиление обычно составляет от 500 до 2000 раз. В работе [18] был проведен анализ сигнала ЭМГ, представленного с использованием частотно-временного распределения (TFD), которое представляет собой спектрограмму с различным размером окна. Авторами отмечено, что быстрое преобразование Фурье (FFT) не дает временного представления сигнала, в то время как вейвлет-преобразование (WT) вычислительно сложнее. WT имеют высокое разрешение по времени для высокочастотного компонента и высокое разрешение по частоте для низкочастотного сигнала, такого как переходный. Авторы провели сравнительный анализ временных окон в 64, 128, 256, 512 и 1024 сэмпла и выяснили, что окно размера 512 является наилучшим по производительности и наиболее совместимым для реализации обработки сигнала.

Авторы [19] разработали графический пользовательский интерфейс (GUI) siGnum, использующий ряд методов для обработки и декомпозиции необработанных сигналов ЭМГ. Авторами применялись вейвлет-преобразования для коррекции смещения базовой линии ЭМГ-сигнала, а также полосовой фильтр. Для проведения временного анализа, использовались полноволновое и полуволновое выпрямление сигнала, алгоритм скользящего среднего, а также фильтр Баттенворта. Для проведения частотного анализа использовались алгоритмы быстрого преобразования Фурье, медианной частоты и средней частоты. В [20] приводится обзор методов распознавания паттернов движения ЭМГ-сигналов, причем как для изотонических, так и для изометрических. Авторы описывают шесть видов шумов, возникающих в ЭМГ-сигналах. Отмечается, что чаще всего для обработки сигнала используются полосовые фильтры, адаптивные фильтры, фильтры низких частот, фильтры Баттенворта.

Авторы [21] отмечают, что влияние фильтров высокой частоты HPF на амплитуду может (частично) быть компенсировано с помощью надлежащей нормализации, предполагая, что распределение частот постоянно масштабируется по уровням активации. Авторами рассматривалась возможность автоматического удаления зашумления ЭКГ на основе ICA (независимый компонентный анализ) из записей ЭМГ, и сравнили его с более традиционными HPF и FAS (фильтрация с помощью адаптивной выборки), а также методом Хофа, который заключается в одновременной записи ЭКГ и ЭМГ. Авторы указывают, что, поскольку ни один из методов не был оптимальным при всех измерениях результата, выбор метода для снятия ЭКГ следует делать в зависимости от типа сигналов и обстоятельств, при которых записываются данные, и, конечно же, от типа интересующих показателей результата.

Анализ текущих исследований позволяет сделать вывод о том, что наиболее часто предобработка ЭМГ-сигналов производится посредством средств и позволяет достичь результатов, представленных в табл. 1.

*Таблица 1.*

**Результаты исследований, посвященных анализу предобработки ЭМГ-сигналов**

*Table 1.*

**Results of studies devoted to the analysis of preprocessing of EMG signals**

<b>Способ предобработки</b>	<b>Проведенные исследования</b>	<b>Применения</b>
Преобразования Фурье	11, 17, 18, 19, 22, 23, 24	Указано, что ДВП обладает большей эффективностью при визуализации нейропатии и миопатии по сравнению с ОПФ. Обеспечивается высокая точность как для динамических, так и для стохастических данных. В настоящее время в основном изучаются две характеристики средней частоты мощности и медианной частоты
Вейвлет-преобразования	7, 11, 17, 19, 25, 26, 27	Указано, что ДВП обладает большей эффективностью при визуализации нейропатии и миопатии по сравнению с ОПФ. Достигнута точность до 95 %. Отмечено, что Вейвлет-преобразование (WT) аналогично STFT, в то время как оно преодолевает тот недостаток, что окно не изменяется с частотой в STFT. Регулируя ширину окна, WT адаптируется к изменениям частоты сигнала. Когда частота обрабатываемого сигнала увеличивается, WT улучшает разрешение за счет сужения временного окна.
Фильтр Баттерворта	7, 12, 19, 20, 25, 28	Используется для удаления артефактов движения, низко- и высокочастотных заграждающих помех, а также для фильтрации по полосам пропускания. Используется для определения начала активности мышц
Режекторные фильтры	8, 21	Применяется для улучшения отсечения частот, не несущих ценности для распознавания сигнала, в частности, для удаления шумов силовых линий используется режекторный фильтр 50 Гц

Несмотря на то, что многие методы предобработки электромиограмм показывают высокую эффективность, в малой мере рассмотрен вопрос сравнения качества их работы относительно друг друга. Для решения этого вопроса предлагается проведение ряда тестов, учитывающих различную природу движений человека. Ожидается, что в результате решения этого вопроса будет возможно сделать вывод о предпочтительном выборе того или иного метода для решения конкретной задачи, в частности при рассмотрении конкретных групп движений.

Кроме того, анализ исследований, посвященных предобработке сигналов позволяет сделать вывод о слабой освещенности вопроса динамической смены способов предобработки для решения аналогичных задач. Такой подход потенциально позволит адаптироваться к изменяющимся условиям использования устройств-считывателей электромиограмм с минимальными потерями в точности классификации.

Сигнал, прошедший обработку, в дальнейшем используется для различных задач, наиболее известной из которых является распознавание и классификация движений. Для этого применяется широкий спектр методов, наибольший интерес из которых вызывают методы машинного обучения.



## Методы распознавания и классификации движений на основе ЭМГ-сигнала

Существует несколько подходов, применяющихся к распознаванию и классификации движений на основе методов машинного обучения. Авторы [29] провели анализ метода опорных векторов, многослойного персептрона, метода случайного леса и метода максимального правдоподобия на основе плотностей вероятностей энтропий для классификации данных одноканальной ЭМГ. Авторы указывают, что последний слабо подходит для классификации данных одноканальной ЭМГ в силу больших потерь в точности. Среди других методов наименьшую вероятность ошибки показал метод случайного леса. В работе [30] проведено сравнение эффективности методов сверточной нейронной сети (СНС) и радиальной базисной функции (РБФ). Авторы указывают, что СНС показывает большую применимость при анализе необработанных данных, в то время как РБФ обладает большей точностью. Отмечается, что, хотя алгоритм СНС показал хорошие результаты для необработанного ЭМГ-сигнала, достичь устойчивой производительности позволила обучающая выборка с многодневными данными, что вносит ограничения на его использование в клинических системах.

В [31] авторами предлагается система, которая объединяет дополнительные ЭМГ-сигнал от мышц и визуальную информацию. Этот многосенсорный подход, повышая точность и надежность, однако создает недостаток в виде высоких вычислительных затрат, которые растут экспоненциально с увеличением количества датчиков и количества измерений. Авторами предлагается полностью нейроморфный подход к объединению датчиков для распознавания жестов рук, состоящий из датчика зрения на основе событий и трех различных нейроморфных процессоров. Применялась камера, основанная на событиях, называемая DVS, и две нейроморфные платформы, Loihi и ODIN + MorphIC. Авторами были разработаны спайковые нейронные сети (SNN) для слияния датчиков, которые показали точность классификации, сравнимую с базовой версией программного обеспечения. Эти нейроморфные альтернативы увеличили время вывода на 20-40 % по сравнению с системой, использующей GPU, но имеют значительно меньший продукт задержки энергии (EDP), что делает их от 30-ти до 600 раз более эффективными.

Авторы [22] провели анализ эффективности следующих методов машинного обучения: наивного байесовского классификатора (НБК), дерева решений (DT), случайного леса (RF), градиентного бустинга, метода опорных векторов (SVM), метода k-ближайших соседей и ансамблей методов (НБК и дерево решений, НБК и градиентный бустинг, градиентный бустинг и дерево решений). Для анализа было проведено 2 эксперимента, в общей сумме было снято по 5000 жестов для каждого из трех экспериментов. Для каждого положения электродов обучающая выборка содержала 2500 жестов (по 500 сокращений мышц предплечья для каждого жеста). Тестовая выборка также состояла из 2500 жестов (по 500 сокращений мышц предплечья для каждого жеста). Все жесты выполнялись преобладающей правой рукой. Наибольшую эффективность показали метод k-ближайших соседей, случайный лес и ансамбль НБК и градиентного бустинга, средняя точность которого для трех положений электродов составила 81,55 %.

Авторы [32] использовали SVM, RF, многослойный персептрон (MLP) и глубокую нейронную сеть (DNN) для построения классификатора пяти жестов в псевдо-реальном времени. Авторы достигли точности распознавания в 92 % и делают вывод о том, что ансамбль традиционных методов машинного обучения может превзойти в точности классификации глубокое обучение. Отмечается важность калибровки модели, процесс калибровки модели способен повысить точность классификации моделей с 67,87 % в реальном времени до 91,93 %, увеличившись на 24,06 %.

В [33] предлагается применение классификации на основе совместного представления (CRC) в спектральной области для распознавания жестов рук с использованием необработанных сигналов пЭМГ. Метод классификации основан на классификации, основанной на CRC, которая конкурирует с классификацией, основанной на разреженном представлении

(SRC), с теми же уровнями точности, но гораздо более быстрым временем вычислений. Недостатком CRC по сравнению с SRC является то, что CRC требует, чтобы наблюдаемые и обучающие шаблоны сигналов были одинаковой длины. Это ограничивает использование методов CRC для распознавания жестов и поз, в которых продолжительность жестов может варьироваться для каждого повторения. С другой стороны, методы SRC основаны на точности представления, тогда как CRC – на точности данных. Авторы делают вывод о том, что методы SRC дают хорошие результаты классификации до тех пор, пока словарная матрица является чрезмерно «полной», тогда как CRC не требует чрезмерно полных словарей.

Авторы [34] предлагают тензорный подход, основанный на использовании многолинейной сингулярной декомпозиции (MLSVD) для распознавания жестов рук, где во время обучения использовались все доступные каналы, в то время как для распознавания новых жестов использовался только один канал. MLSVD был применен для моделирования тензора и извлечения объектов, которые затем были введены в различные классификаторы, такие как SVM, K-ближайших соседей (KNN), *TreeBagger* (TB), чтобы сравнить их производительность. Предлагаемый метод был оценен на трех общедоступных базах данных (*NinaPro*, *CapgMyo* (DB-a, DB-b и DB-c), CSL-HDEG) путем проведения внутрисессионных, межсессионных и межпредметных оценок в каждой базе данных. Предложенный метод показал лучшие результаты как во время межсессионных, так и межпредметных оценок, чем современные методы.

Особого внимания заслуживает вопрос классификации плавных движений. Авторы [35] предлагают алгоритм MRestML для распознавания плавных движений руки. Экспериментальные результаты показывают, что в одной и той же модели распознавания эффект распознавания жестов при слиянии сигнала пЭМГ и сигнала ускорения лучше, чем при использовании только сигнала пЭМГ. Предлагаемый подход обеспечивает конкурентоспособную производительность в нашем наборе данных с точностью распознавания 93,52 %, обеспечивая современную производительность с точностью 89,65 % в наборе данных *Ninapro DB1*. Вопрос распознавания плавных движений является актуальным, однако на данный момент его освещенность недостаточна.

В работе [36] представлена межиндивидуальная модель распознавания жестов рук, основанная на скрытых марковских моделях (HMM), которая принимает сигналы пЭМГ в качестве входных данных и предсказывает соответствующий жест руки. В этой работе HMM со смесью гауссовых выходных сигналов обучается кодированию сигналов пЭМГ, связанных с каждым жестом руки (HMM, специфичный для жестов). Разработанная модель распознавания была протестирована с набором данных из 10 различных жестов рук, выполненных 25-ю испытуемыми в ходе перекрестной проверки «оставить одного субъекта», и был достигнут уровень распознавания между отдельными лицами 79 %.

Анализ исследований, посвященных распознаванию движений, делает возможным вывод о том, что наиболее часто применяются методы, представленные в табл. 2.

Исследование позволяет предположить, что многие классификаторы обладают достаточной эффективностью при решении задачи распознавания движений. При этом ставятся как вопросы эффективности классификации движений в целом, так и в частности определения движений в режиме реального времени.

Одним из перспективных направлений исследований в данной области является применение ансамблей классификаторов. Ожидается, что такой подход может оказаться полезным как с точки зрения точности, так и скорости распознавания.

*Таблица 2.*  
**Результаты исследований методов распознавания движений на базе ЭМГ-сигнала**

*Table 2.*  
**Research results of movement recognition methods based on the EMG signal**

Способ классификации	Проведенные исследования	Результаты
MLP	20, 29, 37	Способен предусматривать нелинейные границы классов, отмечается сложность определения границ классов, а также проблемы недообучения, высокие затраты вычислительных ресурсов, неспособен работать при условии недостающих данных
RF	20, 22, 32, 38	Показывает высокую эффективность классификации Главным недостатком метода является высокая временная сложность
kNN	14, 20, 22, 23, 34	Высокая временная сложность
PCA	17, 21, 35, 39	Использовался для реабилитации людей, перенесших инсульт Точность более 90 %
SVM	13, 14, 20, 22, 26, 28, 29, 32, 34, 37	Отмечается высокая чувствительность к шумам и подбору параметров. В ряде случаев может демонстрировать большую точность, нежели ANN.
LSTM	38, 40, 41, 42	Большое число параметров Большая скорость по сравнению с CNN
RNN	38, 41	Динамические модели (RNN) с меньшим количеством параметров могут достигать точности, аналогичной статической модели (FFNN), а время обучения и вывода короче.
CNN	28, 30, 31, 38, 40, 41	Устойчивее RNN в ежедневной деятельности Может автоматически извлекать пространственные объекты из входных данных или извлекать немаркированные объекты. Отсутствие разнообразия в записях пЭМГ между определенными жестами рук ограничивает производительность модели
LDA	12, 20, 24, 37, 43	Сложность при использовании LDA в качестве классификатора заключается в том, что большинство, если не все ограничения, зависят от применений. Отмечается, что LDA является широко используемым и базовым методом благодаря своей простоте, надежной классификации для долгосрочного использования и разумной производительности при распознавании жестов

### Заключение

В статье рассмотрены исследования, связанные с классификацией движений на основе электромиографии, предобработке ЭМГ-сигнала и нивелированию влияния шумов на его форму. По результатам обзор актуальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Несмотря на большое число исследований, точность распознавания движений в режиме реального времени недостаточна для практического применения. Кроме того, требуется обеспечить возможность распознавания различных движений, что является сложной задачей в рамках применения одного классификатора. Перспективным решением данной проблемы является применение ансамблей классификаторов, в том числе, основанных на методах глубокого обучения.
2. По-прежнему проблемой является индивидуальный характер шумов, влияющих на ЭМГ-сигнал. Одним из способов решения данной проблемы является применение наборов фильтров с возможностью динамического выбора конкретного фильтра при достижении заданных условий. Ожидается, что решение данных задач позволит осуществлять классификацию движений на базе ЭМГ-сигнала у широких групп пользователей в режиме реального времени с точностью достаточной для практического применения.

### Библиографический список

1. PS: PlayStation Move motion controller help [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.playstation.com/en-us/support/hardware/ps-move-help> (Дата обращения: 13.02.2023).
2. Vive Россия и СНГ [Электронный ресурс] // Режим доступа: URL: <https://www.vive.com> (дата обращения: 13.02.2023).
3. Kinect for Windows – Windows [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://learn.microsoft.com/en-us/windows/apps/design/devices/kinect-for-windows> (дата обращения: 13.02.2023).
4. Cyberglove Systems LCC [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.cyberglovesystems.com> (дата обращения: 13.02.2023).
5. Digits [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/digits/> (дата обращения: 13.02.2023)
6. **Гусев, Е.И.** Неврология и нейрохирургия: учебник / Е.И. Гусев, А.Н. Коновалов, В.И. Скворцова – 4-е изд., доп. – Т.1. Неврология. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2015. – 640 с.
7. **Nurzhazimah N.** Electromyography (EMG) based Signal Analysis for Physiological Device Application in Lower Limb Rehabilitation. / N. Nurzhazimah, A. Rahman, M. Azizi [et al.] // 2015 2nd International Conference on Biomedical Engineering (ICoBE) – 2015 – pp. 1-6.
8. **Zhao, S.** Wearable Physiological Monitoring System Based on Electrocardiography and Electromyography for Upper Limb Rehabilitation Training / S. Zhao, L. Jianxun, G. Zidan [et al.] // Sensors. 2020. V. 20, № 17. С. 4861
9. **Самман, А.** Мобильная платформа виртуальной реальности для восстановления функций верхних конечностей с использованием данных электромиографии / А. Самман, В.А. Шахнов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2021. – № 3(136). – С. 84-99. – DOI 10.18698/0236-3933-2021-3-84-99. – EDN JIWEUM.
10. **Bunyaeva, E.V.** Comparative analysis of intellectual methods for muscular contraction interpretation for gesture interface implementation / E.V. Bunyaeva, I.V. Kuznetsov, Y.V. Ponomarchuk, P.S. Timosh // Journal of Physics: Conference Series, Vladivostok, 07–08 октября 2021 года. – Vladivostok, 2021. P. 012190. – DOI 10.1088/1742-6596/2096/1/012190. – EDN QQSUOF.
11. **Туровский, Я.А.** Информационная система биологической обратной связи по электромиографическому каналу с использованием очков дополненной реальности / Я.А. Туровский, Я.В. Арефьев, А.В. Алексеев, Ю.А. Ипполитов // Вестник новых медицинских технологий. 2017. Т. 24, № 2. С. 147-151. – DOI 10.12737/article\_5947d3f44242c4.01994237. – EDN ZDHMHF.
12. **Gordleeva, S.Y.** Real-Time EEG-EMG human-machine interface-based control system for a lower-limb exoskeleton / S.Y. Gordleeva, S.A. Lobov, N.A. Grigorev [et al.] // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 84070-84081. DOI 10.1109/ACCESS.2020.2991812. – EDN JPUAOC.
13. **Espinosa, D.L.** Comparison of EMG signal classification algorithms for the control of an upper limb prosthesis prototype / D.L. Espinosa, L. Elí Sánchez Velasco // 2020 17th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), – Mexico City, Mexico. 2020. – pp. 1-4. doi: 10.1109/CCE50788.2020.9299208

14. **Javaid, H.A.** Classification of Hand Movements Using MYO Armband on an Embedded Platform / H.A. Javaid [et al.] // *Electronics*. – Basel: MDPI AG, 2021. V10, № 11. P. 1322.
15. **Pratt, J.** Forearm electromyographic activity during the deadlift exercise is affected by grip type and sex / J. Pratt, A. Hoffman, A. Grainger, M. Ditroilo // *Journal of Electromyography and Kinesiology*. – 2020 V. 53. P. 102428. DOI 10.1016/j.jelekin.2020.102428
16. **Dickie, J.** Electromyographic analysis of muscle activation during pull-up variations. / J. Dickie, J. Fulkner, M. Barnes, S. Lark // *Journal of Electromyography and Kinesiology*. – 2016 – V.32. – pp. 30-36. DOI 10.1016/j.jelekin.2016.11.004
17. **Simão, M.A.** A Review on Electromyography Decoding and Pattern Recognition for Human-Machine Interaction. / M.A. Simão, N. Mendes, O. Gibaru, P. Neto // *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 39564-39582.
18. **Zawawi, T. N. S. T.** Electromyography signal analysis using spectrogram / T.N.S.T Zawawi, A. R. Abdullah, E. F. Shair, I. Halim and O. Rawaida // 2013 IEEE Student Conference on Research and Development – Putrajaya, Malaysia, 2013, – pp. 319-324. DOI 10.1109/SCORED.2013.7002599
19. **Kaur, M.** SiGnum: Graphical user interface for EMG signal analysis / M. Kaur, S. Mathur, D. Bhatia, S. Verma // *Journal of medical engineering & technology*. – 2015. – V. 39 –pp. 1-7. DOI 10.3109/03091902.2014.973615
20. **Nazmi, N.** A Review of Classification Techniques of EMG Signals during Isotonic and Isometric Contractions / N. Nazmi, Abdul Rahman M.A., Yamamoto S.-I. [et al.] // *Sensors*. – 2016. – № 8, V. 16. – p. 1304. DOI 10.3390/s16081304
21. **Willigenburg, N.W.** Removing ECG contamination from EMG recordings: a comparison of ICA-based and other filtering procedures. /N.W. Willigenburg, A. Daffertshofer, I. Kingma, J.H. van Dieën // *Journal of electromyography and kinesiology: official journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology*. 2012. V. 22. № 3. P. 485-93. DOI 10.1016/j.jelekin.2012.01.001
22. **Козырь, П.С.** Анализ эффективности методов машинного обучения в задаче распознавания жестов на основе данных электромиографических сигналов / П.С. Козырь, А.И. Савельев // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2021. Т. 13, № 1. С. 175-194. – DOI 10.20537/2076-7633-2021-13-1-175-194. – EDN OTBBNJ.
23. **Sziburis, T.** KNN Learning Techniques for Proportional Myocontrol in Prosthetics. / T. Sziburis, M. Nowak, D. Brunelli // *Biosystems & Biorobotics*. 2022. V. 28. P. 679-685. DOI 10.1007/978-3-030-70316-5\_109
24. **Qi, J.** Intelligent Human-Computer Interaction Based on Surface EMG Gesture Recognition / J. Qi, G. Jiang [et al.] // *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 61378-61387. DOI 10.1109/ACCESS.2019.2914728
25. **Lulic-Kuryllo, T.** Sub-regional activation of supraspinatus and infraspinatus muscles during activities of daily living is task dependent / T. Lulic-Kuryllo, T. Alenabi, A.C. McDonald [et al.] // *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2020. V. 54. P. 7. DOI 10.1016/j.jelekin.2020.102450
26. **Кабанов, А.А.** Разработка системы классификации жестов руки на основе сигналов электромиографии / А.А. Кабанов // *Омский научный вестник*. 2021. V. 177. № 3. С. 79-84. – DOI 10.25206/1813-8225-2021-177-79-84. – EDN KHFLVH.
27. **Chen, X.** Local Band Spectral Entropy Based on Wavelet Packet Applied to Surface EMG Signals Analysis / X. Chen, P. Xie, H. Liu [et al.] // *Entropy*. – Basel: MDPI AG, 2016. V. 18(2). P. 41.
28. **Asif, A.R.** и др. Performance Evaluation of Convolutional Neural Network for Hand Gesture Recognition Using EMG // *Sensors*. 2020. Т. 20. № 6. с. 1642.
29. **Лукьянчиков, А.И.** Алгоритмы классификации одноканального ЭМГ-сигнала для человеко-компьютерного взаимодействия / А.И. Лукьянчиков, А.О. Мельников, О.И. Лукьянчиков, А.Н. Никольский // *Cloud of Science*. 2018. Т. 5, № 2. С. 300-309. – EDN URTJQS.
30. **Будко, Р. Ю.** Методы анализа электромиограммы руки / Р.Ю. Будко, Н.Н. Чернов, Н.А. Будко // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2019. Т. 62. № 12. С. 1098-1104. – DOI 10.17586/0021-3454-2019-62-12-1098-1104. – EDN MBQWKM
31. **Ceolini, E.** Hand-Gesture Recognition Based on EMG and Event-Based Camera Sensor Fusion: A Benchmark in Neuromorphic Computing / E. Ceolini, C. Frenkel, S. Shrestha [et al.] // *Frontiers in Neuroscience*. 2020. P. 637. DOI 10.3389/fnins.2020.00637
32. **Dolopikos, C.** Electromyography Signal-Based Gesture Recognition for Human-Machine Interaction in Real-Time Through Model Calibration. / C. Dolopikos, M. Pritchard, J. Bird [et al.] // *Advances in Information and Communication - Proceedings of the 2021 Future of Information and Communication Conference, FICC*. 2021. V. 1364 AISC. P. 898-914.

33. **Boyalı, A.** Spectral Collaborative Representation based Classification for hand gestures recognition on electromyography signals / A. Boyalı, N. Hashimoto // Biomedical Signal Processing and Control. – 2016. – Т. 24. – С. 11-18.
34. **Padhy, S.** A Tensor-based Approach using Multilinear SVD for Hand Gesture Recognition from sEMG signals // IEEE Sensors Journal. 2020. № 5, V. 21 P. 1-9. DOI 10.1109/JSEN.2020.3042540
35. **Yang, Z.** Dynamic Gesture Recognition Using Surface EMG Signals Based on Multi-Stream Residual Network / Z. Yang, D. Jiang, Y. Sun [et al.] // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2021. V. 9. P. 779353. DOI 10.3389/fbioe.2021.779353
36. **Samadani, A.-A.** Hand gesture recognition based on surface electromyography / A.-A. Samadani, D. Kulic // 2014 36-th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2014. P. 4196-4199. DOI 10.1109/EMBC.2014.6944549
37. **Spiewak, C.** A Comprehensive Study on EMG Feature Extraction and Classifiers / C. Spiewak, I. Md Rasedul, A.-U. Zaman, M.H. Rahman // Open Access Journal of Biomedical Engineering and its Applications. 2018. V. 1. № 1. P. 10. DOI 10.32474/OAJBEB.2018.01.000104
38. **Li W.** Gesture Recognition Using Surface Electromyography and Deep Learning for Prostheses Hand: State-of-the-Art, Challenges, and Future / W. Li, P. Shi, H. Yu // Frontiers in neuroscience. 2021. V. 15. P. 621885. DOI 10.3389/fnins.2021.621885
39. **Rojas-Martínez, M.** High-density surface electromyography signals during isometric contractions of elbow muscles of healthy humans // M. 39. Rojas-Martínez, L.Y. Serna, M. Jordanic [et al.] // Scientific Data. 2020. V.7. № 1 P. 397. DOI 10.1038/s41597-020-00717-6
40. **Chen, L.** Hand Gesture Recognition Using Compact CNN via Surface Electromyography Signals / L. Chen, J. Fu, Y. Wu [et al.] // Sensors. Basel: MDPI AG, 2020. V. 20. № 3. P. 672. – DOI 10.3390/s20030672.
41. **Tsinganos, P.** The Effect of Space-filling Curves on the Efficiency of Hand Gesture Recognition Based on sEMG Signals / P. Tsinganos, B. Cornelis, J. Cornelis [et al.] // International journal of electrical and computer engineering systems. 2021. V. 12. P. 23-31. DOI 10.32985/ijeces.12.1.3
42. **Kim, J.-S.** Two-Step Biometrics Using Electromyogram Signal Based on Convolutional Neural Network-Long Short-Term Memory Networks / J.-S. Kim, M.-G. Kim, S.-B. Pan // Applied Sciences. 2021. V.11. № 15. P. 6824.
43. **Côté-Allard U.** Unsupervised Domain Adversarial Self-Calibration for Electromyographic-based Gesture Recognition. / U. Côté-Allard, G. Gagnon-Turcotte, A. Phinyomark, Angkoon // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 177941-177955. DOI 10.1109/ACCESS.2020.3027497

*Дата поступления  
в редакцию: 26.05.2023*

*Дата принятия  
к публикации: 10.07.2023*

УДК 004.032.26

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_43

## ГРАФОВЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ С СЕТЕВОЙ СТРУКТУРОЙ

**О.П. Тимофеева**ORCID: 0000-0002-1935-7697 e-mail: [optimofeeva@mail.ru](mailto: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](mailto:maximgrdv@gmail.com)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***А.Н. Санников**ORCID: 0000-0002-8418-506X e-mail: [lexsannikov@yandex.ru](mailto:lexsannikov@yandex.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Рассматривается задача построения системы социальных рекомендаций на основе графовых нейронных сетей (GNN). Описывается математическая постановка задачи для построения социальных рекомендаций двух видов: *пользователь-пользователь* и *пользователь-товар*, на основании которой разработана рекомендательная система, способная учитывать совместное отображение взаимодействий и мнений в графе пользовательских элементов. Представлен сравнительный анализ алгоритмов на основе вычисления среднеквадратической ошибки (RMSE) и средней абсолютной ошибки степени несоответствия (MAE) между фактическими и предсказанными значениями. Экспериментальные результаты показывают, что предложенная модель графовой нейронной сети превосходит современные существующие методы: алгоритмы, базирующиеся на основе социальных влияний, алгоритмы на основе интересов пользователей и на основе взаимодействия между пользователями и товарами. Сетевые структуры являются одними из наиболее часто используемых средств представления информации в задачах управления. При помощи графов происходит моделирование управления цепями поставок в логистических системах, решаются задачи в области оптимизации перевозок, разрабатываются новые алгоритмы информационной безопасности.

**Ключевые слова:** задачи с сетевой структурой, рекомендательная система, графовые нейронные сети, искусственный интеллект, прогнозирование рейтинга, социальная агрегация.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Тимофеева, О.П. Графовые нейронные сети в решении задач с сетевой структурой / О.П. Тимофеева, М.М. Гордеев, А.Н. Санников // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 43-50.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_43

## GRAPHIC NEURAL NETWORKS IN SOLVING PROBLEMS WITH A NETWORK STRUCTURE

**O.P. Timofeeva**ORCID: 0000-0002-1935-7697 e-mail: [optimofeeva@mail.ru](mailto: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](mailto:maximgrdv@gmail.com)Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.N. Sannikov**

ORCID: **0000-0002-8418-506X** e-mail: **lexsannikov@yandex.ru**

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

**Abstract.** Network structures are one of the most frequently used means of presenting information in management tasks. Graphs are used to model supply chain management in logistics systems, solve problems in the field of transportation optimization, develop new information security algorithms. One of the tasks with a network structure is the construction of systems of social recommendations. Creating such systems is one of the urgent tasks of information technology and artificial intelligence. The paper considers the problem of building a system of social recommendations based on graph neural networks (GNN). The mathematical formulation of the problem for building social recommendations of two types is described: user-user and user-product, on the basis of which a recommendation system has been developed that can take into account the joint display of interactions and opinions in the graph of user elements. The paper presents a comparative analysis of algorithms based on the calculation of the root mean square and the average absolute error of the degree of discrepancy (MAE) between the actual and predicted values. Experimental results show that the proposed graph neural network model is superior to modern existing methods: algorithms based on social influences, algorithms based on user interests and based on interaction between users and products.

**Key words:** tasks with a network structure, recommendation system, graph neural networks, artificial intelligence, rating forecasting, social aggregation.

**FOR CITATION:** O.P. Timofeeva, M.M. Gordeev, A.N. Sannikov. Graph neural networks in solving problems with a network structure. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 3. Pp. 43-50.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_43

## Введение

Сетевые структуры являются мощным механизмом представления информации и используются во многих прикладных задачах. С их помощью проводится как математическое, так и физическое моделирование процессов, например, движение товаров по цепям поставок для определения оптимального маршрута следования с целью минимизации затрат предприятий. В последнее время большую популярность обрели графовые нейронные сети (GNN), на основе которых решаются задачи оптимизации бизнес-процессов.

Основная идея графовых нейронных сетей заключается в итеративной агрегации информации об имеющихся объектах из локальных окрестностей графа. Информация об узле может быть распространена по графу после преобразования и агрегирования, т.е. GNN способны естественным образом интегрировать информацию о топологической структуре. Такие сети показали свою эффективность в различных практических задачах [1-7]. Так, в работе [1] описывается применение графовых сетей при проектировании систем социальных рекомендаций, а в работе [2] представлена модель DANSER, которая объединяет полученные из графовой системы данные для прогнозирования рейтингов и предпочтений пользователей в отношении рассмотренных товаров. Графовые нейронные сети могут быть использованы в качестве алгоритма оптимизации процессов. В [3] описано динамическое планирование рабочих мест компании при помощи GNN, а в [4] на базе пространственно-временного графа представлена прогностическая модель функционирования логистической сети управления цепочками поставок продукции.

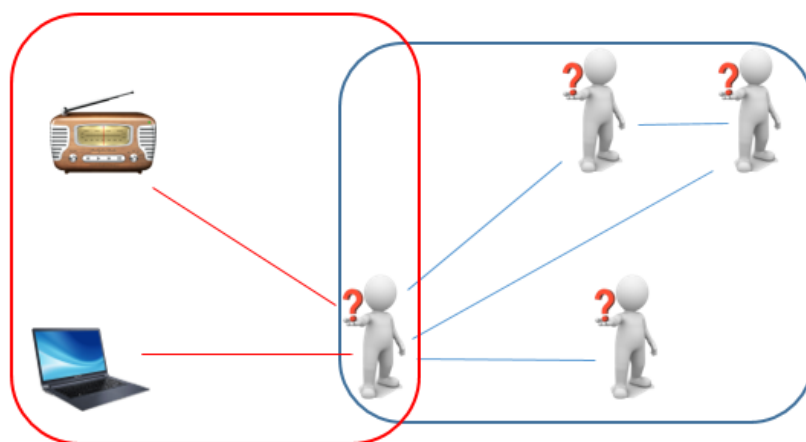
Таким образом, графовые нейронные сети широко используются для решения задач комбинаторной оптимизации, прогнозирования свойств частиц и молекул, но еще больший потенциал они представляют для выполнения социальных рекомендаций, где происходит моделирование взаимодействия пользователей с товарами на различных онлайн платформах.

## Постановка задачи

Задача рекомендательной системы заключается в том, чтобы проинформировать пользователя о товаре, который может быть интересен ему в текущий момент времени, а также обобщить имеющуюся информацию и предсказать отношение клиента к тем товарам, про



которые еще ничего неизвестно. Необходимые для обработки данные представляются в виде системы, состоящей из двух графов (рис. 1): *социального графа*, отражающего отношения между пользователями, и графа *пользователь-товар*, отражающего взаимодействия между пользователями и товарами. Естественным способом социальной рекомендации является включение информации из социальной сети в изучение скрытых факторов пользователя, характеризующих его предпочтения, и товара, характеризующих его особенности, например, популярность и т.п. Изучение представлений и о товарах, и о пользователях является ключом к созданию системы социальных рекомендаций.



**Рис. 1. Взаимосвязи пользователей и товаров в системе социальных рекомендаций**

**Fig. 1. The relationship between users and products in the system of social recommendations**

Создание систем социальных рекомендаций, основанных на GNN, должно охватывать информацию о пользователях с разных точек зрения. Так, чтобы лучше изучить представления пользователей, необходимо агрегировать информацию с обоих графов. Граф *пользователь-товар* не только отражает взаимодействия между пользователями и товарами, но также включает мнения пользователей о товарах. Следовательно, необходимо одновременно учитывать и взаимодействия между пользователями и их мнения о товарах. Например, пользователь взаимодействует с товарами «радио» и «ноутбук», которые он готов купить, или уже покупал ранее, как следствие, он имеет мнение о них, отраженное в графе (рис. 1). Равнозначный учет социальных связей может привести к снижению эффективности рекомендаций. Следовательно, нужно найти способ различать социальные связи с неоднородной силой.

В данной работе ставится цель – разработать при помощи графовой нейронной сети систему рекомендаций, учитывающую социальные взаимодействия и решающую задачу прогнозирования рейтинга товаров на основе мнений и предпочтений пользователей. Для этого необходимо:

- создать и обучить графовую нейронную сеть, способную когерентно моделировать графовые представления данных в системе социальных рекомендаций;
- ввести метод математического учета разнородных сильных сторон социальных отношений;
- протестировать обученную модель нейронной сети на существующих реальных наборах данных.

Обозначим  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  – множество пользователей и  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  – множество товаров, где  $n$  – количество пользователей, и  $m$  – количество товаров.  $R \in \mathbb{R}^{n \times m}$  – матрица оценок товаров пользователями, которая также является графом *пользователь-товар*. Если  $p_i$  дает оценку  $t_j$ , то  $r_{ij}$  – это рейтинговая оценка. Если оценки товара еще нет, то  $r_{ij} = 0$ . Рейтинговая оценка  $r_{ij}$  может рассматриваться как мнение пользователя  $p_i$  о товаре  $t_j$ .

Пусть  $N(i)$  – множество пользователей, а  $C(i)$  – набор товаров, с которыми взаимодействовал пользователь  $p_i$ ;  $B(j)$  – множество пользователей, которые взаимодействовали с  $t_j$ . Пользователи могут устанавливать социальные взаимосвязи друг с другом. Пусть  $S \in \mathbb{R}^{n \times n}$  – социальный граф *пользователь-пользователь*, где  $S_{ij} = 1$ , если  $p_j$  имеет отношение к  $p_i$  и  $S_{ij} = 0$  в противном случае. Учитывая граф *пользователь-товар*  $R$  и социальный граф  $S$ , мы стремимся предсказать недостающее значение рейтинга в  $R$ .

### Архитектура системы

Архитектура предлагаемой модели сети состоит из трех основных компонентов: моделирование пользователей, моделирование товаров и прогнозирование рейтинга. Моделирование пользователей заключается в изучении скрытых факторов, характеризующих их предпочтения. Поскольку данные для построения системы представляются в виде двух графов – графа социальных отношений и графа *пользователь-товар*, то существует возможность изучить предпочтения пользователей с разных точек зрения. Для обработки этого вводятся два метода агрегирования. Один из них – агрегация товаров через взаимодействие между пользователями и товарами в пространстве товаров. Другой – социальная агрегация [8], учитывающая отношения между пользователями в графе социальных отношений, который помогает смоделировать социальное пространство. Чтобы получить и изучить скрытые факторы пользователей, необходимо объединить информацию из обоих пространств.

Поскольку граф *пользователь-товар* содержит не только взаимодействия между пользователями и товарами, но и мнения пользователей (рейтинговые оценки) по товарам, то, обрабатывая их, можно составить представления о скрытых факторах пользователя в пространстве товаров, которые характеризуют его предпочтения. Целью агрегирования товаров является изучение скрытого фактора пользователя -  $h_i$  в пространстве товаров путем учета товаров, с которыми взаимодействовал пользователь  $p_i$ , и мнений пользователей о них:

$$h_i = \sigma(\text{Weight} * F_t(\{x_{ia}, \forall a \in C(i)\}) + \text{bias}), \quad (1)$$

где  $F_t$  – это функция агрегирования товаров пользователя  $p_i$ ;  $\sigma$  - нелинейная функция активации,  $\text{Weight}$  и  $\text{bias}$  – вес и смещение, которые определяются спецификой нейронной сети и обновляются в процессе обучения;  $x_{ia}$  – вектор представления, обозначающий взаимодействие между пользователем  $p_i$  и товаром  $t_a \in C(i)$  с учетом мнения.

Пользователь может выразить свое мнение – рейтинговую оценку во время взаимодействия с товаром. Для этого вводится вектор включения мнений  $e_r \in \mathbb{R}^d$ , который обозначает каждое мнение  $r$  как векторное представление размерности  $d$ . Для взаимодействия между пользователем  $p_i$  и товаром  $t_a$  с мнением  $r$  мы моделируем представление взаимодействия с учетом мнения  $x_{ia}$  как комбинацию числового вектора товара -  $q_a$  (эмбеддинг товара  $t_a \in C(i)$ ) и числового вектора мнения –  $e_r$  (эмбеддинг рейтинга  $r$ ) с помощью многослойного перцептрона (MLP) [9]. Выходом MLP является:

$$x_{ia} = g_t([q_a \oplus e_r]), \quad (2)$$

где  $\oplus$  обозначает операцию конкатенации между двумя векторами.

Одной из популярных функций агрегирования является линейная аппроксимация локализованной спектральной свертки в виде:

$$F_t = \left( \left\{ \sum_{a \in C(i)} \alpha_i x_{ia} \right\} \right), \quad (3)$$

где  $\alpha_i$  – весовой коэффициент пользователя  $p_i$ , характеризующий интенсивность его взаимодействия с товарами (агрегатор на основе среднего).

Чтобы смягчить ограничение агрегатора на основе среднего, необходимо настроить  $\alpha_i$  так, чтобы позволить взаимодействиям вносить свой вклад, назначив индивидуальный вес для каждой пары  $(t_a, p_i)$ :

$$F_t = \left( \left\{ \sum_{a \in C(i)} \alpha_{ia} x_{ia} \right\} \right), \quad (4)$$

где  $\alpha_{ia}$  обозначает вес взаимодействия пользователя  $p_i$  с товаром  $t_a$  для привлечения внимания к скрытому фактору пространства товаров пользователя  $p_i$  при характеристике предпочтений пользователя  $p_i$  по истории взаимодействий  $C(i)$ . В частности, мы параметризуем внимание к товару –  $\alpha_{ia}$  с помощью двухслойной нейронной сети, входными данными которой являются представление  $x_{ia}$  взаимодействия с учетом мнений и числового вектора пользователя –  $q_i$ . (эмбединг пользователя  $p_i$ ).

Веса получаются путем нормализации баллов внимания с помощью функции *Softmax* [10], которые можно интерпретировать как вклад взаимодействия в скрытый фактор пользователя  $p_i$  в пространстве товаров:

$$\alpha_{ia} = \frac{\exp(\alpha_{ia})}{\sum_{a \in C(i)} \exp(\alpha_{ia})}. \quad (5)$$

Согласно теориям социальной корреляции, предпочтения пользователя схожи с предпочтениями его друзей, с которыми он непосредственно связан. В связи с этим необходимо включить социальную информацию для дальнейшего моделирования скрытых факторов пользователя. Между тем, сила связей между пользователями может также влиять на поведение пользователей внутри социального графа  $S$ . Другими словами, изучение скрытых факторов пользователя должно учитывать неоднородные силы социальных связей. Поэтому вводится механизм внимания для выбора социальных друзей, а затем агрегируется информация по ним. Второй компонент проектируемой системы – моделирование товаров. Используется для изучения скрытого фактора товара, обозначаемого как  $z_j$  для товара  $t_j$  путем агрегирования пользователей и представляющего собой популярность товара. Взаимодействия и мнения в графе *пользователь-товар* должны быть совместно учтены для дальнейшего изучения скрытых факторов товара. Используем подход, схожий с изучением скрытых факторов пользователей в пространстве товаров, путем агрегирования пользователей. Для каждого товара  $t_j$  нужно собрать информацию от множества пользователей  $B(j)$ , которые взаимодействовали с  $t_j$ . Даже в отношении одного и того же товара пользователи могут выражать различные мнения во время взаимодействия с товаром. Мнения от разных пользователей могут отражать характеристики одного и того же товара разными способами, представленными пользователями, что может помочь в моделировании скрытых факторов товара. Для описания взаимодействия между  $p_i$  и  $t_j$  с учетом мнения  $r$  вводится представление пользователя взаимодействия  $f_{jb}$ , которое получается из эмбединга пользователя  $q_b$  и эмбединга рейтинга товара  $e_r$  с помощью многослойного персептрона MLP.

$$f_{jb} = g_p([q_b \oplus e_r]) \quad (6)$$

Для того, чтобы узнать скрытый фактор товара  $z_j$ , нужно дополнительно агрегировать представления взаимодействия пользователей в  $B(j)$  для элемента  $t_j$ . Функция агрегирования пользователей обозначается как  $F_p$ , которая агрегирует представление взаимодействия пользователей с учетом  $\{f_{jb}, \forall b \in B(j)\}$ :

$$z_j = \sigma(\text{Weight} * F_p(\{f_{jb}, \forall b \in B(j)\}) + \text{bias}) \quad (7)$$

Кроме того, вводим механизм внимания для дифференциации веса важности товара с точки зрения пользователей –  $\mu_{jb}$  с помощью двухслойной нейронной сети внимания [11], принимая  $f_{jb}$  и  $q_b$  в качестве входных данных:

$$z_j = \sigma \left( Weight * \left\{ \sum_{b \in B(j)} \mu_{jb} f_{jb} \right\} + bias \right), \quad (8)$$

$$\mu_{jb} = \frac{\exp(\mu_{jb})}{\sum_{b \in B(j)} \exp(\mu_{jb})} \quad (9)$$

Внимание пользователя  $\mu_{jb}$  предназначено для отражения неоднородного влияния взаимодействий между пользователем и товаром на скрытый фактор товара. Третий ключевой компонент системы – изучение параметров модели через предсказание путем интеграции компонентов моделирования пользователей и товаров. Скрытые факторы пользователей и товаров, сначала объединяются, а затем подаются в качестве входных данных на MLP для предсказания рейтинга товаров.

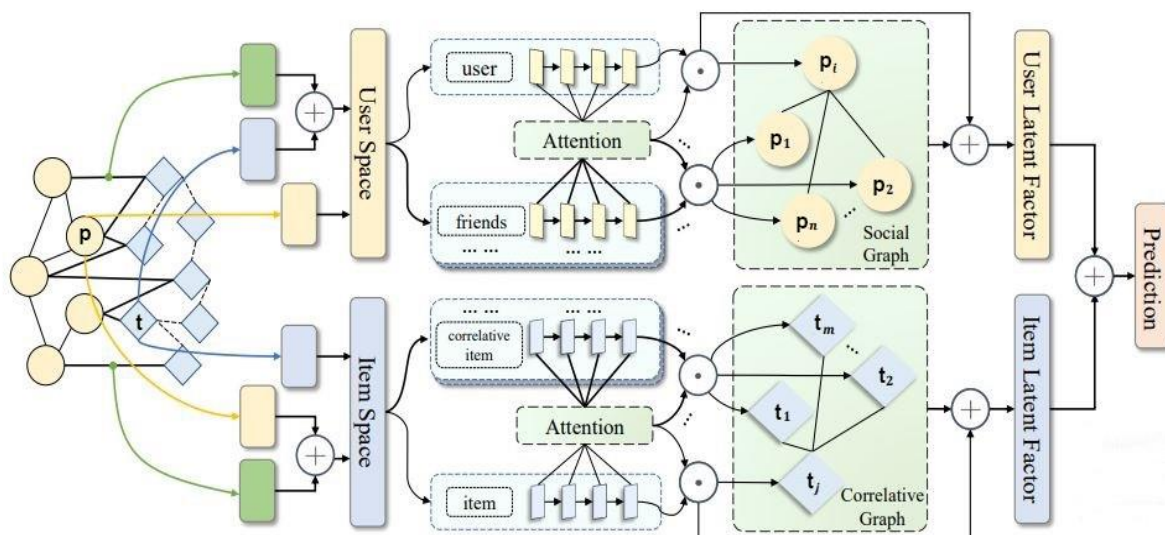


Рис. 2. Модель созданной графовой нейронной сети

Fig. 2. Model of the created graph neural network

### Обучение нейронной сети

Созданная модель графовой нейронной сети представлена на рис. 2. Для обучения был выбран оптимизатор *RMSprop* с начальным *learning rate* 0,001, поскольку он масштабирует скорость обучения и способен постоянно снижать значение функции потерь до тех пор, пока не будет достигнут локальный минимум. Переобучение является частой проблемой при оптимизации модели глубокой нейронной сети и, чтобы избежать этого, в нашей модели была применена техника отсева нейронов, называемая *Dropout*. Коэффициент отсева равен 0,5 для прогнозирования рейтинга и 0,4 для ранжирования товаров.

### Тестирование нейронной сети

Чтобы оценить качество алгоритмов рекомендаций, обычно используются две популярные метрики: средняя абсолютная ошибка (MAE) и среднеквадратичная ошибка (RMSE). При этом меньшие значения метрик указывают на лучшую точность прогнозирования. Чтобы оценить эффективность предложенного метода, для сравнения были взяты алгоритмы ре-

комендаций трех типов [13]: социальные рекомендации, которые учитывают социальные влияния (*DeepSoR*, *SoReg* и *SocialMF*); рекомендации, которые моделируют последовательные интересы пользователей (*NARM*, *STAMP*, *SSRM*); методы рекомендаций, которые используют GNN (*DGRec*) для взаимодействий между пользователями и товарами.

Результаты прогнозирования рейтинга товаров при помощи всех перечисленных методов показаны в табл. 1. Алгоритмы *DeepSoR*, *SoReg* и *SocialMF* используют рейтинговую и социальную информацию. Поскольку *DeepSoR* создан на основе нейронной сети, он работает лучше, чем два других метода. Три подхода, базирующиеся на основе сеансов, в целом дают результаты лучше методов первой группы, поскольку используемый набор данных содержит много взаимодействий пользователей с товарами – интересы пользователя, как правило, изменчивы, и это именно те динамические интересы, которые хорошо фиксируют методы, основанные на сеансе. Алгоритмы, основанные на GNN, работают лучше, чем все вышеупомянутые методы. В частности, предлагаемый в работе подход позволяет достичь лучших значений метрик качества, чем все другие алгоритмы, в том числе, *DGRec*.

**Таблица 1.**  
**Сравнение результатов прогнозирования различными методами**

**Table 1.**  
**Comparison of forecasting results by various methods**

Метод	Метрика RMSE	Метрика MAE
<i>Алгоритмы на основе социальных влияний</i>		
SoReg	1,1703	0,9119
SocialMF	1,1328	0,8837
DeepSoR	1,0972	0,8383
<i>Алгоритмы на основе интересов пользователей</i>		
NARM	1,1050	0,8648
STAMP	1,0829	0,8820
SSRM	1,0665	0,8800
<i>Алгоритмы на основе взаимодействия между пользователями и товарами</i>		
DGRec	1,0684	0,8511
<b>Our - GNN</b>	<b>1,0678</b>	<b>0,8400</b>

### Выводы

Разработана и реализована рекомендательная система на основе графовой нейронной сети, способная учитывать совместное отображение взаимодействий и мнений в графе пользовательских элементов. Обученная модель нейронной сети была протестирована на существующем реальном наборе данных *Epinions*. Экспериментальные результаты показывают, что предложенный метод может превосходить современные существующие алгоритмы, потому что по выбранным метрикам качества RMSE и MAE имеют самые низкие показатели.

Необходимо учитывать, что во многих отраслях пользователи и товары практически всегда связаны с некоторыми дополнительными атрибутами. Таким образом, использование графовых нейронных сетей для получения рекомендаций с атрибутами можно рассматривать в качестве одного из дальнейших направлений работы. Кроме того, и рейтинг, и социальную информацию целесообразно рассматривать не статическими, а динамически меняющимися. Для этого в будущем необходимо создание и построение нейронных сетей для социальных рекомендаций с динамическим графом.

**Библиографический список**

1. **Xu, H.** Preference-Aware Light Graph Convolution Network for Social Recommendation / H. Xu, G. Wu, E. Zhai, X. Jin, L.Tu. – Electronics 2023, 12, 2397.
2. **Wu, Q.** Dual graph attention networks for deep latent representation of multifaceted social effects in recommender systems / Q. Wu, H. Zhang, X. Gao, P. He, P. Weng, H. Gao, G. Chen, – In Proceedings of the World Wide Web Conference, San Francisco, CA, USA, 13-17 May 2019; pp. 2091-2102.
3. **Yang, Z.** Combining Reinforcement Learning Algorithms with Graph Neural Networks to Solve Dynamic Job Shop Scheduling Problems / Z. Yang, L. Bi, X. Jiao. – Processes 2023, 11, 1571.
4. **Han, X.** Ollivier–Ricci Curvature Based Spatio-Temporal Graph Neural Networks for Traffic Flow Forecasting / X. Han, G. Zhu, L. Zhao, R. Du, Y. Wang, Z. Chen, Y. Liu, S. He. – Symmetry. 2023, 15, 995.
5. **Defferrard, M.** Convolutional neural networks on graphs with fast localized spectral filtering / M. Defferrard, X. Bresson, P. Vandergheynst. – In Advances in Neural Information Processing Systems. 2016, pp. 3844-3852.
6. **Derr, T.** Signed graph convolutional networks. In 2018 IEEE International Conference on Data Mining (ICDM) / T. Derr, M. Yao, J.Tang. – IEEE, 2018, pp. 929-934.
7. **Kipf, T.N.** Semi-supervised classification with graph convolutional networks / T.N. Kipf, M. Welling, – In International Conference on Learning Representations (ICLR), 2017.
8. **Dong, X.** A hybrid collaborative filtering model with deep structure for recommender systems / X. Dong, L. Yu., Z. Wu., Y. Sun, L. Yuan, F. Zhang 2017.
9. **Frolov, E.** Tensor methods and recommender systems / E. Frolov, I. Oseledets. – Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery 2017, 3, 1201.
10. **Gori, M.** A new model for learning in graph domains / M. Gori, G. Monfardini, F. Scarselli. – In Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, 2005, 2, pp. 729-734.
11. **Scarselli, F.** Hagenbuchner M., Monfardini G., The graph neural network model / F. Scarselli, M. Gori, A.C. Tsoi. – IEEE Transactions on Neural Networks, 2009, 20 pp. 61-80.
12. **Hamedani, M.R.** TrustRec: an effective approach to exploit implicit trust and distrust relationships along with explicit ones for accurate recommendations / M.R. Hamedani, I. Ali, Hong J., S-W. Kim. – Computer Science and Information Systems, 18, 2020.
13. **Lin, J.** Graph neural networks with dynamic and static representations for social recommendation / J. Lin, S. Chen, J. Wang. – International Conference on Database Systems for Advanced Applications, Jan. 2022.

*Дата поступления  
в редакцию: 10.05.2023*

*Дата принятия  
к публикации: 03.07.2023*

---

**ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ**

---

УДК 621.0, 532.5

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_51

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКЦИИ РЕЛЕЯ-БЕНАРА  
В КУБИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
КОММЕРЧЕСКИХ КОДОВ ANSYS CFX И STAR-CCM+****В.Ю. Волков**

ORCID: 0000-0003-0880-8509 e-mail: volkov\_vu@grpress.podolsk.ru

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

*Подольск, Россия***Л.А. Голибродо**

ORCID: 0000-0001-8169-4136 e-mail: golibrodo\_la@grpress.podolsk.ru

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

*Подольск, Россия***А.А. Крутиков**

ORCID: 0000-0002-0603-0177 e-mail: krutikov\_aa@grpress.podolsk.ru

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

*Подольск, Россия***А.Ю. Кудрявцев**

ORCID: 0009-0008-7740-4149 e-mail: fazvonov@vniief.ru

Российский федеральный ядерный центр

«Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

*Саров, Россия*

Представлено расчетное моделирование естественной конвекции Рэлея-Бенара в кубе при высоких значениях числа Рэлея. Эксперименты проведены в рамках отраслевого бенчмарка по верификации CFD-программ на базе гидродинамической лаборатории АО «ОКБМ Африкантов». В атомной отрасли данное явление представляет интерес при исследовании аварийных режимов, систем пассивной безопасности, систем охлаждения топлива и т.д., поскольку приводит к возникновению температурных пульсаций, влияющих на показания датчиков, а также вызывающих термоциклические нагрузки, которые приводят к снижению ресурса оборудования. Несмотря на наличие верификации разработчиком программного обеспечения, зачастую требуется дополнительная верификация CFD-моделей, разрабатываемых с применением коммерческих CFD-кодов, для подтверждения применимости в конкретном случае. Использование стандартных подходов и CFD-кодов в промышленных расчетах позволяет ускорить подготовку модели, но требует проверки применительно к конкретным условиям и процессам. Расчеты выполнены с использованием двух кодов – STAR-CCM+ и ANSYS CFX, и двух сеток – гексаэдрической и полиэдрической; их результаты хорошо согласуются с экспериментом. Несколько занижены значения пульсаций скорости, что ожидаемо следует из выбранного сеточного разрешения. Представленный подход предлагается использовать для моделирования задач данного класса.

**Ключевые слова:** CFD, естественная конвекция Рэлея-Бенара, CFX, STAR-CCM+, верификация.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Волков, В.Ю. Моделирование конвекции Рэлея-Бенара в кубической полости с использованием коммерческих кодов ANSYS CFX и STAR-CCM+ / В.Ю. Волков, Л.А. Голибродо, А.А. Крутиков, А.Ю. Кудрявцев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 51-62. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_51



## SIMULATION OF RAYLEIGH-BENARD CONVECTION IN A CUBIC CAVITY USING COMMERCIAL CODES ANSYS CFX AND STAR-CCM+

**V.Yu. Volkov**

ORCID: **0000-0003-0880-8509** e-mail: **volkov\_vu@grpress.podolsk.ru**

JSC OKB «GIDROPRESS»

*Podolsk, Russia*

**L.A. Golibrodo**

ORCID: **0000-0001-8169-4136** e-mail: **golibrodo\_la@grpress.podolsk.ru**

JSC OKB «GIDROPRESS»

*Podolsk, Russia*

**A.A. Krutikov**

ORCID: **0000-0002-0603-0177** e-mail: **krutikov\_aa@grpress.podolsk.ru**

JSC OKB «GIDROPRESS»

*Podolsk, Russia*

**A.Yu. Kudryavtsev**

ORCID: **0009-0008-7740-4149** e-mail: **fazvonov@vniief.ru**

Federal State Unitary Enterprise «RFNC-VNIIEF»

*Sarov, Russia*

**Abstract.** A computational simulation of the natural Rayleigh-Benard convection in a cube has been carried out at high values of the Rayleigh number. Experimental studies have been carried out as part of the industry benchmark for verification of CFD codes at the hydrodynamic laboratory of JSC OKBM Afrikantov. This phenomenon is of interest in the nuclear industry in the study of emergency modes, passive safety systems, fuel cooling systems, etc. It leads to the occurrence of temperature pulsations that affect the readings of sensors, as well as causing thermal cycling loads that lead to a decrease in equipment life. Despite the presence of software verification performed by the developer, additional verification of CFD models developed using commercial CFD codes is often required to confirm the applicability of the selected mathematical models in a particular case. The use of standard approaches and CFD codes in industrial calculations makes it possible to speed up the preparation of the model, but requires verification in relation to specific conditions and processes. Calculations have been performed using two codes, STAR-CCM+ and ANSYS CFX, and two meshes, hexahedral and polyhedral. The calculation results are in good agreement with experiment. The values of velocity pulsations are underestimated, which is expected from the selected mesh resolution. The presented approach can be used to model problems of this class.

**Key words:** CFD, Rayleigh-Benard natural convection, CFX, STAR-CCM+, verification.

**FOR CITATION:** V.Yu. Volkov L.A. Golibrodo, A.A. Krutikov, A.YU. Kudryavtsev. Simulation of Rayleigh-Benard convection in a cubic cavity using commercial codes ANSYS CFX and STAR-CCM+. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 3. Pp. 51-62. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_51

### Введение

Естественная конвекция в замкнутых полостях вследствие температурного градиента в поле сил тяжести встречается как в природных процессах, так и в технических системах. В атомном машиностроении это явление представляет интерес при исследовании аварийных режимов, систем пассивной безопасности, систем охлаждения топлива и т.д. При высоких числах Релея возникают турбулентные нестационарные потоки, характеризующиеся наличием температурных пульсаций, влияющих на показания датчиков, показания которых часто используются в алгоритмах систем управления. Пульсации температуры вызывают термодинамические нагрузки, которые приводят к снижению ресурса оборудования. В ряде случаев естественная конвекция является основным механизмом переноса тепла, смешения различ-



ных сред. Актуальность данной тематики в атомной отрасли растет с развитием пассивных систем безопасности ядерных установок, работа которых зачастую основана на механизмах естественной конвекции. В настоящее время уровень развития вычислительной техники позволяет моделировать процессы естественной конвекции с использованием CFD-кодов, а необходимость их применения обусловлена целевыми параметрами расчетов: пространственными распределениями температуры, скоростью потока, а также характеристиками турбулентных пульсаций. Данное направление расчетов с использованием CFD-кодов отмечено как одно из приоритетных в рамках работы международной группы экспертов ОЭСР CFD4NRS [1]. В связи с этим данная задача была выбрана в качестве отраслевого бенчмарка по верификации CFD-программ на базе гидродинамической лаборатории АО «ОКБМ Африкантов» [2, 3]. В рамках бенчмарка исследовалась естественная конвекция в кубе при высоких значениях числа Релея. Особенность постановки задачи состоит в том, что нагревается нижняя стенка куба, а охлаждается верхняя. Несмотря на простоту геометрии, такая система характеризуется турбулентным течением среды и сложным динамическим поведением крупномасштабной усредненной циркуляции.

Эксперименты проведены двумя лабораториями (АО «ОКБМ Африкантов» и ИМСС УрО РАН) на отличающихся экспериментальных установках с использованием современного оборудования (PIV, LDV), позволяющего получить детальные сведения о структуре потока, необходимые для верификации CFD-программ. Несмотря на наличие верификации программного обеспечения, выполняемой разработчиком, зачастую требуется дополнительная верификация CFD-моделей, разрабатываемых с применением коммерческих CFD-кодов для подтверждения применимости выбранных математических моделей в конкретном случае [4]. Использование стандартных подходов и CFD-кодов в промышленных расчетах позволяет ускорить подготовку модели, но требует проверки применительно к конкретным условиям и процессам.

### Постановка задачи

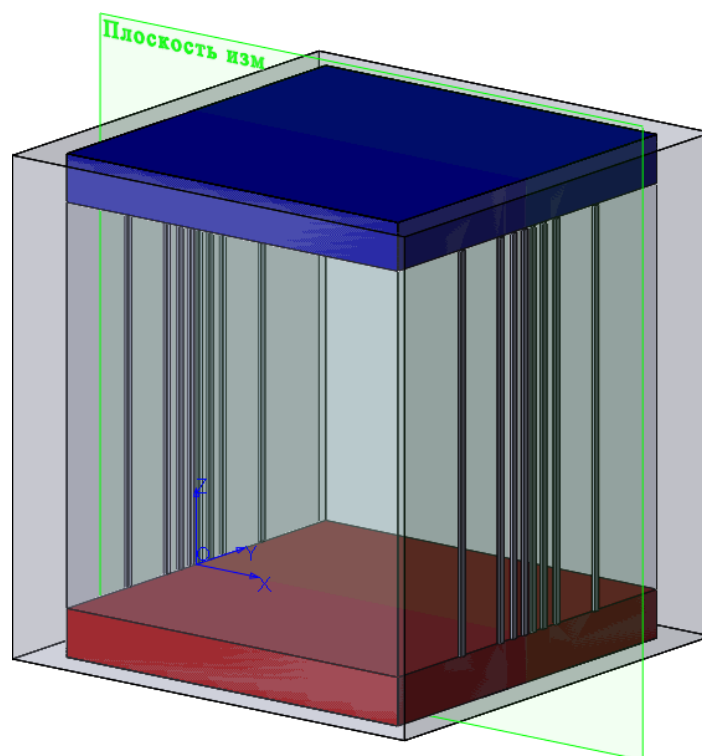
В рамках работы участниками бенчмарка были выполнены работы с использованием различных отечественных и зарубежных кодов (*FlowVision*, КОРСАР/CFD, ЛОГОС, ANSYS CFX) [5-9]. Целью данной работы является валидация и кросс-верификация коммерческих CFD-кодов STAR-CCM+ и ANSYS CFX на примере одного из режимов, характеризующегося параметрами, приведенными в табл. 1. Также проведено сравнение результатов, полученных на структурированной гексаэдрической сетке и полиэдрической сетке с помощью кода STAR-CCM+. Он преимущественно используется в промышленных расчетах, при этом зачастую применяют именно полиэдрические сетки, которые позволяют автоматизировать подготовку CFD-модели.

**Таблица 1.**  
Параметры режима

**Table 1.**  
Mode parameters

$T_0, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	Pr	Ra
50	20	3.5	$16 \cdot 10^9$

Объектом исследования является экспериментальная установка по изучению естественной конвекции в кубической полости, установленная в ОКБМ «Африкантов». Модель экспериментального участка представлена на рис. 1. Он представляет собой кубическую полость со стороной  $D=250$  мм. Кубическая полость заполнена дистиллированной водой. Горизонтальные стенки изготовлены из алюминия и выполняют роль теплообменников, а вертикальные стенки изготовлены из оргстекла.



**Рис. 1. Модель экспериментального участка**

**Fig. 1. Experimental area model**

Через верхний теплообменник прокачивается проточная вода, обеспечивающая поддержание требуемой температуры ( $T_0 - 0.5\Delta T$ ). Температура нагревателя внизу ( $T_0 + 0.5\Delta T$ ) поддерживается с помощью регулировки мощности электрического нагревателя. Все измерения выполнены в центральном вертикальном сечении полости  $XOZ$  (рис. 1). Используемый метод PIV основан на измерении перемещения полиамидных частиц нейтральной плавучести в плоскости лазерного светового ножа; измерительная область имела размер  $250 \times 250$  мм. Также было получено поле кинетической энергии турбулентности для двух компонент скорости. Целевыми параметрами расчетов являются усредненные по времени скорость и кинетическая энергия турбулентности.

При проведении расчетов использовались следующие допущения:

- стенки проточной части считаются гидравлически гладкими поверхностями с условиями прилипания;
- теплоноситель – сплошная несжимаемая однофазная ньютоновская жидкость;
- течение теплоносителя – нестационарное;
- режим течения теплоносителя – турбулентный;
- при получении начальных условий течение описывается уравнениями Рейнольдса, замыкание осуществляется с использованием двухпараметрических моделей турбулентности;
- при моделировании процесса течения описывается уравнениями Навье-Стокса с применением пространственной фильтрации замыкание осуществляется с использованием вихреразрешающих моделей турбулентности;
- потерями тепла в окружающую среду пренебрегают;
- перетечки тепла по стенкам не учитываются;
- вспомогательные системы не оказывают влияния на тепломассообмен в расчетной области;
- малыми геометрическими элементами, не оказывающими значительного влияния на гидродинамические процессы, пренебрегают;
- внешняя камера не включена в расчетную область и учитывается граничными условиями.

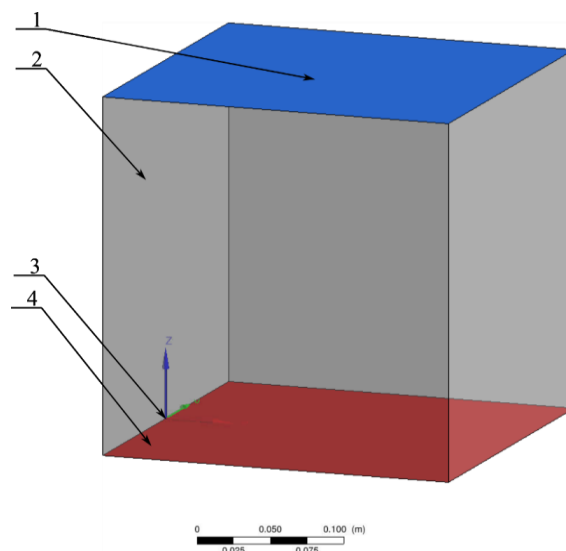
Геометрическая модель расчетной области представляет собой твердотельную модель проточного тракта (рис. 2). Она включает в себя объем жидкости во внутреннем кубе с водой (область исследования). Дополнительно при подготовке геометрической модели применены следующие упрощения:

- геометрия расчетной области считается идеально соответствующей номинальным размерам, отклонения геометрии отсутствуют;
- куб идеально ориентирован по осям системы координат;
- боковые стенки куба адиабатические;
- горячая и холодная пластины учитываются с помощью граничных условий первого рода.

Для расчета полей скорости, давления и кинетической энергии турбулентности используется моделирование в нестационарной постановке с использованием вихреразрешающих моделей. Использование вихреразрешающих моделей в этом случае обусловлено необходимостью определения пространственного распределения кинетической энергии турбулентности, характеризующей пульсации скорости. Отметим, что в [5-7] были также проведены расчеты с использованием моделей турбулентности класса RANS и показано, что результаты расчета и эксперимента хорошо согласуются по профилям скорости. Фактически это означает, что если для расчета неважно определение характеристик пульсаций потока, то вполне допустимо использовать гораздо более экономичные с вычислительной точки зрения модели турбулентности.

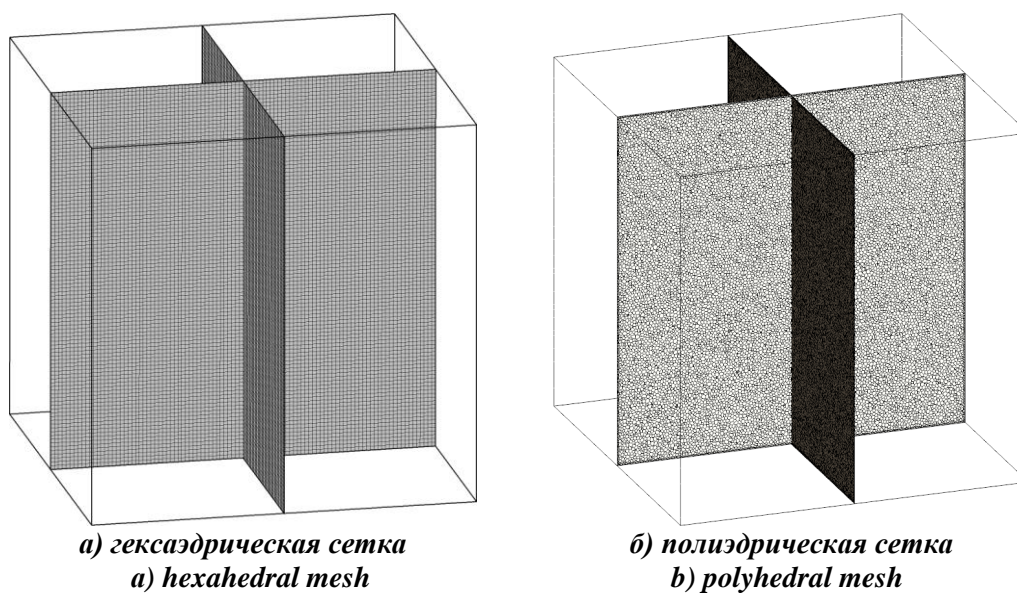
Для проведения нестационарного моделирования процессов естественной конвекции в экспериментальном участке использовалась модель турбулентности LES-WALE, а для получения начальных условий в стационарной постановке использовалась модель турбулентности K-Omega-SST [10]. Расчетная область образована граничными поверхностями, на которых задаются граничные условия (рис. 2). На стенках расчетной области используется граничное условие прилипания для уравнений движения. На горячей и холодной поверхностях используются граничные условия первого рода для уравнения энергии. На боковых стенках заданы адиабатические граничные условия. В качестве начального приближения для стационарного расчета используются нулевые скорости и атмосферное давление, нулевые параметры турбулентности, среднее значение температуры. В качестве начальных условий для нестационарного расчета используются результаты стационарного расчета. Свойства воды приняты в соответствии со стандартом IAPWS [11].

Расчет был выполнен в нестационарной постановке в два этапа. На первом этапе проводился расчет до установления режимных параметров в расчетной области. На втором этапе полученные результаты использовались в качестве начальных условий для расчета с усреднением по времени. Для определения полей, усредненных скорости и кинетической энергии турбулентности, проводился постпроцессинг в процессе решения с использованием формул с накоплением. В стационарном расчете используются противопотоковые численные схемы второго порядка (для турбулентности – первого). В нестационарном расчете используется схема центральных разностей с ограничением, рекомендуемая разработчиками при использовании моделей класса LES. Шаг по времени выбирался таким образом, чтобы выполнялось условие равенства числа Куранта единице. В ходе решения выполнялся мониторинг скорости и температуры в нескольких точках расчетной области для определения момента установления режимных параметров в расчетной области. Для расчетов были разработаны две сеточные модели: структурированная блочная сетка на базе гексаэдрических элементов, разработанная с помощью пакета ANSYS ICEM-CFD, и сетка на основе многогранников общей формы (полиэдров), созданная инструментами кода STAR-CCM+. Разрешение блочно-структурированной сеточной модели по ребрам составило 100x100x100 элементов (рис. 3 а). Использовалось равномерное разбиение сеточной модели по всем направлениям, рекомендуемое для использования совместно с вихреразрешающими моделями. Количество элементов – 1 млн, характерный размер ячейки 2,5 мм. Полиэдрическая сетка несколько более подробна (рис. 3 б). Количество элементов составляет 2,3 млн, характерный размер ячейки: 2 мм.



**Рис. 2. Геометрическая модель расчетной области**  
 1 – холодная стенка, 2 – адиабатическая стенка,  
 3 – начало координат, 4 – горячая стенка

**Fig. 2. Geometric model of the computational domain**  
 1 – cold wall, 2 – adiabatic wall, 3 – origin, 4 – hot wall

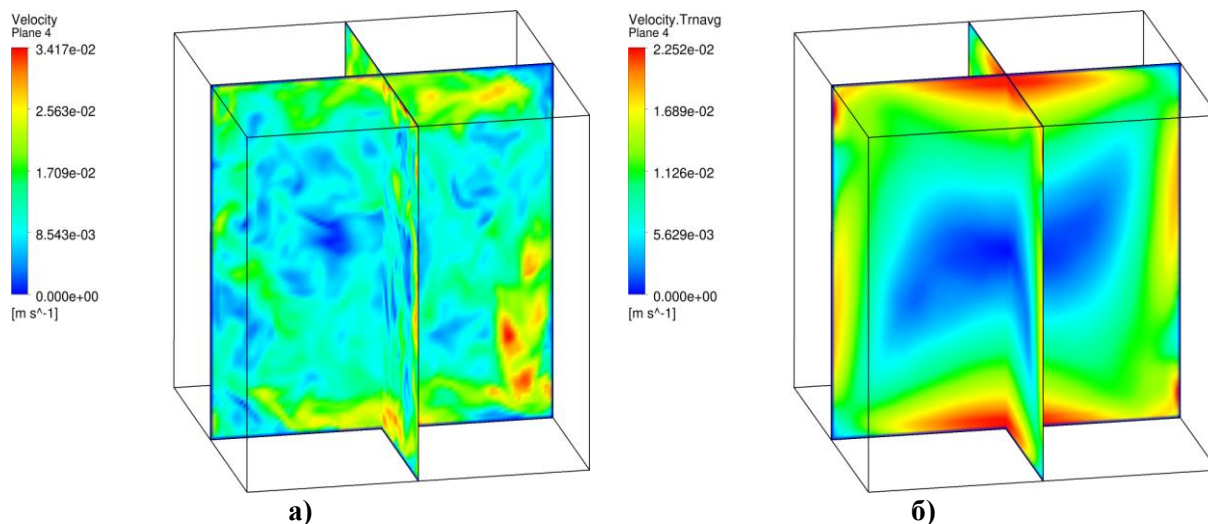


**Рис. 3. Сеточная модель**

**Fig. 3. Mesh model**

### Результаты расчетов

Расчеты с помощью кода CFX были выполнены с использованием гексаэдрической сеточной модели. В коде STAR-CCM+ использовались обе сеточные модели. По результатам расчетов получены распределения мгновенных и усредненных значений скорости и температуры в расчетной области. Распределение мгновенных значений скорости в сечениях расчетной области представлено на рис. 4 а. Наблюдается сложная вихревая картина течения. Распределение усредненных значений скорости в сечениях расчетной области представлено на рис. 4 б. Наблюдается глобальная направленная циркуляция в расчетной области.



**Рис. 4. Распределение значений скорости (мгновенных и усредненных) в сечениях расчетной области (ANSYS CFX)**

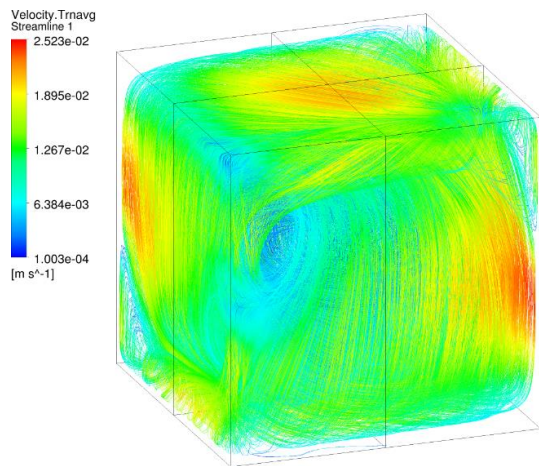
**Fig. 4. Distribution of velocity values (instantaneous and averaged) in sections of the computational domain (ANSYS CFX)**

Для более детального анализа структуры усредненного течения на рис. 5 (а, в, д) представлены линии тока в расчетной области. Кроме выраженной глобальной циркуляции вдоль главной диагонали, наблюдаются отдельные зоны циркуляции в углах расчетной области и крупномасштабные вихри вблизи боковых стенок. Структура внутреннего вихря главной циркуляции представлена на рис. 5 (б, г, е). Хотя на главной диагонали вихрь главной циркуляции един, при приближении к углам он распадается на четыре вихря меньшего размера, каждый из которых заканчивается на соответствующей боковой стенке. Направление вращения всех четырех вихрей одинаково. Однако наблюдаются некоторые отличия между расчетами, при этом результаты CFX на гексаэдрической сетке похожи на результаты STAR-CCM+ на полиэдрической сетке.

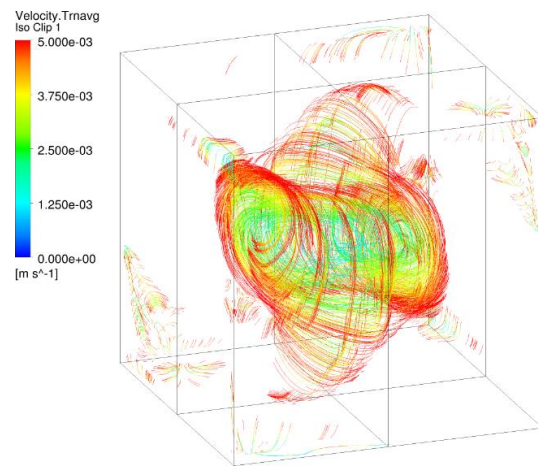
На рис. 6 а представлено распределение мгновенных значений температуры в сечениях расчетной области. Наблюдается практически равномерное распределение температуры в расчетной области, максимальные градиенты температуры сосредоточены вблизи обогреваемой и охлаждаемой поверхностей. Также наблюдаются отдельные термики, направленные как от горячей к холодной пластине, так и наоборот; они распадаются вблизи соответствующей поверхности, на которой они возникают. В центральной части расчетной области распределение температуры почти равномерно. На распределении усредненных значений температуры в сечениях расчетной области (рис. 6 б) термиков не наблюдается, в остальном картина аналогичная представленной на рис. 6 а).

Было проведено сравнение результатов расчета с экспериментом. Сравнение по модулю усредненной скорости представлено на рис. 7, где отражены распределения скорости на поверхности, используемой для измерений в эксперименте. Черными линиями обозначены границы этой поверхности. Поскольку поверхность выходит за границы исследуемой области, часть измерений попадает внутрь оргстекла, в связи с чем логично ожидать там нулевых значений скорости. Для удобства белым прямоугольником обозначены границы внутренней полости куба размером 250x250 мм. В соответствии с [2, 3] отмечено, что вблизи стенок экспериментальные данные не репрезентативны, в связи с чем на рисунке в этих областях значения скорости нулевые. Видно, что качественно и количественно результаты расчета и эксперимента соответствуют друг другу. Отметим, что возможно несколько вариантов реализации глобальной циркуляции, это необходимо учитывать при обработке результатов.

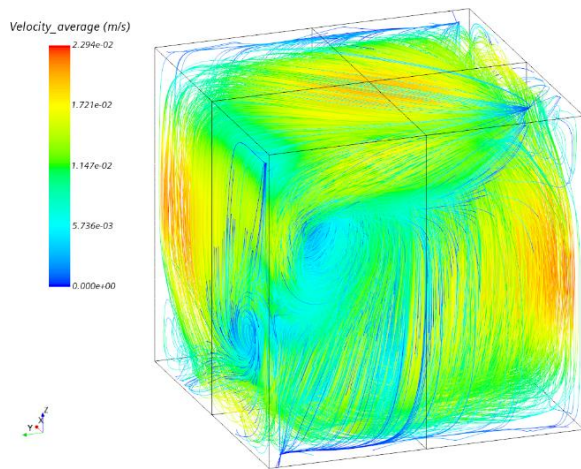




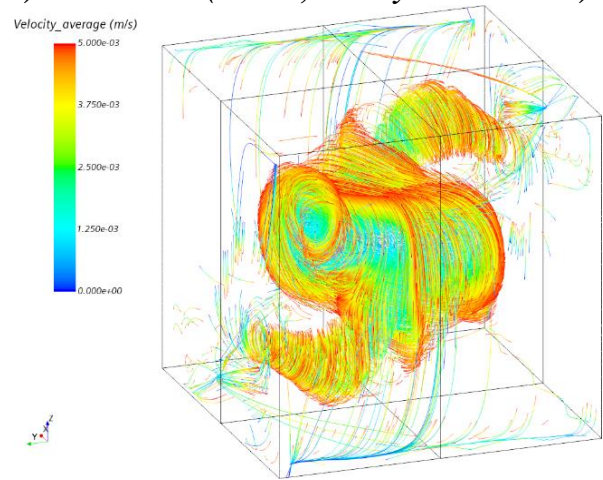
**a) ANSYS CFX (сетка 1)**  
**a) ANSYS CFX (mesh 1)**



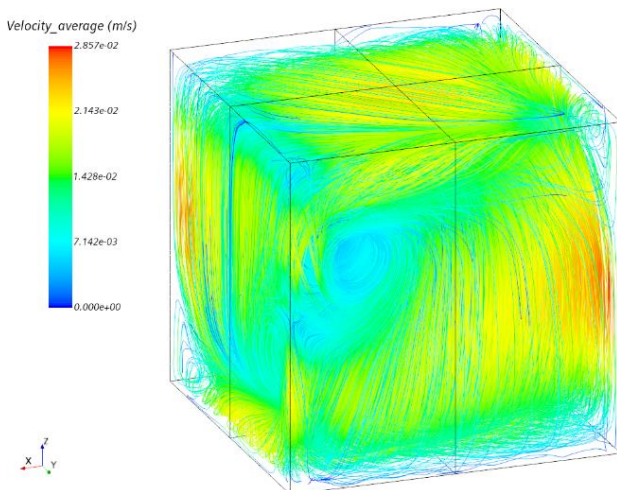
**б) ANSYS CFX (сетка 1, скорость ниже 5 мм/с)**  
**b) ANSYS CFX (mesh 1, velocity below 5 mm/s)**



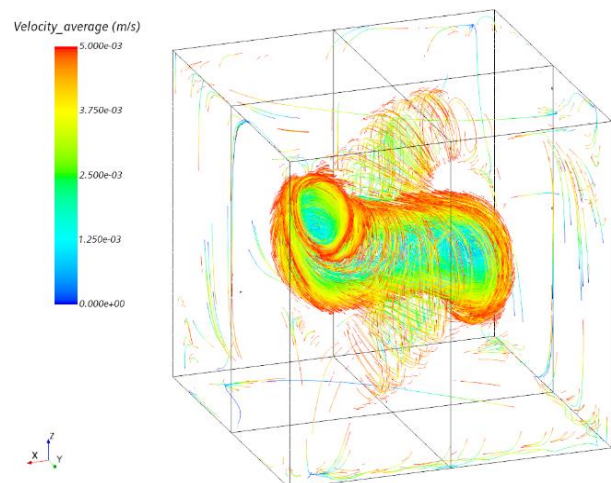
**в) STAR-CCM+ (сетка 1)**  
**c) STAR-CCM+ (mesh 1)**



**г) STAR-CCM+ (сетка 1, скорость ниже 5 мм/с)**  
**d) STAR-CCM+ (mesh 1, velocity below 5 mm/s)**



**д) STAR-CCM+ (сетка 2)**  
**e) STAR-CCM+ (mesh 2)**



**е) STAR-CCM+ (сетка 2, скорость ниже 5 мм/с)**  
**ф) STAR-CCM+ (mesh 2, velocity below 5 mm/s)**

**Рис. 5. Линии тока в расчетной области**

**Fig. 5. Streamlines in the computational domain**

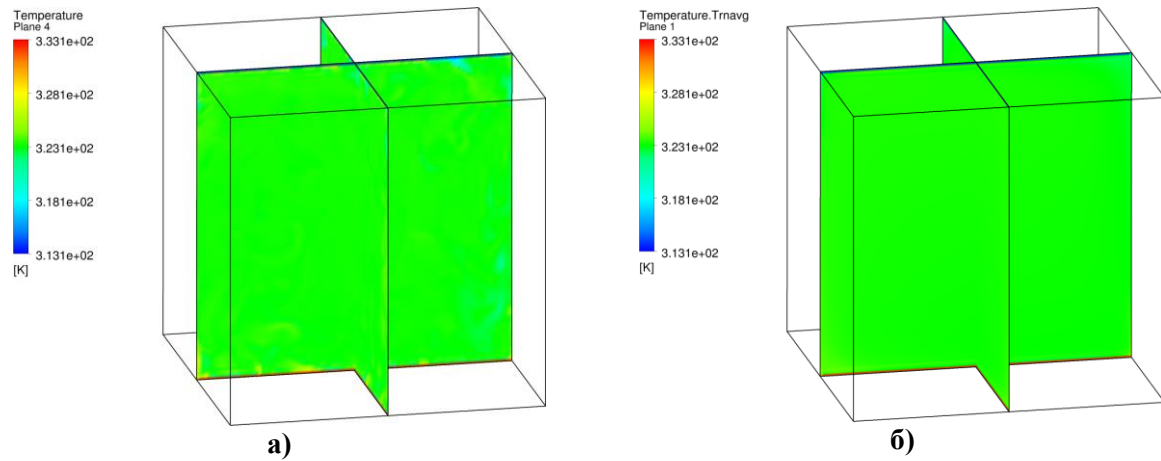


Рис. 6. Распределение значений температуры (мгновенных и усредненных) в сечениях расчетной области (ANSYS CFX)

Fig. 6. Distribution of temperature values (instantaneous and averaged) in sections of the computational domain (ANSYS CFX)

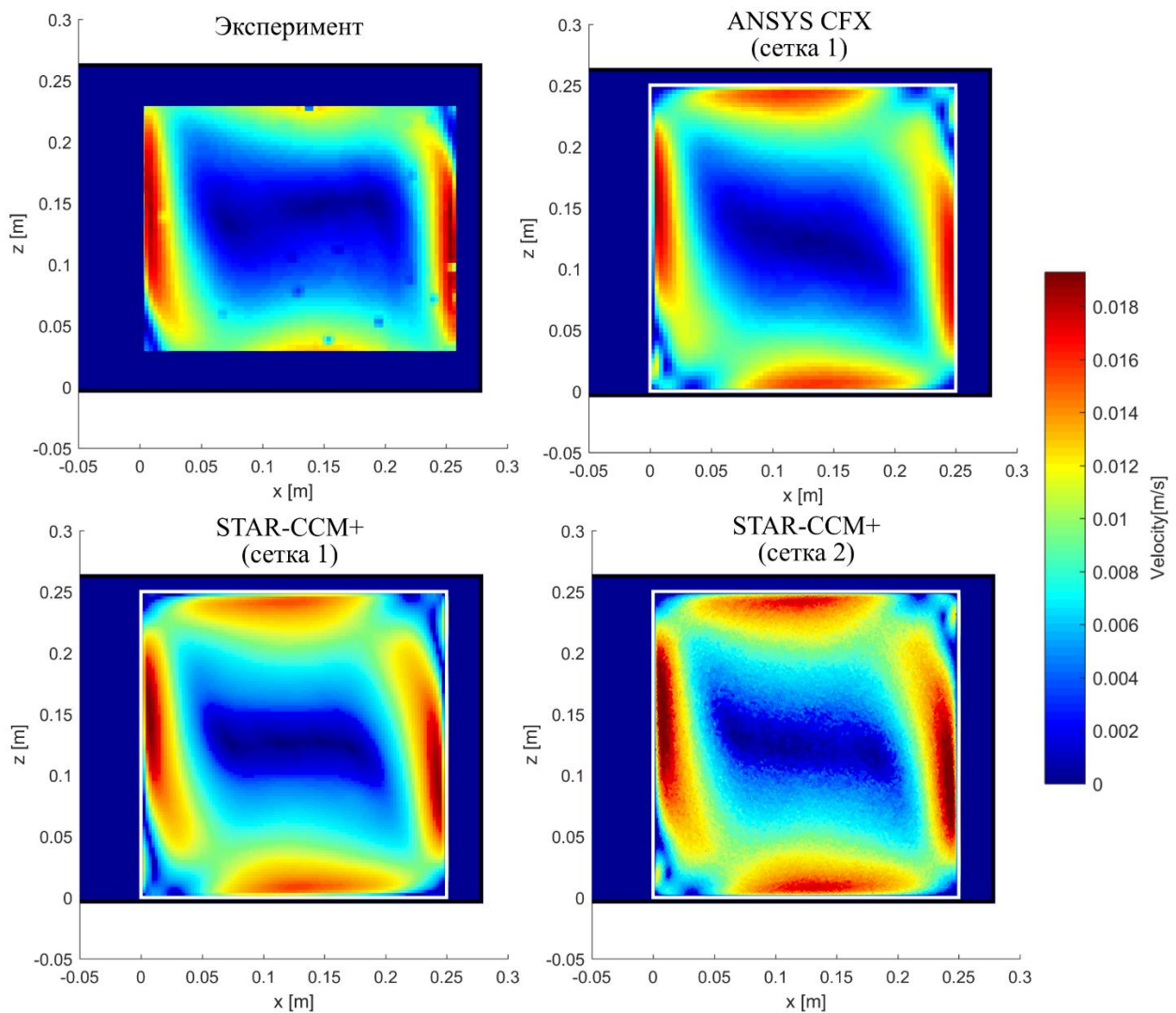


Рис. 7. Сравнение расчета с экспериментом по модулю скорости

Fig. 7. Comparison of calculation with experiment in modulus of velocity

Для более детального качественного сопоставления эксперимента с расчетом были построены графики изменения скорости вдоль центральных вертикальной и горизонтальной линий в плоскости измерений (рис. 8 и 9). Наблюдается хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента. Можно отметить, что результаты, полученные с помощью STAR-CCM+ на полиэдрической сетке ближе к экспериментальным данным. Вдоль вертикальной линии в экспериментальных данных наблюдаются некоторые отклонения от симметрии, которые не воспроизводятся в расчетах.

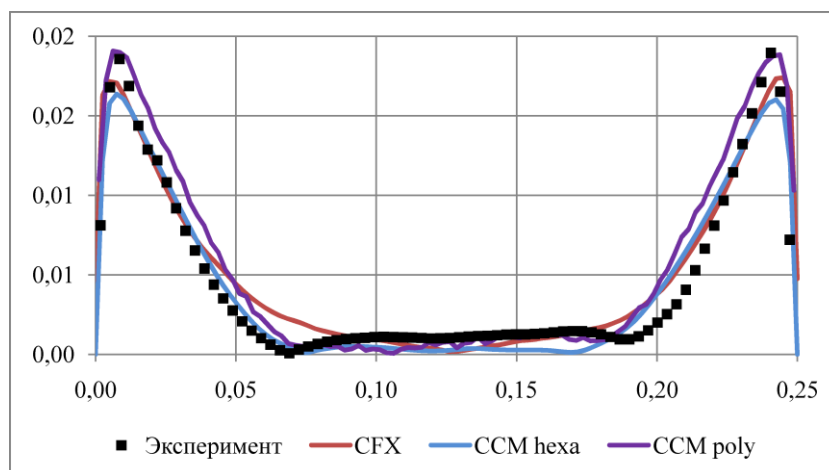


Рис. 8. Сравнение расчета с экспериментом по модулю скорости вдоль горизонтальной линии

Fig. 8. Comparison of calculation with experiment in modulus of velocity along a horizontal line

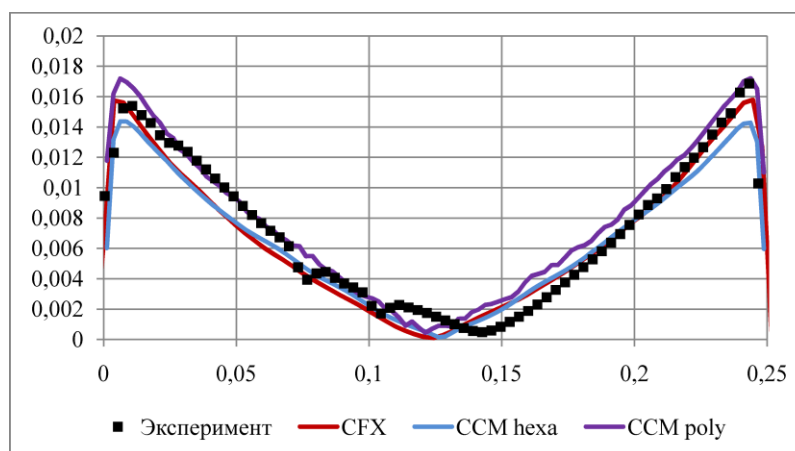


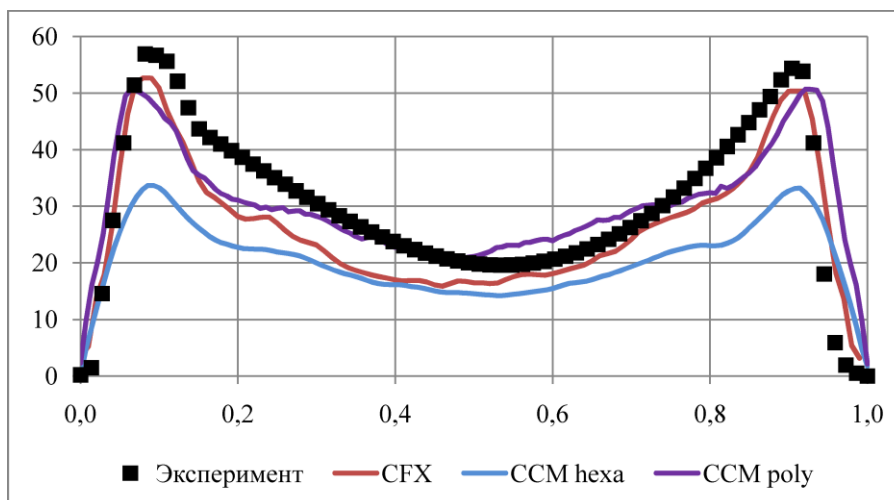
Рис. 9. Сравнение расчета с экспериментом по модулю скорости вдоль вертикальной линии

Fig. 9. Comparison of calculation with experiment in modulus of velocity along a vertical line

Сравнение расчета с экспериментом по кинетической энергии турбулентности вдоль диагонали в плоскости измерений представлено на рис. 10. Качественно результаты расчета и эксперимента схожи между собой, но расчет несколько занижает амплитуду пульсаций. Это обусловлено использованием моделей турбулентности класса LES. Качественное сходство графиков при некотором систематическом занижении пульсаций свидетельствует, что частота отсечения турбулентного спектра находится в инерционном интервале вихрей, это корректно для данного класса моделей. Однако отброшенная часть спектра в результатах расчета не учитывается, что приводит к систематическому занижению пульсаций. Для уменьшения погрешности требуется использование более подробной сетки. Также можно отметить, что результаты STAR-CCM+, полученные на гексаэдрической сетке, существенно



ниже экспериментальных значений и результатов ANSYS CFX на той же сетке. Это связано с тем, что в STAR-CCM+ иная реализация схемы центральных разностей с ограничением, которая фактически в большей мере работает как классическая противопотоковая схема второго порядка. Альтернативный метод – использование численных схем более высоких порядков в случае, если цель расчета предусматривает точное моделирование пульсаций потока.



**Рис. 10. Сравнение расчета с экспериментом по кинетической энергии турбулентности вдоль диагонали в плоскости измерений**

**Fig. 10. Comparison of calculation with experiment on the kinetic energy of turbulence along the diagonal in the measurement plane**

### Заключение

Выполнено моделирование выбранного режима отраслевого бенчмарка, посвященного исследованию конвекции Рэля-Бенара в кубической полости с обогреваемой нижней стенкой и охлаждаемой верхней стенкой (на базе гидродинамической лаборатории «ОКБМ Африкантов»). Целевыми параметрами расчета являлись усредненные поля компонент скорости в центральном вертикальном сечении полости, а также усредненные поля компонент пульсаций скорости. Выполнены расчеты с использованием двух кодов – STAR-CCM+ и ANSYS CFX, и двух сеток – гексаэдрической и полиэдрической.

Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом. Несколько занижены значения пульсаций скорости, что ожидаемо следует из выбранного сеточного разрешения. Полученные результаты могут использоваться для верификации при разработке CFD-моделей оборудования АЭС, включающих моделирование процессов естественной конвекции, а также при аттестации CFD-кодов. Полученный опыт также применим для выбора моделей и их параметров для моделирования процессов естественной конвекции при высоких числах Релея. Для уменьшения погрешности определения пульсаций целесообразно использование сеточных моделей с большим разрешением, особенно при использовании кода STAR-CCM+. Также необходимо учитывать особенности реализации численных схем в различных кодах. Вместе с тем, применение стандартных подходов и CFD-кодов, зачастую используемых в промышленных расчетах, позволяет с приемлемой точностью моделировать данные процессы в реальных конструкциях.

**Библиографический список**

1. Assessment of computational fluid dynamics (CFD) for nuclear reactor safety problems, NEA/CSNI/R (2007)13. OECD/NEA, 2007.
2. **Большухин, М.А.** Об экспериментальных тестах (бенчмарках) для программных пакетов, обеспечивающих расчет теплообменников в атомной энергетике / М.А. Большухин, А.Ю. Васильев, А.В. Будников, Д.Н. Патрушев, Р.И. Романов, Д.Н. Свешников, А.Н. Сухановский, П.Г. Фрик // Вычислительная Механика Сплошных Сред. 2012. Том 5. № 4. С. 469-480.
3. **Vasiliev, A.** High Rayleigh Number Convection in a Cubic Cell with Adiabatic Sidewalls / A. Vasiliev, A. Sukhanovskii, P. Frick, A. Budnikov, V. Fomichev, M. Bolshukhin, R. Romanov // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016.
4. Report. Best practice guidelines for the use of CFD in nuclear reactor safety applications. NEA/CSNI/R(2007)5, Nuclear Energy Agency Committee On The Safety Of Nuclear Installations, 2007.
5. **Козелков, А.С.** Верификация ПК «ЛОГОС» на эксперименте BALI / А.С. Козелков, Н.А. Кочетов, О.Л. Крутякова, В.В. Курулин, А.С. Сидоров, Ю.А. Цибирева. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/documents/mntk2015-084.pdf> (дата обращения 02.05.2023).
6. **Дмитриев, С.М.** Применение полуэмпирических моделей турбулентности для моделирования турбулентной конвекции / С.М. Дмитриев, О.Л. Крутякова, А.С. Козелков, А.А. Куркин, В.В. Курулин, Д.А. Уткин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2019. № 2 (125). С. 18-33.
7. **Dmitriev, S.** Simulation of Turbulent Convection at High Rayleigh Numbers / S. Dmitriev, A. Kozelkov, A. Kurkin, M. Legchanov, N. Tarasova, V. Kurulin, V. Efremov, R. Shamin // Modelling and Simulation in Engineering 2018(3):1-12. [Электронный ресурс] // Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/322364229\\_Simulation\\_of\\_Turbulent\\_Convection\\_at\\_High\\_Rayleigh\\_Numbers](https://www.researchgate.net/publication/322364229_Simulation_of_Turbulent_Convection_at_High_Rayleigh_Numbers) (дата обращения 1.05.2023). DOI: 10.1155/2018/5781602
8. ООО «ТЕСИС». Об исследовании конвекции Рэлея-Бенара в рамках отраслевого CFD бенчмарка на базе экспериментальной модели АО «ОКБМ Африкантов». Материалы научно-технической конференции «Проблемы применения и верификации CFD кодов в атомной энергетике», Нижний Новгород, 2018. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.okbm.nnov.ru/media-center/news/materialy-mezhotraslevoyn-nauchno-tekhnicheskoy-konferentsii-cfd-2018/> (Дата обращения 15.04.2023).
9. **Чепилко, С.С.** Моделирование конвекции Рэлея-Бенара методомILES по расчетному коду КОРСАР/CFD / С.С. Чепилко, Д.С. Кастерин // Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике: научно-техн. конференция: материалы конференции. 2018. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.okbm.nnov.ru/media-center/news/materialy-mezhotraslevoyn-nauchno-tekhnicheskoy-konferentsii-cfd-2018/> (Дата обращения 15.04.2023).
10. **Menter, F.R.** Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA journal. 1994. № 8.
11. **Wagner, W.** et al. The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, ASME J. Eng. Gas Turbines and Power, 2000, 122.

**Дата поступления  
в редакцию: 12.05.2023**

**Дата принятия  
к публикации: 05.07.2023**

УДК 621.0+532.5

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_63

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПЛИВА С КЮРИЕВОЙ ФРАКЦИЕЙ В РЕАКТОРЕ РБЕЦ

**Т.С. Дикова**

ORCID: 0009-0001-6217-4669 e-mail: dikovats@oiate.ru  
Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ  
Обнинск, Россия

**Д.Д. Цветкова**

ORCID: 0009-0005-6965-6387 e-mail: lysinadd@oiate.ru  
Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ  
Обнинск, Россия

**А.М. Терехова**

ORCID: 0000-0003-1151-3912 e-mail: AMTerekhova@mephi.ru  
Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ  
Обнинск, Россия

Исследована возможность выжигания минорных актинидов в реакторе на быстрых нейтронах с топливом, включающим минорные актиниды. Проанализированы различные подходы к трансмутации минорных актинидов, рассматривается модель гетерогенного реактора, использующего уран-кюриево-нитридное топливо. Проведены вычислительные исследования трансмутации минорных актинидов в быстром реакторе естественной циркуляции (РБЕЦ). Обосновано, что успешное внедрение реакторов на кюриево-нитридном топливе открывает перспективы использования минорных актинидов в качестве альтернативного топлива. В результате радиоактивность отработавшего ядерного топлива может быть значительно снижена.

**Ключевые слова:** нитридное топливо, минорные актиниды, трансмутация, уран-кюриево-нитридное топливо, реактор на быстрых нейтронах, РБЕЦ.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Дикова, Т.С. Исследование топлива с кюриевой фракцией в реакторе РБЕЦ / Т.С. Дикова, Д.Д. Цветкова, А.М. Терехова // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 63-70.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_63

## STUDY OF FUEL WITH A CURIUM FRACTION IN THE RBEC REACTOR

**T.S. Dikova**

ORCID: 0009-0001-6217-4669 e-mail: dikovats@oiate.ru  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)  
Obninsk, Russia

**D.D. Tsvetkova**

ORCID: 0009-0005-6965-6387 e-mail: lysinadd@oiate.ru  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)  
Obninsk, Russia

**A.M. Terekhova**

ORCID: 0000-0003-1151-3912 e-mail: AMTerekhova@mephi.ru  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)  
Obninsk, Russia

**Abstract.** This article is devoted to the possibility of burning minor actinides in a fast neutron reactor with fuel including minor actinides. The following problems are study: approaches to the transmutation of minor actinides; creation of a model of a heterogeneous reactor using uranium-curium nitride fuel; computational studies of the transmutation of minor actinides in a fast neutron reactor. It has been proven that successful introduction of curium-fuel reactors provides the prospects for the use of minor actinides as alternative fuel. As a result, the radioactivity of spent nuclear fuel can be significantly reduced.

**Key words:** nitride fuel, minor actinides, transmutation, uranium-curium fuel, fast neutron reactor, RBEC.

**FOR CITATION:** T.S. Dikova, D.D. Tsvetkova, A.M. Terekhova. Study of fuel with a curium fraction in the RBEC reactor. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 3. С. 63-70. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_63

## Введение

Проблема переработки и утилизации минорных актинидов (МА) актуальна в связи с тем, что они вносят основной вклад в радиоактивность отработавшего ядерного топлива. Добавление минорных актинидов в качестве фракций в основную топливную композицию является одним из перспективных способов уменьшения активности отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) [1]. Возможность добавления кюриевой фракции в топливо рассматривалась в ряде работ [2]. Аргументом в пользу добавления фракций с МА в топливо служит получение электроэнергии и снижение доли минорных актинидов одновременно.

В ряду минорных актинидов обычно выделяют америций, нептуний и кюрий, именно они рассматриваются как основные кандидаты на выжигание, поскольку являются доминирующими по массе. Отработавшее ядерное топливо содержит около 1 % минорных актинидов, т.е. трансурановых изотопов нептуния (Np-237), америция (Am-241, Am-243) и кюрия (Cm-244, Cm-245, Cm-246). Пропорции фракций нептуния, америция и кюрия в МА зависят от типа топлива, используемого в ядерных реакторах, и глубины его выгорания. Темпы наработки отработавшего ядерного топлива и минорных актинидов опубликованы МАГАТЭ [3], т.е. на 1 т ОЯТ приходится 64,7 г кюрия [4].

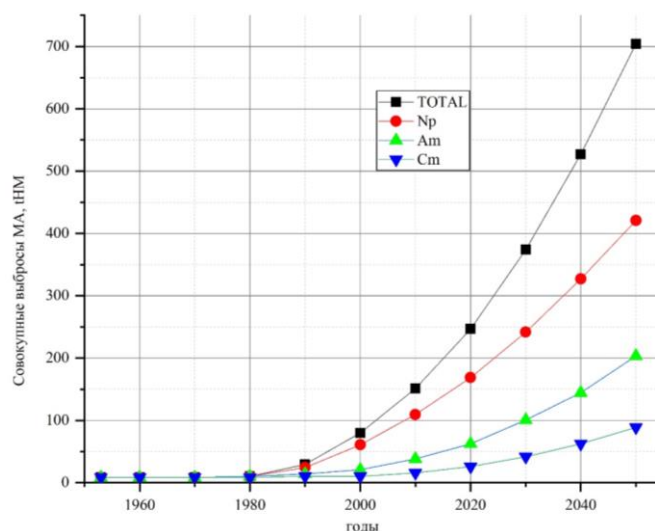


Рис. 1. Оценочный запас второстепенных актинидов во всем мире

Fig. 1. Estimated stock of minor actinides worldwide

В данной работе рассматривается возможность выжигания кюрия в быстрых ядерных реакторах на примере РБЕЦ (быстрого реактора естественной циркуляции). Выбор реактора на быстрых нейтронах мотивирован тем, что в ряде работ [2, 5-7] указывалось, что выжигание минорных актинидов в быстром спектре предпочтительнее, чем в тепловом. Несмотря на то, что у Cm-244 период полураспада составляет 18,1 г., его длительное хранение может вы-

звать проблему нераспространения из-за наработки плутония. Примерно через 3 г. выдержки кюриевая фракция будет состоять в основном из трех изотопов кюрия: Cm-244, Cm-245 и Cm-246. Если рассматривать нейтронно-физические свойства данных изотопов кюрия, можно сделать вывод, что Cm-244 является делящимся материалом, и его размножающие свойства лучше по сравнению с плутонием [8]. Изотопы Cm-244 и Cm-244 выгодно отличаются от изотопов U- 238 и U-235 с точки зрения нейтронно-физических свойств.

### Вычислительные методы и математическая модель реактора

Для построения математической модели исследуемого реактора использовался программный комплекс «SERPENT». Он представляет собой непрерывный энергетический код, реализующий метод Монте-Карло. Особенность данного программного комплекса заключается в удобной механике реализации как 2D- и 3D-геометрий топливных элементов, так и активных зон реакторов [9]. CSG-модель геометрии, состоящая из материала ячеек и определяемая произвольным типом поверхности, используется и дает ряд преимуществ программному комплексу SERPENT. Также комплекс имеет дополнительные геометрии, которые можно использовать для проектирования топлива [10-11]. В ПК SERPENT применяются библиотеки непрерывных сечений взаимодействия нейтронов со средой, представленные в ACE-формате. Это позволяет использовать в расчетах сведения о сечениях из таких файлов оцененных ядерных данных, как ENDF/B, JEFF и т.д. Данные характеристики позволили нам при помощи этого программного комплекса построить модель гетерогенной зоны реактора РБЕЦ и произвести ее расчет.

Математическая модель строилась на основе реактора РБЕЦ, прототип которого был разработан НИЦ «Курчатовский институт». В проекте РБЕЦ тепловой мощностью 900 МВт и электрической мощностью 340 МВт конструкция и теплогидравлические параметры основываются на проверенных технических решениях и имевшемся на тот момент опыте использования топлива, конструкционных материалов и технологий жидкометаллического теплоносителя [11]. Теплоносителем в данной модели реактора служит свинец-висмут. Активная зона представляет собой 12 участков, отличающихся друг от друга различными параметрами (температурой и составом материалов) (рис. 2). Материалов всего четыре: топливо активной зоны (которое также может отличаться по обогащению в зависимости от подзоны), теплоноситель, топливо зоны воспроизводства и конструкционная сталь.

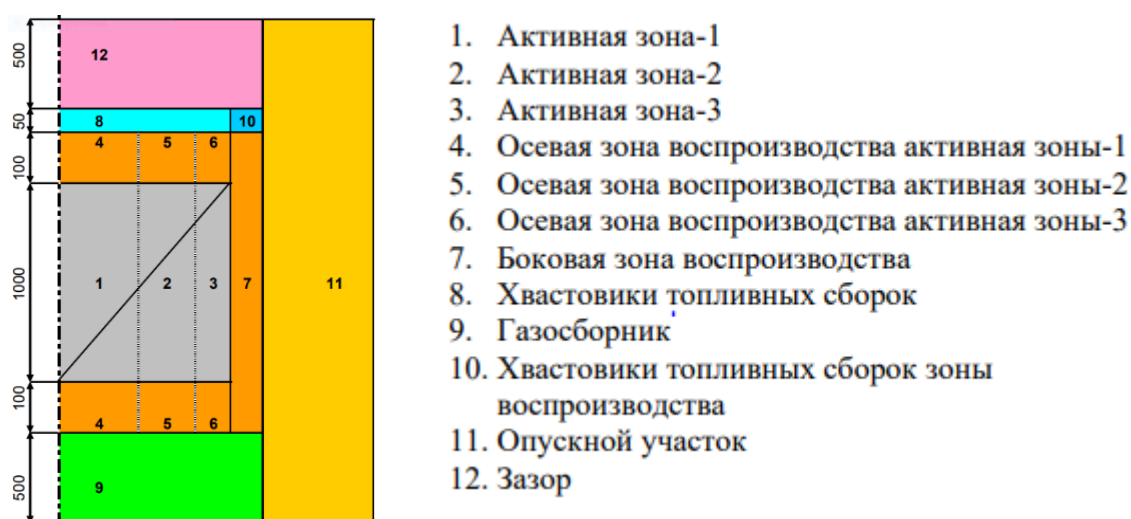


Рис. 2. Вертикальный профиль активной зоны реактора РБЕЦ

Fig. 2. Vertical section of the RBEC reactor core

В качестве стандартного топлива в данном реакторе используется (Pu+U)N с обогащенным на 0,1 % по U-235 отвалным ураном. В настоящем исследовании (Cm+U)N используется также с отвалным ураном, обогащенным 0,1 % по U-235. Мы применяем нитрид кюрия, основываясь на данных [11-12], описывающих топливо реактора РБЕЦ. При этом нитридное топливо по многим параметрам превосходит оксидное; его теплопроводность примерно в 7 раз, а плотность – в 1,3 раза больше, чем у оксидного топлива. Оно хорошо совместимо со сталями, из которых делают оболочки твэлов [13]. Были рассчитаны объемные доли топлива, которые необходимы для функционирования реактора: UN-0.92 и CmN-0.08.

В результате математического моделирования получена визуализация математической модели активной зоны (рис. 3).

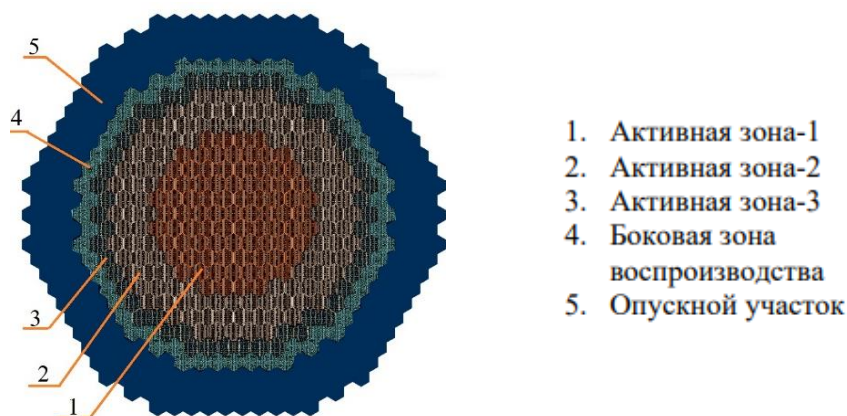


Рис. 3. Горизонтальный профиль активной зоны реактора РБЕЦ

Fig. 3. Horizontal section of the RBEC reactor core

### Результаты моделирования

В результате проведения сессии расчетов, реализованных с помощью вышеописанного ПК SERPENT и библиотеки JEFF3.1.1 [14], был получен ряд данных, графическая интерпретация которых приведена далее.

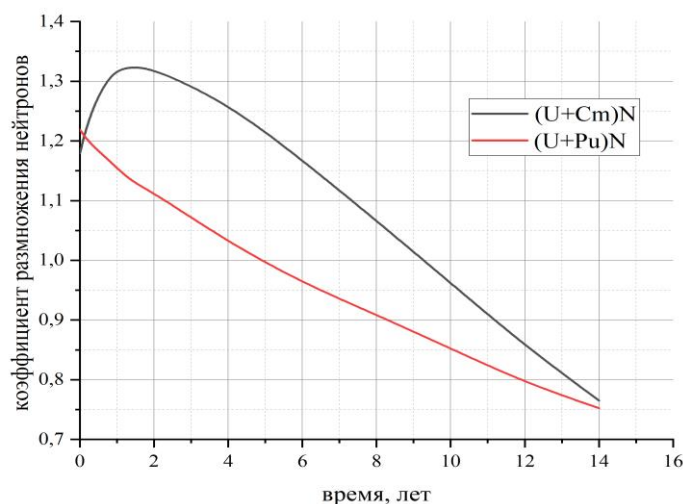


Рис. 4. Сравнение коэффициента размножения кюриевого и плутониевого топлив

Fig. 4. The comparison of multiplication factor of curium and plutonium fuels





Анализ ядерных концентраций осколков деления в топливной композиции на момент конца топливной кампании показывает, что с точки зрения содержания минорных актинидов (их концентрации минимальны) данный метод демонстрирует эффективность. На графике для наглядности приведены результаты на момент конца топливной кампании уран-плутониевого топлива, из сравнения которых можно сделать вывод, что уран-кюриевоое топливо в меньшей степени способствует накоплению минорных актинидов и плутония. Однако концентрация плутония может способствовать поднятию вопроса о нераспространении [16].

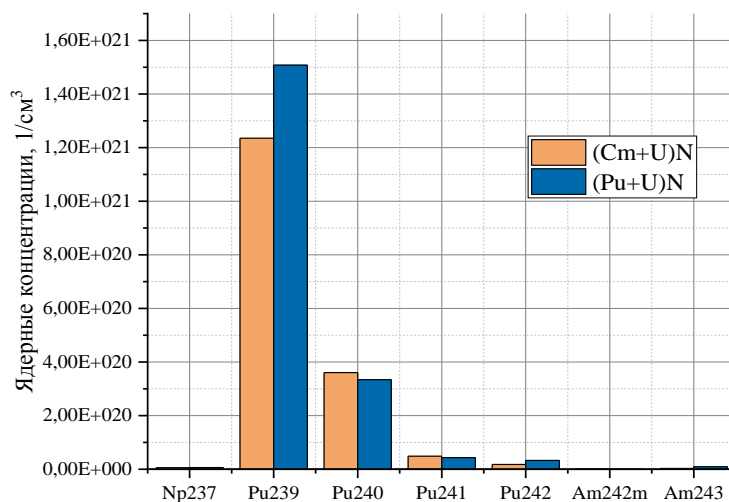


Рис. 7. Ядерные концентрации некоторых изотопов на конец кампании

Fig. 7. Nuclear densities of isotopic composition of spent fuel

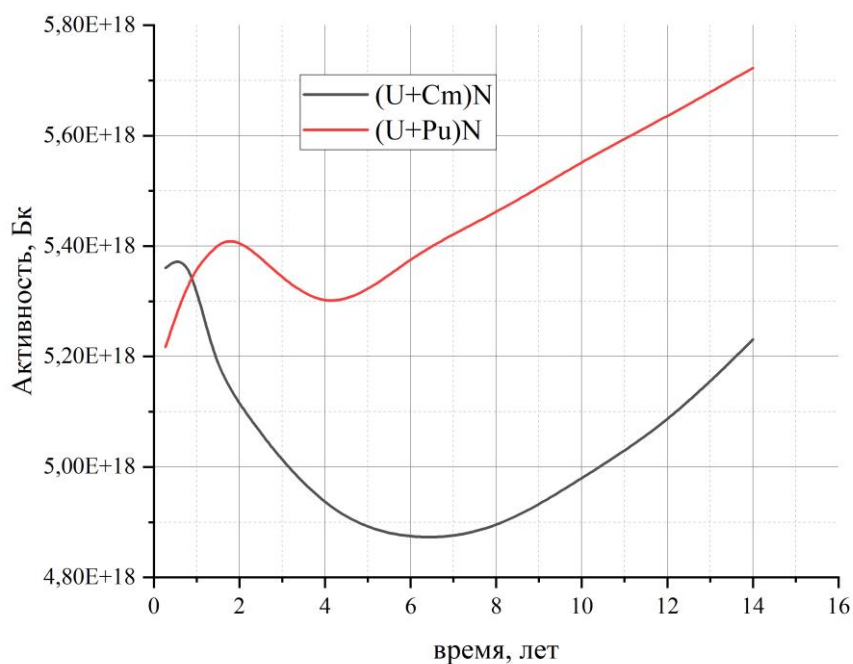


Рис. 8. Изменение активности топлива за период топливной кампании

Fig. 8. The activity of fuel dependence from time



Исследование изменение активности топлива в период топливной кампании представляет дополнительный интерес для исследования, поскольку изначальная цель – это снижение активности ОЯТ. По итогам сравнительных наблюдений динамики стандартного и уран-кюриевого топлива (рис. 8) активности обоих видов топлива имеют условно минимальное значение. Однако уран-кюриево топливо более выражено снижает свою активность и достигает минимальной точки на шестом году топливной кампании. Следовательно, продление топливной кампании не представляется целесообразным.

### Заключение

Проведены исследования выжигания изотопов кюрия путем добавления его к топливной композиции. Выявлен ряд преимуществ такого типа топлива по сравнению со стандартно используемым в реакторе типа РБЕЦ:

- существенно меньшее накопление минорных актинидов;
- значительное снижение активности топлива относительно начального уровня;
- существенный дополнительный оперативный запас реактивности.

При этом необходимо принимать во внимание присутствие существенного количества изотопов плутония на момент конца топливной кампании, вследствие чего может возникнуть проблема нераспространения.

### Библиографический список

1. IAEA, International Atomic Energy Agency. Status of Minor Actinide Fuel Development, Nuclear Energy Series, NF-T-4.6, IAEA Publishing, Vienna, Austria. 2009. С. 9.
2. **Dikova, T.S.** Investigation the possibility of burning Cm a curium fuel reactor // T.S. Dikova, Yu.E. Karazhelevskaya, A.M. Terekhova// Journal of Physics: Conference Series. 1-6. 1689. 2020. doi:10.1088/1742-6596/1689/1/012048.
3. IAEA, International Atomic Energy Agency. Nuclear Fuel Cycle Simulation System (VISTA), IAEA-TECDOC-1535, IAEA Publishing, Vienna. 2007.
4. **Culbreth, W.** Separations campaign (TRP) transmutation research program projects // W. Culbreth, E. Bakker, J. Viggato // University of Nevada, Las Vegas, 2002.
5. **Osaka, M.** Analysis of Curium in Mixed Oxide Fuel Irradiated in the Experimental Fast Reactor JOYO for the Evaluation of Its Transmutation Behavior // M. Osaka, S. Koyama, T. Mitsugashira // Journal of Nuclear Science and Technology. 2004.
6. IAEA, International atomic energy agency, Use of Fast Reactors for Actinide Transmutation (Proceedings of a Specialists Meeting, Obninsk, Russian Federation, 22-24 September 1992), IAEA-TECDOC-693, IAEA, Vienna (1993).
7. **Posey, J.C.** Curium-244 isotopic power fuel-chemical recovery from commercial power reactor fuels. Isotopes Development Center Oak Ridge National Laboratory Post Office Box X Oak Ridge, TN 37830. 1973.
8. **Leppanen, J.** PSG2/SERPENT – A Continious Energy Monte-Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. VTT Technical Research Centre of Finland release, Helsinki. 2012.
9. **Третьякевич, С.С.** Программные средства, применяемые для анализа и обоснования безопасности атомной электростанции в части нейтронно-физических вычислений. Использование кода PSG2/SERPENT для расчета  $K_{eff}$  уран-водо-графитовых систем // С.С. Третьякевич, Ф.А. Сперанский. А.Ю. Аникин, Д.К. Герасимов, А.В. Курындин, А.А. Строганов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. Обнинск, 2011. Вып. 3. С. 72-76.
10. **Аникин, А.Ю.** Верификация программного средства PSG2/SERPENT для расчета  $K_{eff}$  уранводных систем // А.Ю. Аникин, Д.К. Герасимов, А.В. Курындин, К.Ю. Соколов, А.А. Строганов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. Обнинск, 2012. Вып. 3. С. 70-73.
11. **Алексеев, П.Н.** Оптимизация концептуальных решений для свинцово-висмутового быстрого реактора РБЕЦ-М // Алексеев П.Н., Микитюк К.О., Васильев.А.А// Атомная энергия, 2004. Т. 97. Вып. 2. С. 115-125.

12. **Хорасанов, Г.Л.** Некоторые макрохарактеристики активных зон быстрых реакторов средней мощности / Г.Л. Хорасанов, А.И. Блохин // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2012. № 3. С. 18.
13. **Потапов, А.М.** Оценка термодинамических свойств нитрида кюрия // Компьютерное моделирование физико-химических свойств стекол и расплавов: труды XII Российского семинара. – Курган, 2014. С. 51-52.
14. **Leppanen, J.** PSG2/SERPENT – A Continious Energy MonteCarlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, – Helsinki: VTT Technical Research Centre of Finland, 2015. Электронный ресурс: [http://montecarlo.vtt.fi/download/Serpent\\_manual.pdf](http://montecarlo.vtt.fi/download/Serpent_manual.pdf) (дата доступа 24.02.2022)
15. **Sintsov, A.E.** Some features of the combustion of the curium fraction of younger actinides in a neutron field // A.E. Sintsov, V.A. Apse, A.N. Shmelev // Izvestiya Wysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernaya Energetika, 2004, 98, Obninsk, Russian federation. 2004.
16. **Amiard, J.-C.** Disarmament and Decommissioning in the Nuclear Domain // John Wiley & Sons Limited, Vol. 4. 2021.

*Дата поступления  
в редакцию: 20.01.2023*

*Дата принятия  
к публикации: 25.07.2023*

УДК 629.039.58+519.248

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_71

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСТВОРЕНИЯ, ВЫДЕЛЕНИЯ И ПЕРЕНОСА ГАЗОВ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ПОДДЕРЖАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

**В.И. Полуничев**ORCID: 0000-0003-1859-9616 e-mail: [dep59@okbm.nnov.ru](mailto:dep59@okbm.nnov.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***М.С. Кабина**ORCID: 0009-0003-8666-8203 e-mail: [marinakabina99@gmail.com](mailto:marinakabina99@gmail.com)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Анализируются процессы растворения, выделения и переноса газов в теплоносителе судовых реакторных установок и их влияние на точность поддержания давления в первом контуре. Исследования выполнены для режимов разогрева из различных исходных состояний установок и расхолаживания. Определены объемы растворенных и выделившихся газов и их распределения между первым контуром и системой компенсации давления, показано их влияние на изменение давления в контуре. Приведены основные параметры установок, влияющие на количество растворенного и выделившегося газа и степень его влияния на давление. Проведены оценочные расчеты процессов переноса газов для блочного и интегрированного вариантов реакторных установок. Результаты работы могут быть полезны при проектировании перспективных реакторных установок для судов и атомных станций малой мощности с длительным ресурсом, а также для обоснования их надежности.

**Ключевые слова:** растворение, выделение, перенос, расхолаживание реакторных установок, разогрев, газовая система компенсации давления, судовые реакторные установки, точность поддержания давления.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Полуничев, В.И. Исследование процессов растворения, выделения и переноса газов и их влияния на точность поддержания давления в первом контуре реакторных установок / В.И. Полуничев, М.С. Кабина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 71-81. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_71

## INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF DISSOLUTION, RELEASE AND TRANSFER OF GASES AND THEIR INFLUENCE ON THE ACCURACY OF MAINTAINING PRESSURE IN THE PRIMARY CIRCUIT OF REACTOR PLANTS

**V.I. Polunichev**ORCID: 0000-0003-1859-9616 e-mail: [dep59@okbm.nnov.ru](mailto:dep59@okbm.nnov.ru)Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia***M.S. Kabina**ORCID: 0009-0003-8666-8203 e-mail: [marinakabina99@gmail.com](mailto:marinakabina99@gmail.com)Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The article presents an analysis of the processes of dissolution, emission and transfer of gases in the coolant of ship reactor units and their influence on the accuracy of maintaining pressure in the primary circuit. Studies of these processes have been carried out for heating modes from various initial states of plants and cooldown. The vol-

umes of dissolved and emitted gases and their distribution between the primary circuit and the pressure compensation system have been determined and their influence on the pressure change in the circuit has been shown. The main parameters of the reactor units that affect the amount of dissolved and emitted gas and the degree of its influence on pressure are given. Estimated calculations of gas transfer processes for block and integrated versions of reactor units have been carried out. The obtained results can be useful in the design of advanced reactor units for ships and small nuclear power plants with a long service life, as well as to justify their reliability.

**Key words:** dissolution, gas emission, gas transfer, cooling of the reactor, heating of the reactor, gas pressure compensation system, ship reactor installation, accuracy of pressure maintenance.

**FOR CITATION:** V.I. Polunichev, M.S. Kabina. Investigation of the processes of dissolution, release and transfer of gases and their influence on the accuracy of maintaining pressure in the primary circuit of reactor plants. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 3. Pp. 71-81. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_71

## Введение

Атомный ледокольный флот России, в состав которого входят реакторные установки (РУ) типа ОК-900 и РИТМ, обеспечивает стабильное функционирование арктической транспортной системы. Надежность этих РУ подтверждена практическим опытом их эксплуатации [1]. В настоящее время ведется строительство атомных ледоколов нового поколения, которые будут иметь более высокие технико-экономические показатели. Наиболее перспективным проектом РУ атомных ледоколов и плавучих атомных станций малой мощности в настоящее время является РИТМ. Его особенностью является интегральное исполнение парогенерирующего блока и введение в состав системы компенсации давления (СКД) гидроаккумуляторов и дополнительного объема воды для реализации безотходной технологии. Это сопряжено с повышенными объемами теплоносителя в первом контуре и СКД и соотношениями объемов воды и газа по сравнению с реакторными установками предыдущих поколений блочного типа [2]. В ходе проведения швартовых и ходовых испытаний головного универсального атомного ледокола «Арктика» имели место изменения давления в первом контуре в режимах разогрева, маневрирования мощностью, превышающие проектные, и скопление газа в оборудовании первого контура, которые практически отсутствовали в установках типа ОК-900. Потенциальными причинами изменения давления в указанных режимах могут быть изменение температуры газа в СКД, средней температуры теплоносителя в первом контуре, соотношение объемов газа в СКД и воды в первом контуре, а также растворение и выделение газа из теплоносителя. Амплитуда изменения давления зависит от номинального давления и объема газа в СКД.

Целью данной работы является исследование влияния процессов переноса, растворения и выделения газа из теплоносителя на изменение давления в первом контуре. С этой целью рассмотрены соответствующие режимы работы установок двух поколений: типа ОК-900 и РИТМ с точки зрения влияния газопереноса на давление в первом контуре в номинальных и переходных режимах. Процессы растворения, выделения и переноса газа в первом контуре РУ с газовой системой КД изучены достаточно подробно [3-5]. В основном они связаны с водно-газовым и химическим режимом теплоносителя, надежностью работы оборудования, теплогидравликой. В данной работе выполнено исследование влияния указанных процессов на давление теплоносителя в первом контуре и точность его поддержания в различных режимах, в том числе, в режимах расхолаживания и разогрева.

## Режим расхолаживания РУ типа ОК-900 и РИТМ

Рассмотрим режимы нормального расхолаживания установок двух разных поколений: РУ типа ОК-900 и РИТМ. Для выполнения сравнительного анализа двух типов установок расчеты проводились при исходных данных, представленных в табл. 1.

Таблица 1.  
Основные технические характеристики реакторных установок

Table 1.  
Main technical characteristics of reactor units

Характеристика	РУ типа ОК-900	РУ типа РИТМ
Температура в КД, °С	50	50
Средняя температура теплоносителя 1 контура, °С	295	295
Давление 1 контура в рабочем состоянии, МПа	12,8	15,7
Давление 1 контура в расхоложенном состоянии, МПа	8,1	7,5
Объем первого контура (без КД), м <sup>3</sup>	19	27
Рабочий объем газа в КД, м <sup>3</sup>	8,8	7
Общий объем КД, м <sup>3</sup>	8,3	22,9
Объем первоначальной заливки в КД, м <sup>3</sup>	1,3	9,3
Объем газа в КД в расхоложенной РУ, м <sup>3</sup>	13	13,6

В процессе расхоложивания температура и давление первого контура снижаются, происходит пополнение реактора водой СКД, снижаются уровень и давление при постоянной температуре. В соответствии с изменениями параметров теплоносителя меняются и равновесные концентрации растворенного газа [5]. На рис. 1 и 2 представлены зависимости концентраций азота от средней температуры первого контура в процессе расхоложивания РУ типа ОК-900 и РИТМ.

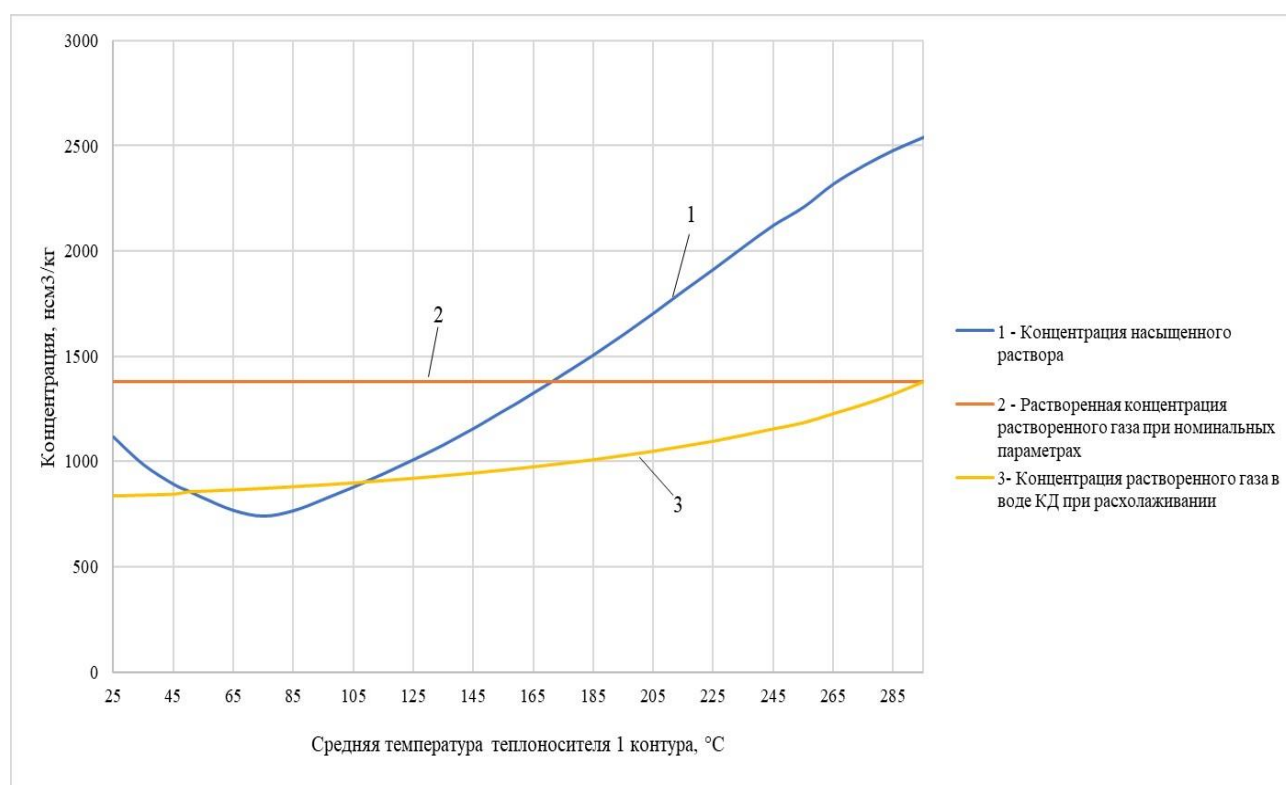
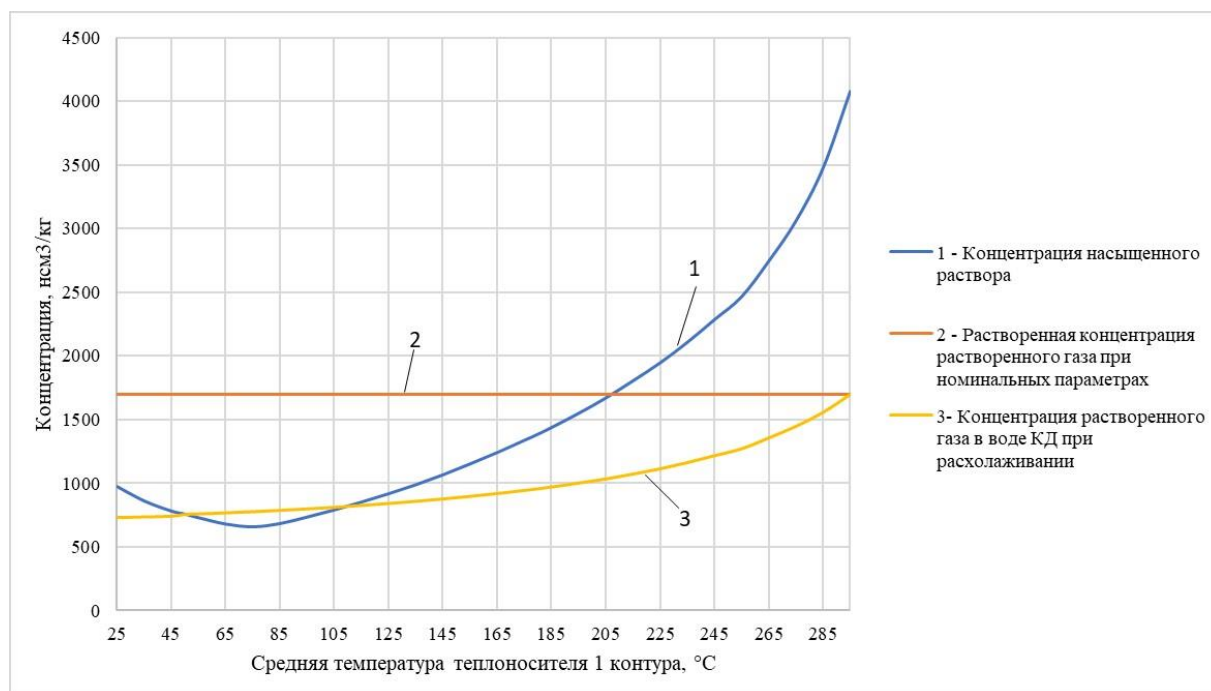


Рис. 1. Зависимость предельной концентрации газа в теплоносителе первого контура от средней температуры в процессе расхоложивания для установки типа ОК-900 [6]

Fig. 1. Dependence of the limiting gas concentration in the primary coolant on the average temperature of the primary circuit in the cooldown process for the ОК-900 reactor unit [6]



**Рис. 2. Зависимость предельной концентрации газа в теплоносителе первого контура от средней температуры в процессе расхолаживания для установки типа РИТМ [6]**

**Fig. 2. Dependence of the limiting gas concentration in the primary coolant on the average temperature of the primary circuit in the cooldown process for the RITM reactor unit [6]**

Из представленных графиков видно, что при достижении температуры 170 °С в реакторе РУ типа ОК-900 начинается процесс выделения газа, а для РУ типа РИТМ – начиная с 205 °С. При данных температурах концентрации растворенного газа в теплоносителе достигают насыщения. При дальнейшем снижении температуры начинается процесс выделения газа и продолжается до достижения температуры ~ 75 °С. Последующий процесс возможного растворения газа, выделившегося в контуре, в связи с малой скоростью протекания процесса может не учитываться. Нормальными условиями принято считать давление газа  $P_0 = 101,325$  кПа и его температуру  $T_0 = 293$ °С. Приведение объема газа  $V_0$ , находящегося при нормальных условиях, к заданной температуре  $T$  (по Кельвину) и давлению  $P$  осуществляется по следующей формуле:

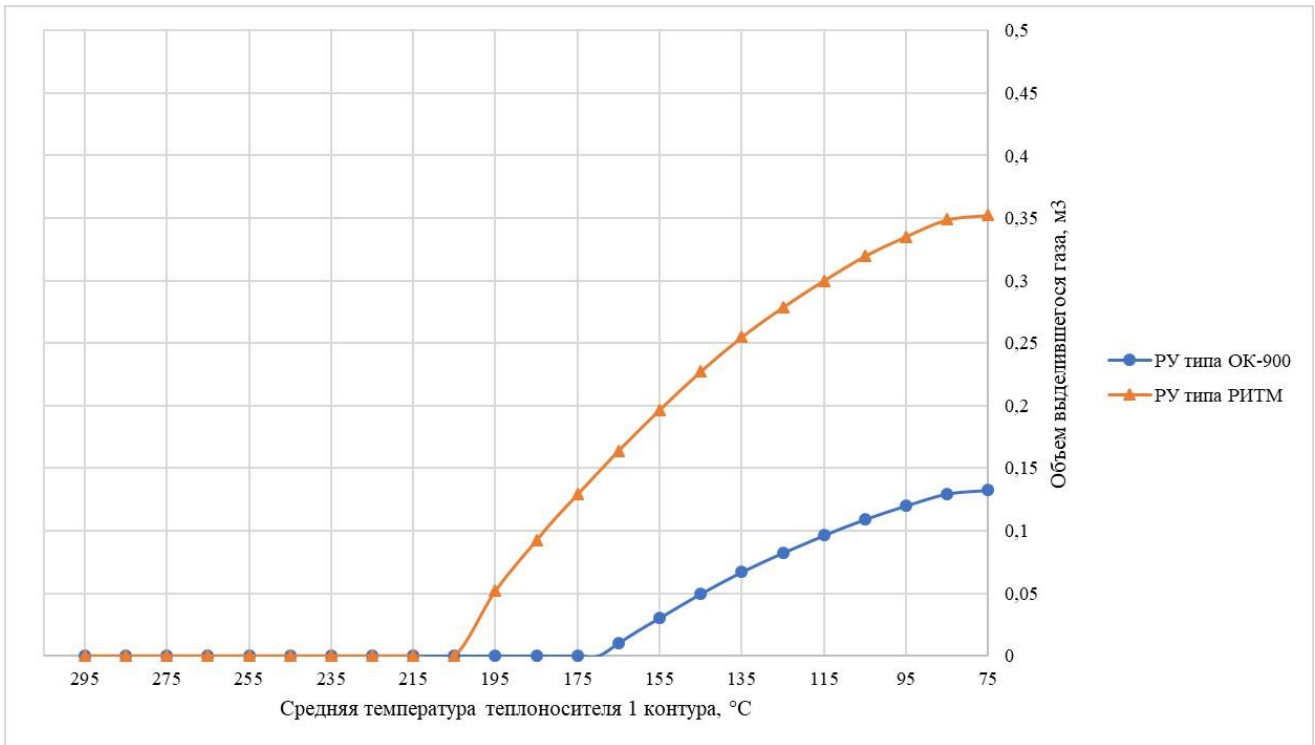
$$V'_0 = V_0 \frac{P_0 \cdot T}{P \cdot T_0} \quad (1)$$

Объем газа, выделившегося из исходной массы воды первого контура (без КД) в реакторе в процессе расхолаживания, определяется по следующему соотношению [5]:

$$V_{г,р} = \Delta C_{1К} \cdot G \quad (2)$$

где  $\Delta C_{1К} = C_{1К}^0 - C_{1К}$  – изменение равновесной концентрации газа в исходной массе воды первого контура при расхолаживании;  $C_{1К}^0$  – равновесная концентрация растворенного азота в теплоносителе первого контура перед расхолаживанием;  $C_{1К}$  – равновесная концентрация газа в исходной массе теплоносителя в первом контуре в процессе расхолаживания;  $G$  – масса воды в первом контуре в рабочем состоянии РУ.

На рис. 3 представлено изменение объема выделившегося газа из исходной воды первого контура (без КД) в процессе расхолаживания РУ типа ОК-900 и РИТМ [5].



**Рис. 3. Зависимость объема газа, выделившегося из исходной массы воды, в реакторе РУ типа ОК-900 и РИТМ от средней температуры первого контура в процессе расхолаживания**

**Fig. 3. Dependence of the volume of gas emitted from the initial mass of water in OK-900 and RITM reactor units on the average temperature of the primary circuit during cooldown**

Объем газа, выделившегося из массы воды, поступившей из КД в реактор, в процессе расхолаживания определяется из следующего соотношения [5]:

$$V_{г.КД \rightarrow Р} = C_{КД \rightarrow Р} \cdot \Delta G \tag{3}$$

где  $C_{КД \rightarrow Р} = \frac{C_{КД_i} + C_{КД_{i+1}}}{2}$  – средняя концентрация газа в массе воды КД, поступающей в реактор, в процессе расхолаживания;  $C_{КД_i}, C_{КД_{i+1}}$  – концентрации растворенного газа в массе воды КД в процессе расхолаживания в точках  $i$  и  $i+1$  соответственно (в начальный момент времени  $i=0$ , шаг  $i=i+1$ );  $\Delta G$  – масса воды, перенесенная из КД в реактор.

На рис. 4 представлено изменение объема газа, выделившегося из массы воды КД, поступившей в реактор в процессе расхолаживания РУ типа ОК-900 и РИТМ.

Объем газа, выделившегося из массы воды КД, в процессе расхолаживания:

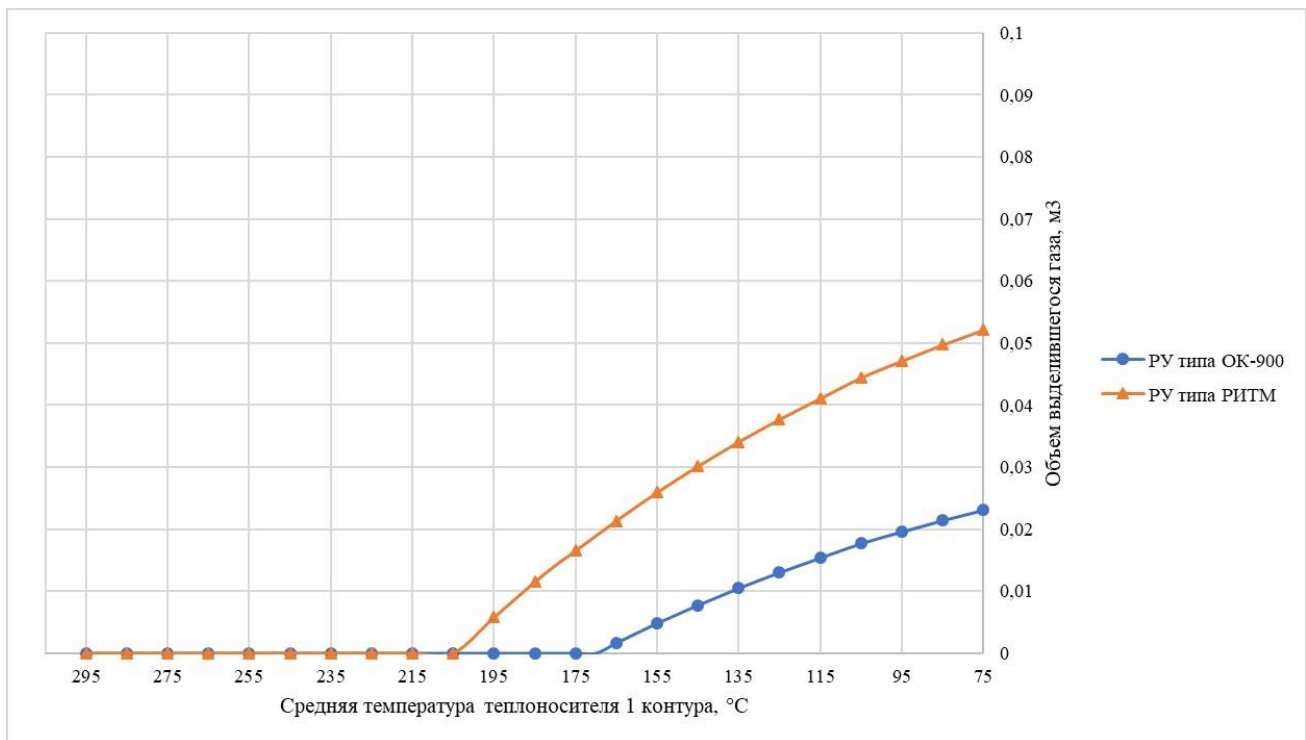
$$V_{г.КД} = C_{КД \rightarrow Р} \cdot (G_{КД} - \Delta G) \tag{4}$$

где  $G_{КД}$  – масса воды в КД в рабочем состоянии.

На рис. 5 представлено изменение объема выделившегося газа в КД, в процессе расхолаживания РУ типа ОК-900 и РИТМ.

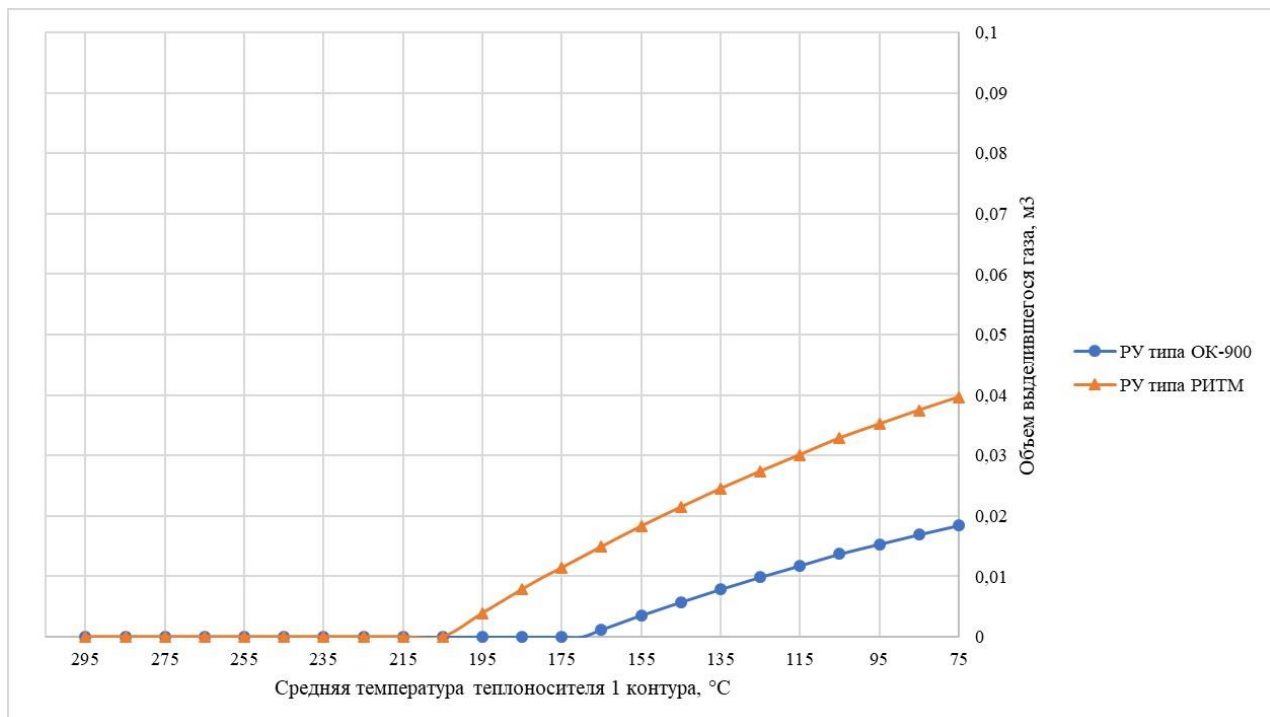
Общий объем газа, выделившегося в первом контуре в процессе расхолаживания, будет состоять из трех компонент: объем газа, выделившегося из исходной массы воды в реакторе, объема выделившегося в реакторе газа из массы воды, поступившей из КД и объема газа, выделившегося в КД.

$$V_{\Sigma г} = V_{г.Р} + V_{г.КД \rightarrow Р} + V_{г.КД} \tag{5}$$



**Рис. 4. Изменение объема газа, выделившегося из массы воды, поступившей из КД в реактор в процессе расхолаживания РУ ОК-900А и РИТМ-200**

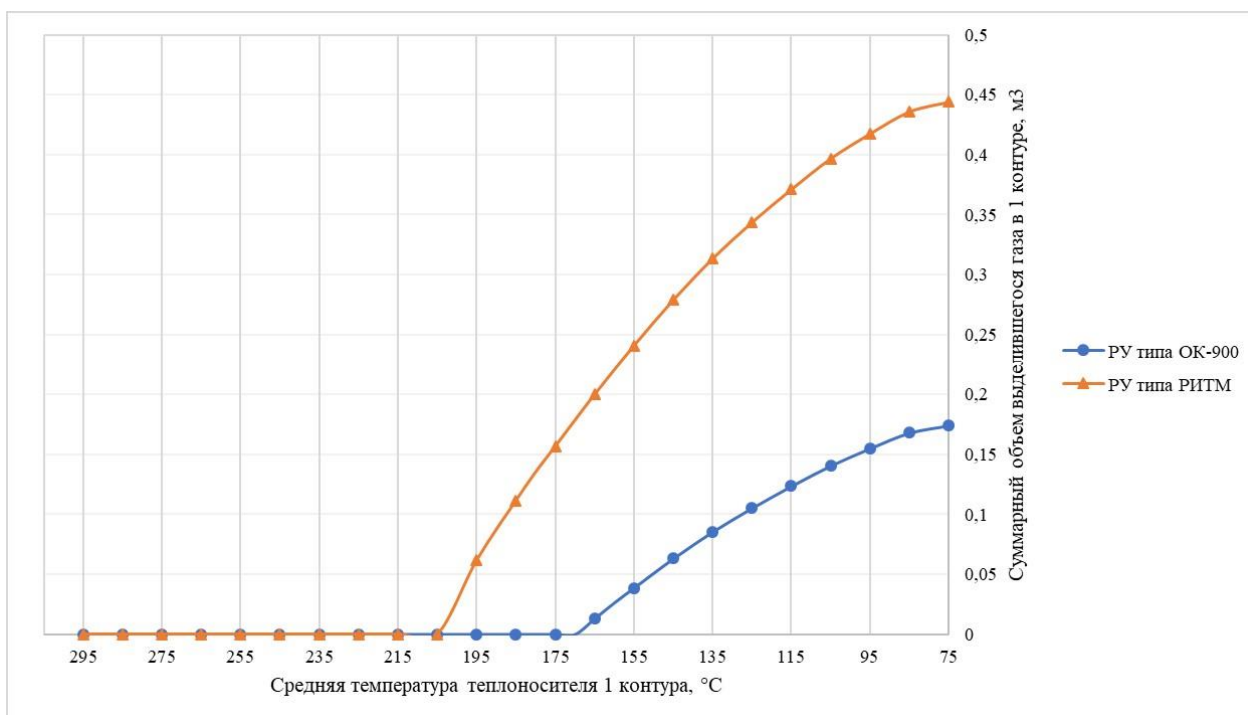
**Fig. 4. Change in the volume of gas emitted from the mass of water supplied from the pressure compensator to the reactor in the cooldown process for the OK-900A and RITM-200 reactor units**



**Рис. 5. Изменение объема выделившегося газа в КД в процессе расхолаживания РУ типа ОК-900 и РИТМ**

**Fig. 5. Change in the volume of emitted gas in the pressure compensator during cooldown for the OK-900 and RITM reactor units**





**Рис. 6. Суммарный объем выделившегося газа в первом контуре РУ типа ОК-900 и РИТМ в процессе расхолаживания**

**Fig. 6. The total volume of emitted gas in the primary circuit during cooldown process for the ОК-900 and RITM reactor units**

На рис. 6 представлен график суммарного объема газа, выделившегося в первый контур. В результате выполнения расчетов и представленных выше графиков выявлено, что суммарный объем выделившегося газа в первом контуре РУ типа ОК-900 будет составлять ~ 175 л, а РУ типа РИТМ ~ 450 л, что существенно больше, чем в установках более раннего поколения типа ОК-900. Исходя из расчета, при повышении объема и давления теплоносителя первого контура объем выделившегося газа в процессе расхолаживания существенно увеличивается. С одной стороны, повышение давления благоприятно влияет на условия работы активной зоны, увеличивая запас до кипения, с другой стороны, оно негативно влияет на увеличение концентрации растворенного в теплоносителе газа, его выделения в первом контуре в переходных режимах и при расхолаживании. При этом повышается вероятность загазованности циркуляционных насосов, приводов СУЗ, переноса части газа, что влияет на надежность работы. Кроме того, растворение и выделение газа при работе РУ вызывает изменение давления в первом контуре.

Опыт эксплуатации показывает, что при работе газовой СКД на установках старого поколения существенных проблем с поддержанием давления и выделением газа в оборудовании не возникало. Следовательно, пониженное рабочее давление первого контура, меньшие объемы теплоносителя предпочтительны с точки зрения указанных параметров.

#### **Влияние объема газа, выделившегося в первый контур в результате расхолаживания, на точность поддержания давления**

Проведем анализ влияния выделившегося газа в результате расхолаживания на точность поддержания давления в первом контуре РУ типа РИТМ. Добавим к объему газа в газовой системе компенсации давления объем выделившегося газа в результате расхолаживания. С учетом новой величины газа в системе ГСКД, выполним пересчет давления первого контура в расхолаженном состоянии при  $t_{1к} = 75\text{ °C}$  по следующей формуле:

$$P_{1К}^{хол'} = \frac{P_{1К}^{хол} \cdot (V_{газа в КД} + V_{\Sigma г})}{V_{газа в КД}} \quad (6)$$

где  $P_{1К}^{хол'}$  – давление первого контура в расхоложенном состоянии с учетом влияния выделившегося газа;  $P_{1К}^{хол}$  – давление первого контура в расхоложенном состоянии без учета выделившегося газа;  $V_{газа в КД}$  – объем газа в КД в расхоложенном состоянии без учета выделившегося газа.

Увеличение давления в первом контуре по итогам учета объема выделившегося газа:

$$\Delta P = P_{1К}^{хол'} - P_{1К}^{хол} \quad (7)$$

В результате расчета было выявлено, что выделившийся объем газа в первом контуре РУ типа РИТМ, который составляет ~ 450 л, будет увеличивать давление первого контура на 2,53 бар, давление повысилось с 72 бар до 74, 53 бар. Объем газа, выделившегося в РУ типа ОК-900, который ранее был оценен в 175 л, меньше влияет на повышение давления, увеличение составило 1,1 бар. Следовательно, меньший объем выделившегося газа в процессе расхоложивания менее сильно повлияет на изменение давления и работоспособность РУ.

При работе установки необходимо обеспечивать заданную точность поддержания давления. Было выявлено, что для обеспечения более мягкого регулирования давления в установках типа ОК-900, точность поддержания должна составлять – повышение средней температуры первого контура на  $\Delta T = 5^\circ\text{C}$  должно приводить к изменению давления первого контура на  $\Delta P = 3$  бар. При данной точности исходный объем газа в системе будет составлять  $V_{г0} = 8,8 \text{ м}^3$ .

Исходный объем газа можно оценить по формуле:

$$V_{г0} = \frac{\Delta V_{г} \cdot (P_{1к} + \Delta P)}{\Delta P} \quad (8)$$

где  $P_{1к}$  – давление первого контура в рабочем состоянии;  $\Delta P$  – изменение давления на 3 бар при условии повышения средней температуры в реакторе на  $5^\circ\text{C}$ ;  $\Delta V_{г}$  – изменение объема газа в КД при повышении давления на  $\Delta P$ .

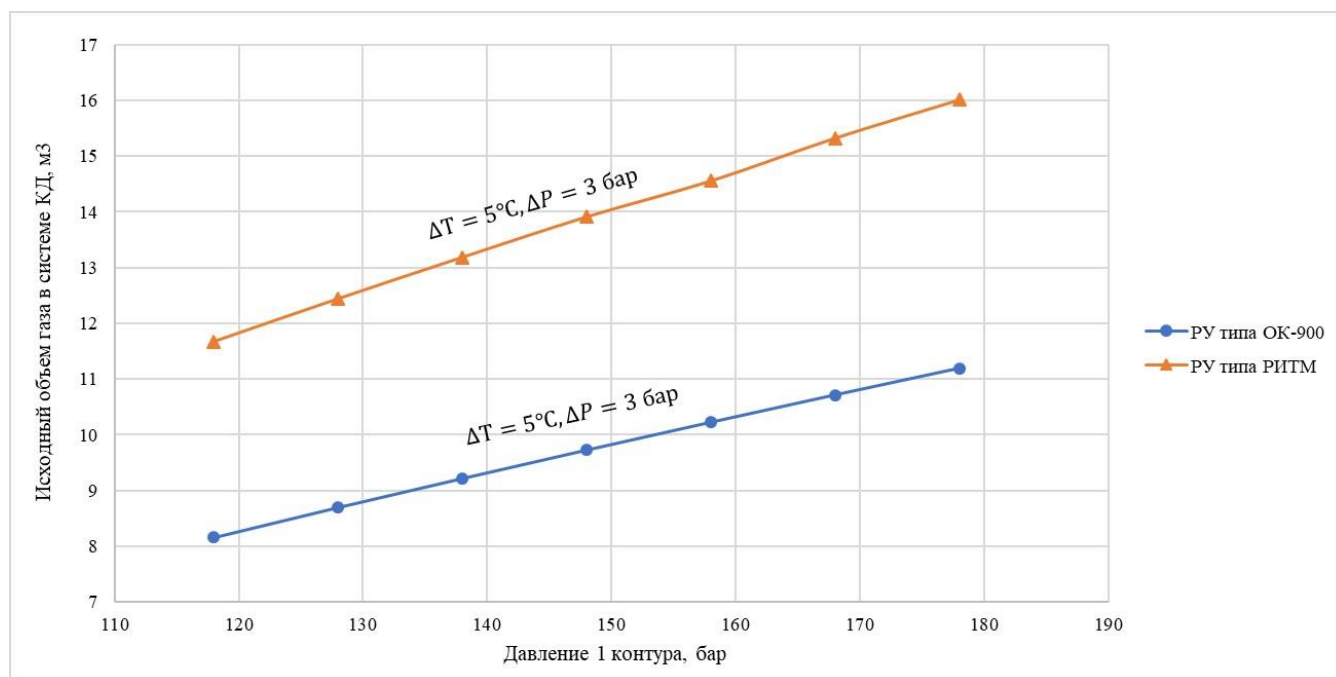
Чем меньше объем газа, тем более жесткой является система. Введем коэффициент жесткости – параметр, характеризующий отношение изменения давления к изменению объема газа при повышении давления на  $\Delta P$  и средней температуры теплоносителя в реакторе на  $\Delta T$ .

$$k = \frac{\Delta P}{\Delta V_{г}} \quad (9)$$

Для установки типа ОК-900 коэффициент жесткости составит  $k = 15,06 \frac{\text{бар}}{\text{м}^3}$ .

В установках типа РИТМ коэффициент жесткости выше. Следовательно, работа системы компенсации характеризуется большими колебаниями давления в первом контуре. Данное явление подтверждается и опытом эксплуатации. Для приведения точности поддержания давления в первом контуре к условиям установок типа ОК-900 необходимо увеличение объема газа в системе компенсации.

На рис. 7 представлена зависимость исходного объема газа в системе КД от давления первого контура при одинаковом условии точности поддержания давления для двух рассматриваемых проектов.



**Рис. 7. Зависимость исходного объема газа в системе КД от давления первого контура при одинаковой точности поддержания давления в РУ типа ОК-900 и РИТМ**

**Fig. 7. Dependence of the initial volume of gas in the pressure compensation system on the pressure of the primary circuit at the same accuracy of pressure maintenance in the ОК-900 and RITM reactor units**

На графике видно, что при одной точности поддержания давления объем газа в РУ типа РИТМ при давлении 157 бар должен составлять около  $14,5 \text{ м}^3$ , что существенно больше, чем реальное значение, примененное в проекте. Следовательно, с одной стороны, данный подход позволит установкам нового поколения работать с меньшими изменениями давления в переходных режимах, с другой стороны – потребует увеличения объема СКД.

#### **Режим разогрева РУ типа ОК-900 и РИТМ после расхолаживания и снятия давления в первом контуре до атмосферного**

В процессе разогрева и некоторого времени после разогрева происходит растворение газа в воде КД и насыщение воды реактора газом за счет массообмена между реактором и компенсатором, в результате которого концентрации растворенного газа в компенсаторе и реакторе выравниваются. Принципы расчета массопереноса газа из газового объема в воду КД и из КД в реактор приведены в работе [5]. Исходное состояние: реактор заполнен водой массой  $G_p^0$ , в компенсаторе первоначальная заливка -  $G_{п.з}$ , исходное давление в первом контуре -  $P_{1к}^0$ , рабочее давление в первом контуре -  $P_{1к}$ .

Общая масса воды в реакторе и КД перед разогревом:

$$G_{1к} = G_p^0 + G_{п.з} \quad (10)$$

Объем газа, растворившегося при разогреве и работе РУ:

$$V_r = C_{кд} \cdot G_{1к} \quad (11)$$

где  $C_{кд} = K(T_{кд}) \cdot P_{1к}^0$  – равновесная концентрация растворенного газа в массе воды первого контура;

Объем газа, растворившегося при разогреве РУ типа РИТМ, составил  $\sim 430 \text{ л}$ , при разогреве РУ типа ОК-900 –  $220 \text{ л}$ .

Давление в первом контуре после установления равновесной концентрации растворенного газа в теплоносителе первого контура можно определить следующим образом:

$$P_{1к}' = \frac{P_{1к}^0 \cdot (V_{\text{газа в КД}} - V_{\Gamma})}{V_{\text{газа в КД}}} \quad (12)$$

Величина снижения давления в первом контуре с учетом объема газа, растворившегося при разогреве и работе РУ:

$$\Delta P_{1к} = P_{1к}^0 - P_{1к}' \quad (13)$$

Таким образом, давление в первом контуре после установления равновесной концентрации растворенного газа в теплоносителе первого контура РУ типа РИТМ составит 150 бар, снижение по давлению – 10 бар. В РУ типа ОК-900 давление понизится до 126 бар, снижение по давлению – 3,25 бар, что менее сильно отразится на работе РУ.

### Режим разогрева РУ типа ОК-900 и РИТМ после расхолаживания без снятия давления

Режим разогрева производится из состояния РУ после расхолаживания без снятия давления. В данном варианте исходным давлением является давление, устанавливающееся после расхолаживания  $P_{1к}^{\text{хол}}$ .

Объем газа, который находился в растворе до начала разогрева:  $V_{\Gamma}' = C_{\text{КД}}' \cdot G_{1к}$ , где  $C_{\text{КД}}' = K(T_{\text{КД}}) \cdot P_{1к}^{\text{хол}}$  – концентрация растворенного газа в массе воды первого контура перед разогревом.

Объем газа, растворенного в процессе разогрева:

$$V_{\Gamma}'' = V_{\Gamma} - V_{\Gamma}' \quad (14)$$

Объем газа в растворе после разогрева  $V_{\Gamma}$  определяется по соотношению (11).

Давление в первом контуре после растворения газа:

$$P_{1к}'' = \frac{P_{1к}^0 \cdot (V_{\text{газа в КД}} - V_{\Gamma}'')}{V_{\text{газа в КД}}} \quad (15)$$

Величина снижения давления первого контура:

$$\Delta P_{1к} = P_{1к}^0 - P_{1к}'' \quad (16)$$

Таким образом, при режиме разогрева РУ типа РИТМ после расхолаживания без снятия давления, давление понизилось на 5 бар, для РУ типа ОК-900 ~ 1,6 бар.

### Заключение

Несмотря на преимущества современных реакторных установок типа РИТМ-200, они имеют недостатки с точки зрения процесса выделения газа в режимах разогрева и расхолаживания и влияния выделившегося газа на повышение давления в первом контуре. Сравнение РУ новых и действующих ледоколов показало, что характеристики, заложенные в установках типа ОК-900А, имели улучшенные показатели работы, существенных проблем во время эксплуатации не возникало. Следовательно, пониженное давление первого контура, увеличение объема газовой подушки относительно объема первого контура, меньший объем первоначальной заливки в КД более благоприятно влияют на процессы газопереноса и газовыделения, и, соответственно, на надежность работы оборудования первого контура.

Исследование процессов растворения, выделения и переноса газов в теплоносителе первого контура показало их влияние не только на водно-газовый и химический режим теплоносителя, но и на изменение давления в контуре, поэтому, проектируя РУ с ВВР и газовой системой компенсации давления, это влияние необходимо учитывать.

**Библиографический список**

1. **Деев, В.И.** Основы расчета судовых ЯЭУ: учебное пособие / В.И. Деев, Н.В. Щукин, А.Л. Черезов. Под общей редакцией проф. В.И. Деева. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 256 с.
2. **Зверев, Д.Л.** Реакторная установка нового поколения РИТМ-200 для перспективного атомного ледокола / Д.Л. Зверев, А.Н. Пахомов, В.И. Полуничев, К.Б. Вешняков, С.В. Кабин // Атомная энергия. 2012. Т.113. Вып. 6. С. 323-328.
3. **Герасимов, В.В.** Водный режим атомных станций / В.В. Герасимов, А.И. Касперович, О.И. Мартынова. – М.: Атомиздат, 1976. – 398 с.
4. **Полуничев, В.И.** Исследование процессов образования и переноса водорода в первом контуре водо-водяных реакторов с газовой системой компенсации давления и его химического взаимодействия с конструкционными материалами / В.И. Полуничев, Д.И. Новиков, М.А. Дюжий // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4 (139). С. 66-76. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_4\_66
5. **Филимонов, А.Ф.** Газовыделение и газоперенос в оборудовании первого контура реакторной установки с газовой системой компенсации / А.Ф. Филимонов, В.И. Полуничев, А.Е. Помысухина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 3 (126). С. 101-110.
6. **Тряков, Д.И.** Газовая система компенсации судовых реакторных установок и ее влияние на надежность работы оборудования первого контура / Д.И. Тряков, В.И. Полуничев // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 7. С. 50-52.

*Дата поступления  
в редакцию: 06.02.2023*

*Дата принятия  
к публикации: 25.07.2023*

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.8

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_82

### О КИНЕМАТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ЗАМКНУТЫХ ЗУБЧАТЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ КОЛЕСАМИ

**Б.Н. Акрамов**

ORCID: 0000-0002-0049-0463 e-mail: akramov57@bk.ru

Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими  
*Душанбе, Таджикистан***И.А. Исмаатов**

ORCID: 0000-0003-2176-6219 e-mail: ismatov.ismoiljon@mail.ru

Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими  
*Душанбе, Таджикистан*

Рассмотрены кинематические возможности замкнутых зубчатых дифференциалов, относящихся к группе эпициклических зубчатых механизмов. Для исследования выбраны широко применяемые и практичные схемы на основе наиболее простого планетарного механизма с варьированием только замыкающей части. Рассмотрены три возможные схемы в виде рядового зубчатого механизма. С помощью метода обращенного движения предлагается методика определения кинематических возможностей механизма замкнутого зубчатого дифференциала – получение минимального и максимального допустимых значений коэффициента передаточных отношений с учетом различных дополнительных условий. При этом учитываются ограничения на число зубьев колес для внутренних и внешних зацеплений, а также вопросы технологии сборки механизма (условие соосности, условие соседства и условие сборки). Предложен модульный принцип составления механизма из базовой (неизменяемой) части – дифференциальный механизм простейшей конструкции и сменной части – рядовой зубчатый механизм замыкающей части. Полученные на основе этого принципа схемы дифференциальных зубчатых механизмов обладают значительными преимуществами по сравнению с аналоговым сдвоенным планетарным механизмом.

**Ключевые слова:** зубчатый дифференциальный механизм, дифференциал, замыкающая часть, кинематические возможности механизма, метод обращенного движения, условие соосности, главное и дополнительные условия синтеза, передаточное отношение механизма.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Акрамов, Б.Н. О кинематических возможностях замкнутых зубчатых дифференциальных механизмов с цилиндрическими колесами / Б.Н. Акрамов, И.А. Исмаатов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 82-89. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_82

### ON KINEMATIC CAPABILITIES OF CLOSED GEAR DIFFERENTIAL MECHANISMS WITH CYLINDRICAL WHEELS

**B.N. Akramov**

ORCID: 0000-0002-0049-0463 e-mail: akramov57@bk.ru

Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi  
*Dushanbe, Tajikistan*

I.A. Ismatov

ORCID: 0000-0003-2176-6219 e-mail: ismatov.ismoiljon@mail.ru

Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi

Dushanbe, Tajikistan

**Abstract.** This article discusses the kinematic capabilities of closed gear differentials (mechanisms from the group of epicyclic gear mechanisms). The most widely used and practical schemes of the mechanism based on the simplest planetary mechanism with variation only in the closing part are studied. Three possible schemes in the form of an ordinary gear mechanism are considered as the closing part. A method for determining the kinematic capabilities of the mechanism of a closed gear differential is proposed with the help of the inverted motion method. The essence of the method is to obtain the minimum and maximum allowable values of the gear ratio factor, taking into account various additional conditions. The method takes into account restrictions on the number of gear teeth for internal and external gearing, as well as issues of mechanism assembly technology (alignment condition, neighborhood condition and assembly condition). A modular principle of composing the mechanism from the base (unchangeable) and replaceable part is proposed. The base part is a differential mechanism of the simplest design, while the replacement part is an ordinary gear mechanism of the closing part. The schemes of differential gear mechanisms obtained on the basis of this principle make it possible to obtain more advantageous schemes of the mechanism in comparison with a similar (solving the same task) double planetary mechanism.

**Key words:** gear differential mechanism, differential, closing part, kinematic possibilities of the mechanism, inverted motion method, coaxiality condition, main and additional synthesis conditions, gear ratio of the mechanism.

**FOR CITATION:** B.N. Akramov, I.A. Ismatov. On kinematic capabilities of closed gear differential mechanisms with cylindrical wheels. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 3. Pp. 82-89.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_82

## Введение

Зубчатые механизмы замкнутого дифференциала служат для передачи и преобразования вращательного движения. Принцип работы данных механизмов основан на создании контакта между зубьями зубчатых колес дифференциальный ( $3^1, 4, 1^1$  и  $H$ ) и замыкающей ( $1, 2, 2^1$  и  $3$ ) частей механизма (рис. 1). Отношение угловой скорости одного звена к угловой скорости другого звена в механизме называется передаточным отношением и обозначается буквой  $U$  с цифровыми индексами, соответствующими номерам рассматриваемых звеньев.

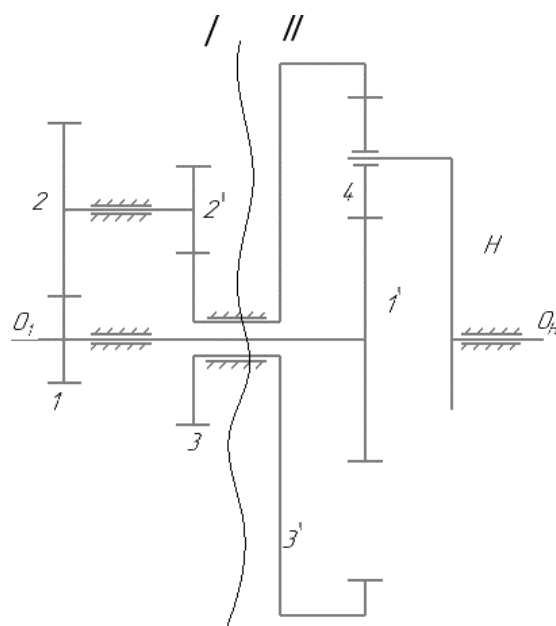


Рис. 1. Замкнутый зубчатый дифференциал

Fig. 1. Closed gear differential

Передаточное отношение сложного многоступенчатого зубчатого механизма есть произведение взятых со своими знаками передаточных отношений отдельных его ступеней:

$$U_{1n} = \frac{\omega_1}{\omega_n} = U_{12} \cdot U_{2'3} \cdot U_{3'4} \cdots U_{(n-1)'n} \quad (1)$$

В технике применяется механизм на основе дифференциала, между выходными звеньями которого установлена промежуточная зубчатая передача. Она накладывает дополнительное условие связи, и дифференциальный механизм превращается в сложный планетарный с одной степенью свободы. Такой механизм называется замкнутым дифференциальным.

На рис. 1 показана схема механизма дифференциала, у которого колеса  $1^1$  и  $3^1$  связаны промежуточной зубчатой передачей, состоящей из колес 1, 2,  $2^1$  и 3, вследствие чего угловая скорость колеса  $3^1$  зависит от угловой скорости входного колеса 1. Для определения общего передаточного отношения  $U_{1H}$  от вала  $O_1$  к валу  $O_H$  удобно мысленно расчлнить два зубчатых механизма: I – замыкающий, II – дифференциал.

### Метод исследования

Начнем с рассмотрения кинематики дифференциала. Для этого механизма имеем, согласно уравнению Виллиса:

$$U_{1^1 3^1}^{(H)} = \frac{\omega_1 - \omega_H}{\omega_3 - \omega_H} \quad (2)$$

Нам необходимо знать передаточное отношение  $U_{1H} = \frac{\omega_1}{\omega_H}$ . Чтобы его ввести, разделим числитель и знаменатель уравнения (2) на угловую скорость  $\omega_H$  и получим:

$$U_{1^1 3^1}^{(H)} = \frac{\omega_1/\omega_H - 1}{\omega_3/\omega_H - 1} = \frac{U_{1H} - 1}{\omega_3/\omega_H - 1} \quad (3)$$

Вследствие того, что колеса 1 и  $1^1$  и колеса 3 и  $3^1$  жестко связаны друг с другом, имеем соотношения  $\omega_1 = \omega_{1^1}$  и  $\omega_3 = \omega_{3^1}$ . Теперь рассмотрим замыкающую часть механизма. Передаточное отношение  $U_{13}$  этого механизма равно:

$$U_{13} = \frac{\omega_1}{\omega_3} \quad (4)$$

Из уравнения (4) получим:

$$\omega_3 = \frac{\omega_1}{U_{13}}$$

Подставив полученное выражение для  $\omega_3$  в уравнение (3), получим:

$$U_{1^1 3^1}^{(H)} = \frac{U_{1H} - 1}{\omega_1/(\omega_H U_{13}) - 1} = \frac{U_{13}(U_{1H} - 1)}{U_{1H} - U_{13}} \quad (5)$$

Из уравнения (5) определяем общее передаточное отношение  $U_{1H}$  механизма:

$$U_{1H} = \frac{U_{13}(U_{1^1 3^1}^{(H)} - 1)}{U_{1^1 3^1}^{(H)} - U_{13}} = \frac{\omega_1}{\omega_H} \quad (6)$$

Передаточные отношения, стоящие в правой части уравнения (6) могут быть определены, если известны числа зубьев  $Z_1, Z_1', Z_2, Z_2', Z_3, Z_3'$  и  $Z_4$  колес 1, 2,  $2^1, 3, 3^1$  и 4. Для них имеем:

$$U_{13} = (-1)^2 \frac{z_2 \cdot z_3}{z_1 \cdot z_2'} = \frac{z_2 \cdot z_3}{z_1 \cdot z_2'} \quad (7)$$



$$U_{1^1 3^1}^{(H)} = (-1) \frac{z_4 \cdot z_{3^1}}{z_{1^1} \cdot z_4} = -\frac{z_{3^1}}{z_{1^1}} \quad (8)$$

При расчете дифференциальных механизма, кроме главного условия синтеза (получение заданного движения), также должны выполняться и дополнительные условия синтеза (условия приведены в виде отвечающем технологии нарезания зубчатых колес по методу обкатки и стандартным режущим инструментом). В данном случае они имеют вид:

- $z_{\min} \geq 17(15)$  – ограничение на минимально допустимое число зубьев колес: (нарезание зубчатого колеса методом обкатки) разрешено применение только стандартных колес, чтобы условие соосности выполнялось абсолютно точно (17 – теоретическое значение, 15 – практическое значение, которое разрешено стандартом).
- ограничение на размеры (габаритные):  $z_{\max} \leq 150$  (для колес с внутренними зубьями),  $z_{\max} \leq 100$  (для колес с внешними зубьями);
- отсутствие интерференции зубьев для колес с внутренним зацеплением:  $z_{CH} \geq 20$ ,  $z_{CB} \geq 85$ ,  $z_{CB} - z_{CH} \geq 5$  (при условии, что колеса нарезаны стандартным инструментом).

Кроме того, все эпициклические механизмы из цилиндрических колес – соосные механизмы, поэтому должно выполняться условие соосности – ось входного звена и ось выходного звена механизма должны лежать на одной геометрической линии. В данном случае условие соосности имеем следующий вид:

$$z_{1^1} + z_4 = z_{3^1} - z_4 \quad (9)$$

Для каждого планетарного механизма существует свой диапазон передаточных чисел. Определим его для планетарного механизма лежащего в основе нашего дифференциала.

$$U_{1^1 H} + U_{1^1 3^1}^{(H)} = 1 \quad (10)$$

$$U_{1H} = 1 - U_{1^1 3^1}^{(H)} \quad (11)$$

$$U_{1^1 3^1}^{(H)} = -\frac{z_4}{z_{1^1}} \cdot \frac{z_{3^1}}{z_4} = -\frac{z_{3^1}}{z_{1^1}}$$

$$U_{1^1 H} = 1 - \left(-\frac{z_{3^1}}{z_{1^1}}\right) = 1 + \frac{z_{3^1}}{z_{1^1}} \quad (12)$$

Минимальное значение числа зубьев для колеса  $1^1$ :  $z_{1^1} = 15$ . Максимальное значение числа зубьев для колеса  $3^1$ :  $z_{3^1} = 150$ . Поэтому минимальное значение передаточного числа обращенного механизма составит:

$$U_{1^1 3^1}^{(H)} = -\frac{z_{3^1}}{z_{1^1}} = -\frac{150}{15} = -10$$

Тогда для планетарного механизма максимальное значение передаточного отношения составит:

$$U_{1^1 H} = 1 - U_{1^1 3^1}^{(H)} = 1 - (-10) = 11$$

По условию отсутствия интерференции зубьев внутреннего зацепления число зубьев колеса  $4 - z_4 \geq 20$  и для колеса  $3^1 - z_3 \geq 85$ .

Из условия сборки получим максимально допустимое число зубьев колеса  $1^1$ :

$$z_{1^1} = z_{3^1} - 2 \cdot z_4 = 85 - 2 \cdot 20 = 45$$

С учетом того что колесо  $1^1$  находится внутри колеса  $3^1$  принимаем  $z_{1^1} = 40$ . Минимальное значение передаточного отношения обращенного механизма составит:

$$U_{1^1 3^1}^{(H)} = -\frac{85}{40} = -2,125$$

Тогда для планетарного механизма получим:

$$U_{1H} = 1 - U_{13}^{(H)} = 1 - (-2,125) = 3,125$$

Для замыкающей части замкнутого зубчатого дифференциала имеем:  $n_1' = n_1$ ;  $n_3 = n_3'$

$$U_{13} = U_{12} \cdot U_{2'3} = \left(-\frac{z_2}{z_1}\right) \cdot \left(-\frac{z_3}{z_2'}\right) = +\frac{z_2 \cdot z_3}{z_1 \cdot z_2'} = \frac{n_1}{n_3} = \frac{n_3}{n_H} \quad (13)$$

Отсюда получим:  $n_3' = n_1 \cdot U_{13}$

Подставим это выражение в формулу Виллиса:

$$U_{13}^{(H)} = \frac{n_1 - n_H}{n_H \cdot (U_{13} - 1)} \quad (14)$$

Откуда находим:

$$n_1 - n_H = n_H \cdot U_{13}^{(H)} \cdot (U_{13} - 1)$$

$$n_H = \frac{n_1}{1 + U_{13}^{(H)} \cdot (U_{13} - 1)}$$

$$n_H = \frac{n_1}{1 - \frac{z_3'}{z_1} \cdot \left(\frac{z_3 \cdot z_2}{z_2' \cdot z_1} - 1\right)} \quad (15)$$

$$U_{13} = \left(-\frac{z_2}{z_1}\right) \cdot \left(-\frac{z_3}{z_2'}\right) = U_{12} \cdot U_{2'3} = 36$$

$$U_{12} = -\frac{z_2}{z_1} = 6$$

$$Z_1 = 12; Z_2 = Z_1 \cdot U_{12} = 12 \cdot 6 = 72$$

$$U_{2'3} = -\frac{z_3}{z_2'} = 5$$

$$Z_2' = 14; Z_3 = Z_2' \cdot U_{2'3} = 14 \cdot 5 = 70$$

$$U_{21} = \left(-\frac{z_1}{z_2}\right) = -\frac{12}{72} = -0,167$$

$$U_{32'} = \left(-\frac{z_2'}{z_3}\right) = -\frac{14}{70} = -0,2$$

$$U_{31} = U_{32'} \cdot U_{21} = 0,2 \cdot 0,167 = 0,0334$$

$$1 + U_{13}^{(H)} \cdot (U_{13} - 1) = \frac{n_1}{n_H} = U_{1H}$$

$$1 - 10 \cdot (30 - 1) = 291$$

$$1 - 2,125 \cdot (0,0334 - 1) = 3,05$$

$$3,05 \leq U_{1H} \leq 291$$

### Результат исследования

Аналогично определим передаточное отношение замкнутого дифференциального зубчатого механизма для других возможных схем механизма при сохранении дифференциала и изменении замыкающей части механизма. Далее рассмотрим две схемы.

1. Схема № 1 (рис. 2).

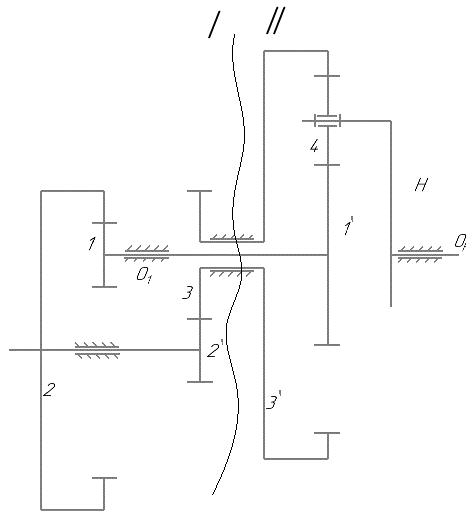


Рис. 2. Замкнутый зубчатый дифференциал (схема № 1)

Fig. 2. Closed gear differential (scheme № 1)

$$Z_2 - Z_1 = Z_2' + Z_3$$

$$Z_1 \geq 20, Z_2 \geq 85$$

$$U_{13} = U_{12} \cdot U_{2'3} = \frac{z_2}{z_1} \cdot \left( -\frac{z_3}{z_{2'}} \right) = -\frac{z_2 \cdot z_3}{z_1 \cdot z_{2'}}$$

$$U_{12} = \frac{z_2}{z_1} = 3 \div 8$$

$$Z_1 \geq 20$$

$$z_2 = z_1 \cdot U_{12} = 20 \cdot 8 = 160$$

$$U_{2'3} = \frac{z_3}{z_{2'}} = 1 \div 6$$

$$Z_2' = 20$$

$$z_3 = z_{2'} \cdot U_{2'3} = 20 \cdot 6 = 120$$

$$U_{13} = U_{12} \cdot U_{2'3} = 8 \cdot (-6) = -48$$

$$U_{31} = U_{32'} \cdot U_{21}$$

$$U_{32'} = -\frac{z_{2'}}{z_3} = -\frac{20}{120} = -0.167$$

$$U_{21} = \frac{z_1}{z_2} = \frac{20}{160} = 0.125$$

$$U_{31} = U_{32'} \cdot U_{21} = (-0.167) \cdot 0.125 = -0.0208$$

$$1 + U_{1'3'}^{(H)} \cdot (U_{13} - 1) = \frac{n_1}{n_H} = U_{1H}$$

$$1 - 10 \cdot (-48 - 1) = 491$$

$$1 - 2,125 \cdot (0,0208 - 1) = 3,16$$

$$3,16 \leq U_{1H} \leq 491$$

## 2. Схема № 2 (рис. 3).

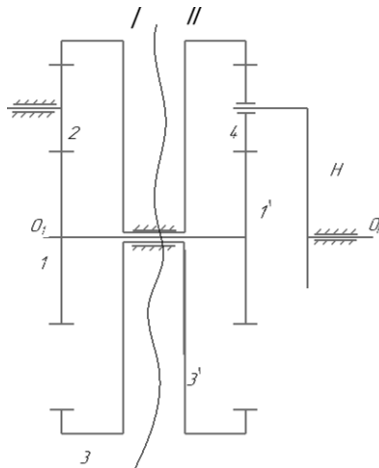


Рис. 3. Замкнутый зубчатый дифференциал (схема № 2)

Fig. 3. Closed gear differential (scheme № 2)

$$U_{13} = U_{12} \cdot U_{23} = \left( -\frac{z_2}{z_1} \right) \cdot \frac{z_3}{z_2} = -\frac{z_3}{z_1}$$

$$z_1 + z_2 = z_3 - z_2$$

$$U_{12} = -\frac{z_2}{z_1} = -6$$

$$Z_1 \geq 20$$

$$z_2 = z_1 \cdot U_{12} = 20 \cdot 6 = 120$$

$$U_{21} = -\frac{z_1}{z_2} = -\frac{20}{120} = -0,167$$

$$U_{23} = \frac{z_3}{z_2} = 8$$

$$Z_2 = 20$$

$$z_3 = z_2 \cdot U_{23} = 20 \cdot 8 = 160$$

$$U_{32} = \frac{z_2}{z_3} = -\frac{20}{160} = 0,125$$

$$U_{13} = U_{12} \cdot U_{23} = (-6) \cdot 8 = -48$$

$$U_{31} = U_{32} \cdot U_{21}$$

$$U_{31} = U_{32} \cdot U_{21} = 0,125 \cdot (-0,167) = -0,0208$$

$$1 + U_{1'3'}^{(H)} \cdot (U_{13} - 1) = \frac{n_1}{n_H} = U_{1H}$$

$$1 - 10 \cdot (-48 - 1) = 491$$

$$1 - 2,125 \cdot (0,0208 - 1) = 3,16$$

$$3,16 \leq U_{1H} \leq 491$$

**Выводы**

1. Рассмотрена методика определения кинематических возможностей (допустимые пределы изменения передаточного отношения) замкнутого зубчатого дифференциала на основе метода обращенного движения и учета основного и дополнительных условий синтеза, разработанного для планетарных механизмов.

2. Замкнутый зубчатый дифференциал, имея более простую структурную схему по сравнению со сдвоенными планетарными механизмами, позволяет получить значительно большее передаточное отношение (для сдвоенного планетарного механизма, использованного в виде базового дифференциала, максимально допустимое значение передаточного отношения составит всего  $U_{1n} = 121$ ).

3. Комбинируя схему (модульный принцип проектирования) выбранного дифференциала основной части механизма (простейший планетарный механизм) с различными схемами замыкающей части (рядовой зубчатый механизм), можно получать модификации замкнутого зубчатого дифференциала, отличающиеся по своим кинематическим возможностям. Рассмотрено три варианта механизма замкнутого зубчатого дифференциала, отличающиеся только замыкающей частью.

### Библиографический список

1. Тимофеев, Г.А. Теория машин и механизмов / Г.А. Тимофеев. – М.: Юрайт, 2013. – 351 с.
2. Фролов, К.В. Теория машин и механизмов/учебник для вузов / К.В. Фролов. – М.: Высшая школа, 2005. – 496 с.
3. Коловский, М.З. Теория механизмов и механика машин / М.З. Коловский, – М.: Академия, 2008. – 560 с.
4. Матвеев, Ю.А. Теория машин и механизмов / Ю.А. Матвеев, Л.В. Матвеева. – М.: Альфа-М, 2009. – 320 с.
5. Иванов, М. Н. Детали машин: Учебник для машиностроительных специальностей вузов / М.Н. Иванов, В.А. Финогенов. –12-е изд. испр. – М.: Высшая школа, 2008. – 408 с.
6. Ряховский, О.А. Детали машин / О.А. Ряховский, А.В. Клыпин. – М.: Дрофа, 2002. – 288 с.
7. Детали машин и основы конструирования / Под ред. М.Н. Ерохина. – М.: Колос, 2004. – 362 с.
8. Горячева, И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 477 с.
9. Андриенко, Л.А. Детали машин: Учебник для вузов / Л.А. Андриенко, Б.А. Байков, И.К. Ганулич и др. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 472 с.
10. Вереина, Л.И. Техническая механика / Л.И. Вереина. М.М. Краснов. – М.: Академия, 2013. – 352 с.
11. Прянин, Б.А. Бесступенчатые клиноременные и фрикционные передачи (вариаторы) / Б.А. Прянин, Г.А. Ревков. – М.: Машиностроение, 1980. – 360 с.
12. Миронов, К.Е. Планетарный конический вариатор // Карельский научный журнал. 2015. № 1(10). С. 183-185
13. Волков, Г.Ю. Геометрические критерии оценки долговечности фрикционных передач с самонатяжением / Г.Ю. Волков, Д.А. Курасов // Вестник КГУ. 2013. № 2. Серия технических наук. Вып. 8. С. 11-15.
14. Ряховский, О.А. Экспериментальные исследования фрикционных планетарных передач / О.А. Ряховский, А.Н. Воробьев // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. № 10. С. 1-9.
15. Сигаев, П.А. Анализ и обзор поведения поведения фрикционного взаимодействия цилиндров в зоне силового контакта // Молодой ученый. 2018. № 29 (215). С. 35-38.
16. Бекмуродова, О.А. Особенности расчета фрикционных передач / О.А. Бекмуродова, И.Р. Замалиева, О.Р. Каратаев // Национальная ассоциация ученых. 2015, № 15-1 (15) С. 73-74.
17. Khurmi, R.S. Machinal Design / R.S.Khurmi, J.K.Gupta. – ( S.I.Units)-Ram Nagar, New Delhi-110055, 2005 – 1054 p.
18. Shigley's Mechanical Engineering Desing. – The McGraw -Hill Companies, 2008. – 1054 p.
19. Акрамов, Б.Н. К проектированию конической фрикционной передачи с параллельными валами / Б.Н. Акрамов, И.А. Исмаилов, М.А. Тошев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 1. С. 60-68. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_1\_60

*Дата поступления  
в редакцию: 27.04.2023*

*Дата принятия  
к публикации: 25.07.2023*

УДК 629.3.021.21

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_90

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ПОТОКАМИ В ТРАНСМИССИИ СОЧЛЕНЕННОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

**Е.Е. Баженов**ORCID: **0000-0001-5475-1000** e-mail: **st194@yandex.ru**

Южно-Уральский государственный университет

*Челябинск, Россия*

Уральский институт ГПС МЧС России

*Екатеринбург, Россия*

Уральский государственный аграрный университет

*Екатеринбург, Россия***В.Н. Бондарь**ORCID: **0009-0007-2465-6476** e-mail: **bondarvn@susu.ru**

Южно-Уральский государственный университет

*Челябинск, Россия***В.В. Крудышев**ORCID: **0009-0003-3651-1822** e-mail: **krudishev@gmail.ru**

Уральский институт ГПС МЧС России

*Екатеринбург, Россия***Л.А. Новопашин**ORCID: **0009-0007-3347-1182** e-mail: **novopashin.leonid@yandex.ru**

Уральский государственный аграрный университет

*Екатеринбург, Россия*

Разработан алгоритм распределения силовых потоков в трансмиссии активных сочлененных транспортно-технологических машин. Адаптивный алгоритм, основанный на принципах нечеткой логики, позволяет распределять силовые потоки от источника энергии между элементами движителя машины на основе анализа параметров опорной поверхности, по которой осуществляется движение, и характеристик машины. К совокупности факторов, являющихся основными компонентами для формирования управляющего воздействия, относятся кинематические показатели работы элементов движителя и показатели свойств поверхности по сцеплению и сопротивлению. Основу работы составляют имитационные модели движения активной сочлененной транспортной системы. На основании имитационного моделирования, учитывающего стохастический подход к характеристикам грунтовых условий, получены закономерности изменения силового потока и построен алгоритм его распределения между элементами движителя по критерию максимальной свободной силы тяги. Формализована задача управления распределением силового потока на основе принципов нечеткой логики. Коммутатор управления распределением силового потока, алгоритм которого основан на формализованной задаче нечеткого управления, позволяет обеспечить качественное адаптивное управление активными сочлененными машинами, имеющими трансмиссию, отличную от механической.

**Ключевые слова:** транспортная система, активная секция, сочлененная машина, силовой поток, нечеткое управление, функция управления.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Баженов, Е.Е. Алгоритм управления силовыми потоками в трансмиссии сочлененной транспортной системы на основе нечеткой логики / Е.Е. Баженов, В.Н. Бондарь, В.В. Крудышев, Л.А. Новопашин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 90-104. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_90

## POWER FLOW CONTROL ALGORITHM BASED ON FUZZY LOGIC FOR TRANSMISSION OF AN ARTICULATED TRANSPORT SYSTEM

**E.E. Bazhenov**

ORCID: 0000-0001-5475-1000 e-mail: [st194@yandex.ru](mailto:st194@yandex.ru)

South Ural State University

*Chelyabinsk, Russia*

Ural Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia

*Yekaterinburg, Russia*

Ural Agrarian University

*Yekaterinburg, Russia*

**V.N. Bondar'**

ORCID: 0009-0007-2465-6476 e-mail: [bondarvn@susu.ru](mailto:bondarvn@susu.ru)

South Ural State University

*Chelyabinsk, Russia*

**V.V. Krudyshev**

ORCID: 0009-0003-3651-1822 e-mail: [krudishev@gmail.ru](mailto:krudishev@gmail.ru)

Ural Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia

*Yekaterinburg, Russia*

**L.A. Novopashin**

ORCID: 0009-0007-3347-1182 e-mail: [novopashin.leonid@yandex.ru](mailto:novopashin.leonid@yandex.ru)

Ural Agrarian University

*Yekaterinburg, Russia*

**Abstract.** The article presents a developed algorithm for the distribution of power flows in the transmission of active articulated transport and technological machines. The algorithm is adaptive and based on a fuzzy logic. It allows to distribute the power flows from the energy source between the elements of the machine engine based on the analysis of the parameters of the support surface on which the movement is carried out, and the characteristics of the machine. Kinematic performance indicators of the propulsion elements and indicators of surface properties for adhesion and resistance are the combination of factors that are the main components for the formation of the control action. The main results have been obtained on a simulation model of the movement of an active articulated transport system taking into account the stochastic approach to the characteristics of ground conditions. The regularities of power flow change are obtained and an algorithm for its distribution between the elements of the propulsion according to the criterion of maximum free thrust force is developed. The problem of power flow distribution control based on the fuzzy logic is formalized. The power flow distribution control switch with formalized fuzzy control algorithm allows for high-quality adaptive control of the active articulated machines with a transmission other than mechanical.

**Key words:** transport system, active section, articulated machine, power flow, fuzzy control, control function.

**FOR CITATION:** E.E. Bazhenov, V.N. Bondar', V.V. Krudyshev, L.A. Novopashin. Power flow control algorithm based on fuzzy logic for transmission of an articulated transport system. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 3. Pp. 90-104. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_90

### Введение

Обеспечение высоких эксплуатационных свойств подразумевает движение активной сочлененной транспортной системы (АСТС) по различным грунтовым поверхностям: от дорог с усовершенствованным покрытием до бездорожья. Существующие работы в этом направлении в качестве основного критерия, определяющего величину подводимой энергии к движителю или активной секции, учитывают, как правило, величину вертикальной нагрузки, действующую на элемент движителя [1-4]. В реальных условиях вертикальная нагрузка является

лишь фактором, изменяющимся в широком диапазоне, ведущим к возникновению более значимого для осуществления движения показателя. Исследования показали, что определяющим фактором являются сцепные свойства движителя с опорной поверхностью [5]. Работами отечественных ученых установлено, что значения параметров, характеризующих опорную поверхность, носят стохастический характер [6, 7]. При этом чем ниже качество опорной поверхности, тем больше значение среднего квадратического отклонения случайной величины от ее математического ожидания. Соответственно, способность АСТС перемещаться по грунту будет зависеть от мгновенных дорожных условий под каждым движителем в конкретный момент времени. Таким образом, современное транспортно-технологическое средство должно обладать свойствами, позволяющими оценивать состояние каждого элемента движителя в процессе движения и передавать на него такую величину силового потока, которая, с одной стороны, не будет превышать сцепные свойства с опорной поверхностью, а с другой стороны, будет выше суммарного сопротивления движению АСТС на конкретном элементарном участке пути.

Цель работы – разработка основанного на принципах нечеткой логики алгоритма распределения силовых потоков в трансмиссии транспортно-технологической машины. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- декомпозиция АСТС для определения структуры системы на основе универсальных объектов, позволяющая перейти к имитационному моделированию;
- выбор метода моделирования свойств опорной поверхности по сцеплению и сопротивлению;
- имитационное моделирование движения АСТС;
- создание алгоритма работы контроллера управления силовыми потоками в трансмиссии АСТС на основе принципов нечеткой логики.

### **Методология исследований**

При разработке имитационной модели движения АСТС необходимо учитывать условия движения и достаточную степень универсальности, которая заключается в возможности изменения в широком диапазоне факторов внешних условий и конструктивных параметров. Это свойство позволяет реализовать алгоритм работы системы автоматического регулирования силовых потоков по различным критериям, в том числе, по критерию максимальной силы тяги СТС. При этом оценивается величина рекуперативного нагружения в трансмиссии (независимо от ее конструктивного исполнения), рассчитывается суммарная сила тяги машины и оценивается вероятность потери (или обеспечения) проходимости в различных грунтовых условиях. На эти показатели основное влияние оказывает кинематическое рассогласование, возникающее во время движения машины между движителями одной секции и между секциями АСТС. Основными факторами, влияющими на величину кинематического рассогласования, являются грунтовые условия и криволинейное движение АСТС.

Наиболее эффективным подходом для решения поставленных задач следует считать методологию системного анализа.

### **Декомпозиция АСТС для определения структуры системы на основе универсальных объектов**

Декомпозиция системы позволяет определить пути совершенствования технической системы путем структурного или параметрического анализа. Принципиальная схема технической системы и ее связь с внешней средой показана на рис. 1. Структура АСТС строится на основании модульного принципа (рис. 2). Она включает измерительный и исполнительный комплексы, обеспечивающие необходимую информативность о дорожных условиях и пара-



метрах факторов, характеризующих взаимодействие между подсистемами и элементами модулей. Такой принцип представления структуры позволяет объединить в отдельные классы объектов элементы АСТС, выполняющие определенные функции (рис. 3):

- источник энергии совместно с согласующим устройством;
- элемент распределения силового потока;
- рабочий орган.

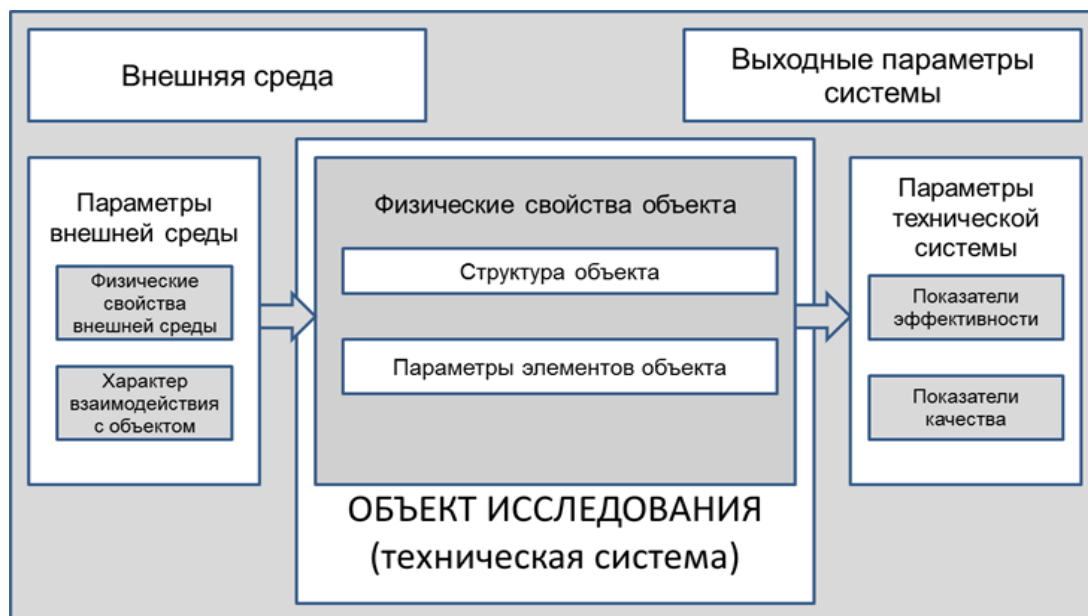


Рис. 1. Схема системы и ее связи с внешней средой

Fig. 1. Scheme of the system and its connections with the external environment

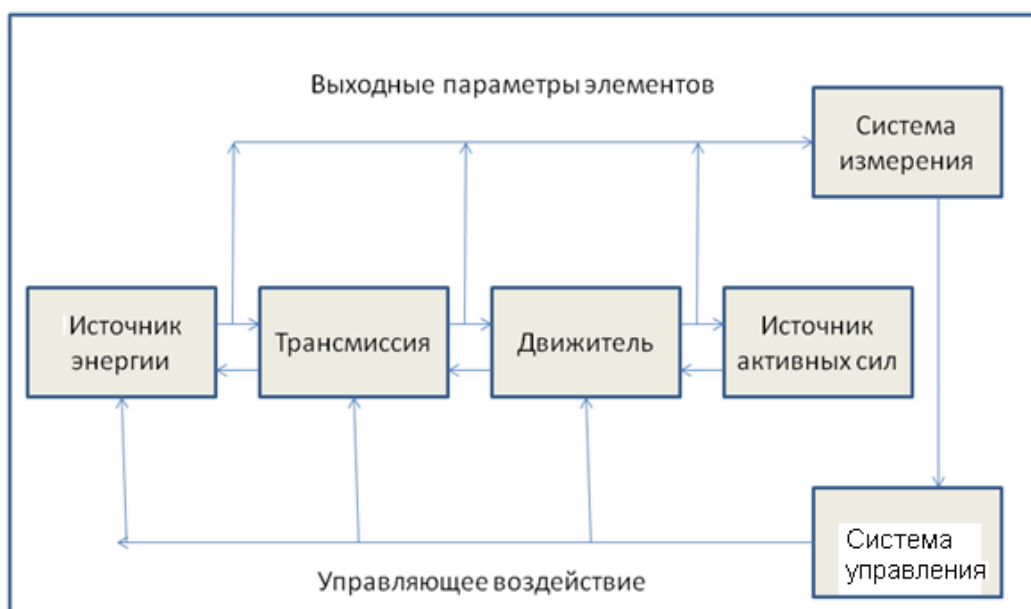
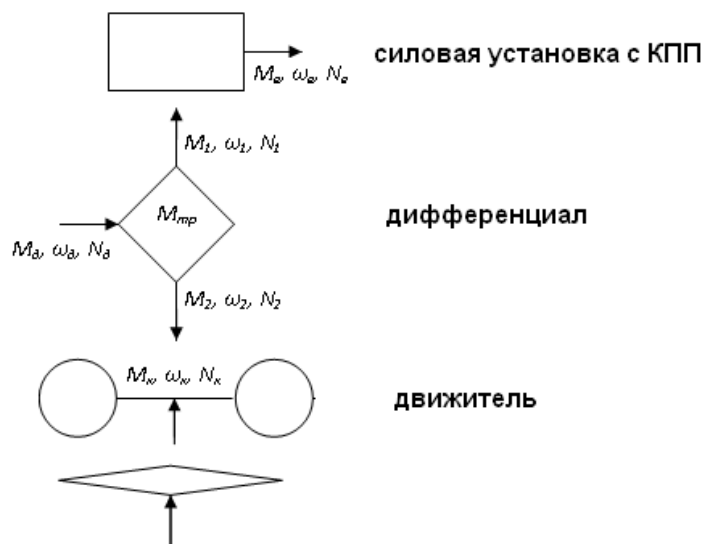


Рис. 2. Функциональная схема транспортной системы

Fig. 2. Functional diagram of the transport system



**Рис. 3. Объекты для описания процесса распределения силового потока между секциями АТС:**  
 $M, N, \omega$  – соответственно, крутящий момент, мощность и угловая скорость на входе и выходе объекта

**Fig. 3. Objects for describing the process of power flow distribution between sections of an active articulated transport system,**

where  $M, N, \omega$  – torque, power and angular velocity at the input and output of the object, respectively

Объект «источник энергии с согласующим устройством» – двигатель внутреннего сгорания и совокупность механизмов, обеспечивающих трансформацию или мультипликацию силового потока и передачу его объекту распределения. Объект «элемент распределения силового потока» – суть дифференциал. Для гидравлических и электрических трансмиссий с мотор-колесами или непосредственной связью мотора с двигателем в структуру АТС не включается. Объект «рабочий орган» – двигатель АТС.

### Моделирование свойств опорной поверхности по сцеплению и сопротивлению

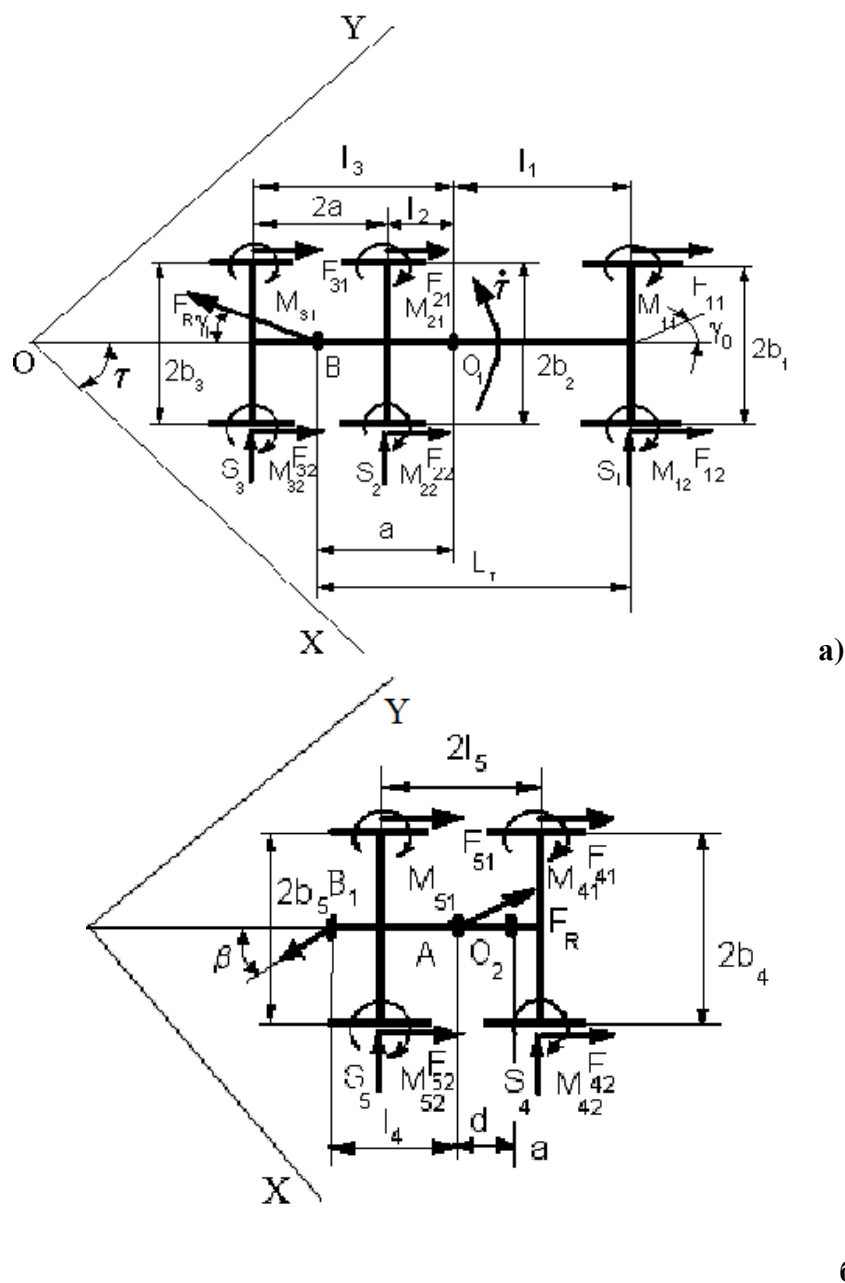
Моделирование параметров опорной поверхности проводится на основе их стохастической оценки. В [6] на основании собранного статистического материала приведены оценки среднего квадратического отклонения случайных значений коэффициентов сцепления ( $\varphi$ ) и суммарного сопротивления ( $\psi$ ) для различных видов опорной поверхности. Случайные значения этих показателей распределяются по нормальному (для  $\varphi$ ) и закону распределения Вейбулла (для  $\psi$ ). Из этого следует, что при определенных обстоятельствах не будет выполняться условие проходимости по сцеплению и сопротивлению [5]

$$P_{\psi} \leq P_{\kappa} \leq P_{\varphi}, \quad (1)$$

где  $P_{\psi}$  – суммарная сила сопротивления движению АТС;  $P_{\varphi}$  – суммарная сила сцепления колес АТС с опорной поверхностью;  $P_{\kappa}$  – сумма элементарных касательных реакций в зоне контакта ведущих колес с опорной поверхностью.

### Имитационное моделирование движения АТС

Имитационное моделирование проводится на математической модели, известной как уравнение Рауса [8]. Такой подход учитывает неголономные связи двигателя с опорной поверхностью. На рис. 4 приведена расчетная схема для первой (а) и второй (б) секций АТС.



**Рис. 4. Расчетная схема активной сочлененной транспортной системы:**  
*a – первая секция; б – вторая секция*

**Fig. 4. Calculation scheme of an active articulated transport system:**  
*a – the first section; b – the second section*

Системы дифференциальных уравнений (2а) и (2б) описывают движение АСТС. При этом взаимодействие между секциями АСТС заменены силами в узле сочленения. Узел сочленения принят с тремя степенями свободы. При решении системы уравнений в качестве ограничений приняты:

- равенство радиусов качения колес первой секции;
- равенство радиусов качения колес второй секции;
- равенство углов поворота  $ij$ -го колеса первой секции;
- равенство углов поворота  $ij$ -го колеса второй секции.

При моделировании по модели (2а) и (2б) принимаются следующие начальные условия:

- 1) двигатель внутреннего сгорания работает на установленной постоянной частоте вращения коленчатого вала;

- 2) в модели предусмотрен учет крутильных жесткостей и коэффициентов диссипации для случая механической трансмиссии;
- 3) модель содержит моменты инерции элементов трансмиссии и их массы;

$$\begin{aligned}
 & m_T \cdot \ddot{X}_B - m_T \cdot a \cdot \ddot{\tau} \cdot \sin \tau - m_T \cdot a \cdot \dot{\tau}^2 \cdot \cos \tau = \\
 & = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} F_{ij} \cos \tau - \sum_{i=1}^3 S_i \cdot \sin \tau - F_R \cdot \cos(\tau - \gamma_1); \\
 & m_T \cdot \ddot{Y}_B + m_T \cdot a \cdot \ddot{\tau} \cdot \cos \tau - m_T \cdot a \cdot \dot{\tau}^2 \cdot \sin \tau = \\
 & = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} F_{ij} \cdot \sin \tau - \\
 & - \sum_{i=1}^3 S_i \cos \tau - F_{RT} \sin(\tau - \gamma_1); \\
 & - \ddot{X}_B \cdot m_T \cdot a \cdot \sin \tau + \ddot{Y}_B \cdot m_T \cdot a \cdot \cos \tau + (ma^2 + J)\ddot{\tau} = \\
 & = \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} \left[ - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 M_{\mu ij} + S_1 \cdot L + (S_2 - S_3)c + (F_{12} - F_{11})b_1 + \right. \\
 & \left. + (F_{22} - F_{21})b_2 + (F_{32} - F_{31})b_3 \right]; \\
 & \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 J_{ij} \ddot{\psi}_{ij} + J_{\delta} \cdot c_{ij} \cdot \ddot{\psi}_{ij} = - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 M_{fij} + M_{\delta T} c_{ij} + \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} F_{ij} \cdot r_{ij}.
 \end{aligned} \tag{2a}$$

аналогичная система уравнений составляется для второй секции СТС:

$$\begin{aligned}
 & m_{II} \cdot \ddot{X}_A - m_{II} \cdot d \cdot \ddot{\alpha} \cdot \sin \alpha - m_{II} \cdot d \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \cos \alpha = \\
 & = \sum_{i=4}^5 \sum_{j=1}^2 \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} F_{ij} \cos \alpha - \sum_{i=4}^5 S_i \cdot \sin \alpha + F_{RII} \cdot \cos(\alpha + \gamma_3) - \\
 & = P_{KP} \cos(\alpha - \beta); \\
 & m_{II} \cdot \ddot{Y}_A + m_{II} \cdot d \cdot \ddot{\alpha} \cdot \cos \alpha - m_{II} \cdot d \cdot \dot{\alpha}^2 \cdot \sin \alpha = \\
 & = \sum_{i=4}^5 \sum_{j=1}^2 \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} F_{ij} \cdot \sin \alpha - \\
 & - \sum_{i=4}^5 S_i \cos \tau - F_{II} \sin(\alpha + \gamma_3) - P_{KP} \sin(\alpha - \beta); \\
 & - \ddot{X}_A \cdot m_{II} \cdot d \cdot \sin \alpha + \ddot{Y}_A \cdot m_{II} \cdot d \cdot \cos \alpha + (m_{II} \cdot d^2 + J_{II})\ddot{\alpha} = \\
 & = \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} \left[ - \sum_{i=4}^5 \sum_{j=1}^2 M_{\mu ij} + (S_5 - S_4)l_5 + (F_{41} - F_{42})b_4 - \right. \\
 & - P_{KP} \cdot l_4 \sin \alpha + \\
 & \left. + P_{KP} \cdot l_4 \cdot \cos \alpha + (F_{52} - F_{51})b_5 \right]; \\
 & \sum_{i=4}^5 \sum_{j=1}^2 J_{ij} \ddot{\psi}_{ij} + J_{\delta n} \cdot c_{ij} \cdot \ddot{\psi}_{ij} = - \sum_{i=4}^5 \sum_{j=1}^2 M_{fij} + M_{\delta n} c_{ij} + \text{Sgn} \dot{\psi}_{ij} F_{ij} \cdot r_{ij}.
 \end{aligned} \tag{26}$$

- 4) объект «элемент распределения силового потока» содержит универсальный модуль, позволяющий регулировать внутреннее трение в передаче (внутреннее трение является одним из варьируемых факторов в процессе имитационного моделирования, это дает возможность моделировать движение с различными типами связей трансмиссии с рабочим органом (дифференциальная, блокированная, адаптивная));
- 5) характеристики опорной поверхности задаются значениями коэффициентов  $\varphi$  и  $\psi$  под каждым элементом движителя АСТС;
- 6) учитываются условия (1);
- 7) кинематическое рассогласование между секциями АСТС задается в виде коэффициента  $\xi$  [4, 5]:

$$\xi = \left(1 - \frac{V_2}{V_1}\right) \cdot 100\% ,$$

где  $V_1$  – окружная скорость первого выходного элемента модуля, м/с;  $V_2$  – окружная скорость второго выходного элемента модуля, м/с.

- 8) из отдельных модулей составляется схема АСТС; например, для двухсекционной восьмиколесной полноприводной СТС (рис. 5):

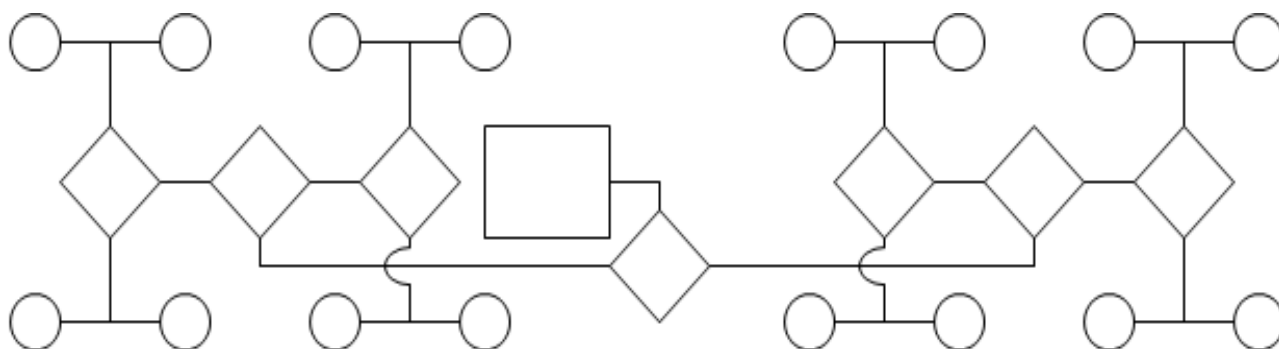


Рис. 5. Структура колесной машины 8x8

Fig. 5. 8x8 wheeled vehicle structure

- 9) задаются варьируемые внешние факторы;
- 10) критерий оценки влияния варьируемых факторов и эффективности применения алгоритма распределения силовых потоков – свободная сила тяги АСТС.

Имитационное моделирование дает возможность оценить влияние основных варьируемых параметров машины для создания алгоритма распределения потоков в трансмиссии машины и их влияние на тягово-скоростные свойства АСТС. На рис. 6 показан алгоритм решения имитационной модели, а на рис. 7-9 – результаты имитационного моделирования для автомобиля 8x8 КамАЗ-Арктика.

В современных транспортных системах часто используются трансмиссии с гидравлическим и электрическим методами передачи силового потока от источника энергии к рабочему органу. Такие трансмиссии позволяют использовать более широкие возможности для управления силовыми потоками и распределять их между элементами движителя таким образом, чтобы обеспечить максимальные тяговые возможности машины. В этом случае автоматическое управление будет заключаться в адаптации крутящего момента, подводимого к элементам движителя, к внешним условиям, оказывающим воздействие на ведущий орган и существующему кинематическому рассогласованию. Это можно реализовать, например, электрогидравлическим усилителем для гидравлической трансмиссии или усилителем для подвода электроэнергии к электромотор-колесу.

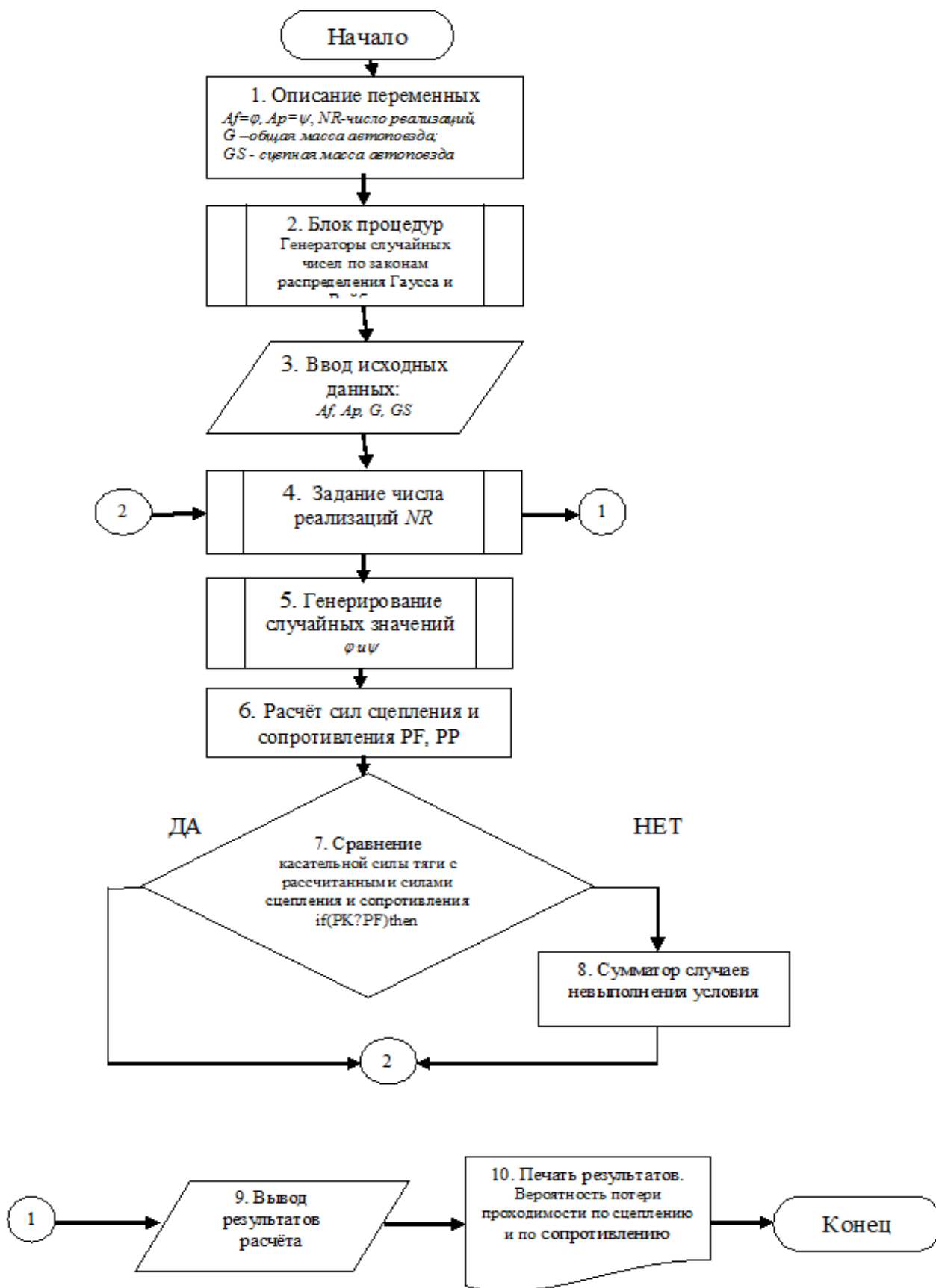


Рис. 6. Алгоритм оценки возможности АСТС перемещаться по местности

Fig. 6. Algorithm for assessing the ability of an active articulated transport system to move around the terrain

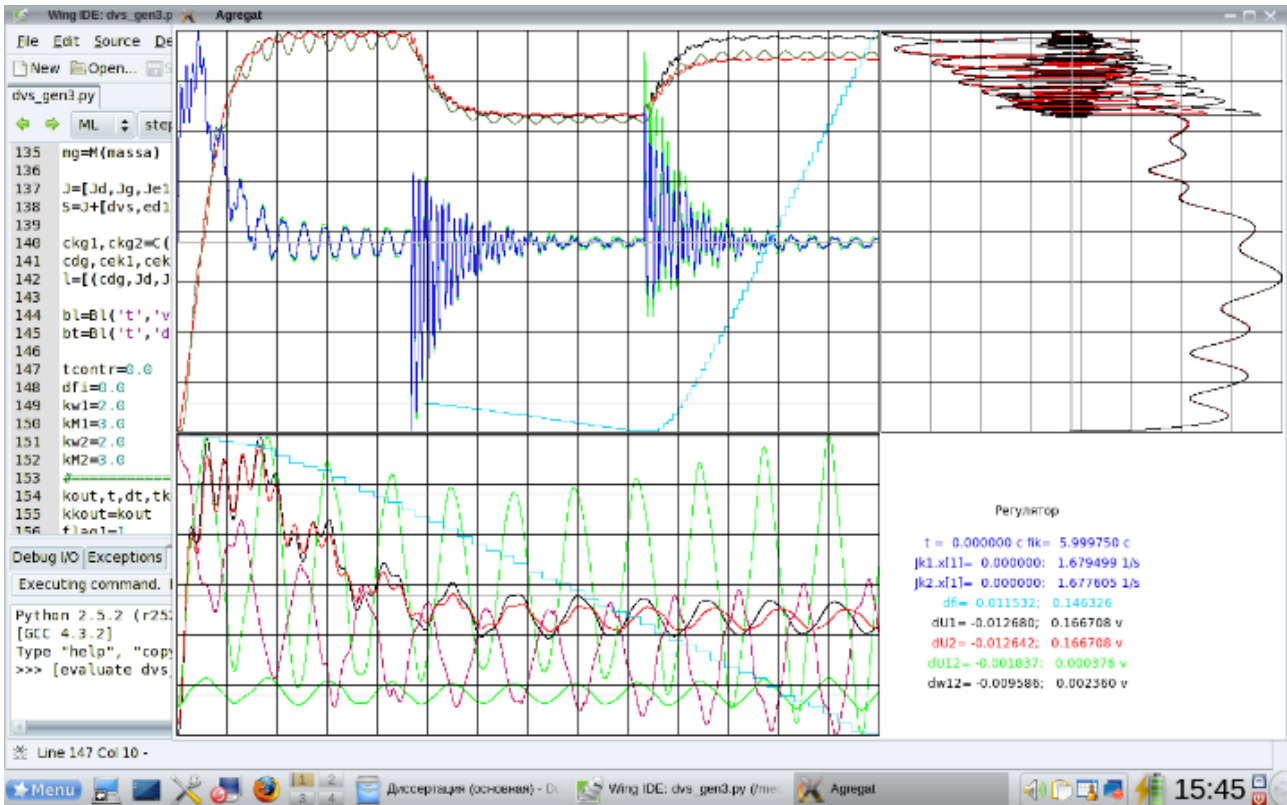


Рис. 7. Скриншот результатов моделирования движения

Fig. 7. Screenshot of motion simulation results

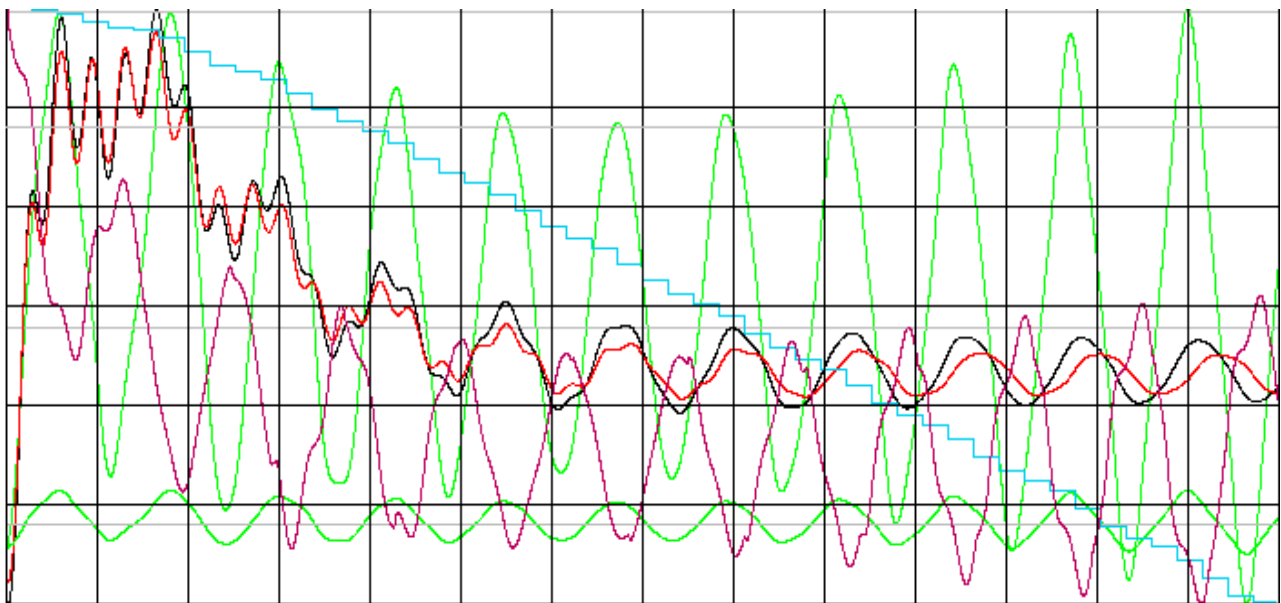
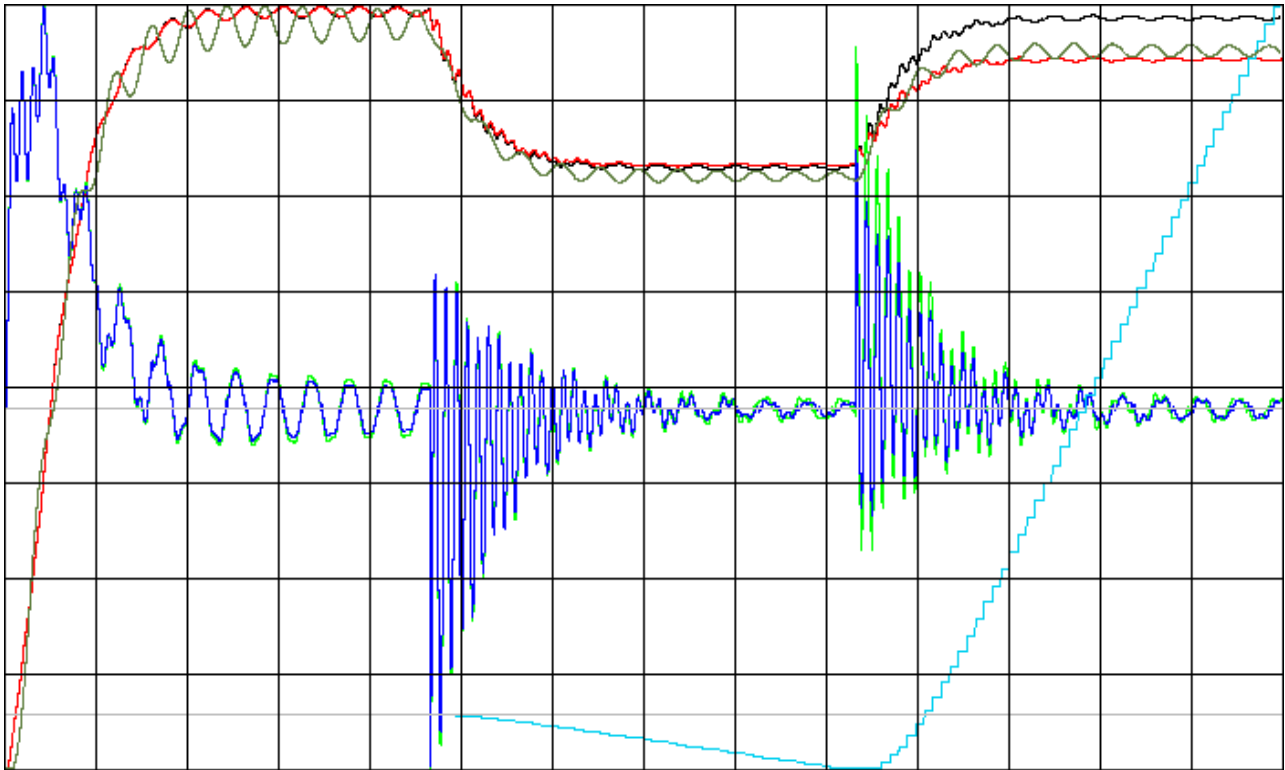


Рис. 8. Характер изменение линейных скоростей и углов поворота ведущих колес при моделировании

Fig. 8. The nature of the change in linear speeds and angles of rotation of the driving wheels in the simulation



**Рис. 9. Линейные скорости ведущих колес первой и второй секций (красный и темно-зеленый цвет); ведущие моменты на колесах (светло-зеленый и голубой); разность закрутки колес за счет тангенциальной эластичности (голубой)**

**Fig. 9. Linear speeds of the driving wheels of the first and second sections (red and dark green); driving moments on wheels (light green and blue); wheel spin difference due to tangential elasticity (blue)**

### **Создание алгоритма работы контроллера управления силовыми потоками в трансмиссии АСТС на основе принципов нечеткой логики**

Алгоритм работы контроллера управления распределением силовых потоков включает два этапа:

- контроль величины кинематического рассогласования между элементами АСТС, двигателя с каждого борта на каждой ведущей оси;
- обеспечение стабильной, без пробуксовки и юза, частоты вращения элементов двигателя в соответствии с возникшим кинематическим рассогласованием  $\xi$ .

Рассмотрим влияние кинематического рассогласования на выходной параметр управления исполнительного механизма, введя лингвистические переменные и заменив ими числовые значения факторов. Результаты анализа сведены в табл. 1, где приняты следующие обозначения значений параметров:

- низкое значение параметра обозначается символом  $\vee$ ;
- высокое значение параметра  $\wedge$ ;
- отрицательное значение параметра  $-$ ;
- положительное значение  $+$ ;
- любое значение  $a$ ;
- нулевое значение параметра  $0$ .



Таблица 1.  
Зависимость функции управления от входных параметров

Table 1.  
Dependence of the control function on the input parameters

№	Кинематическое рассогласование, $\Delta u$	Скорость изменения кинематического рассогласования, $V$	Величина тока управления, $i$
1	V+	V+	V-
2	V-	V+	V+
3	Λ+	Λ+	Λ-
4	V+	Λ-	0
5	V-	Λ-	0
6	Λ+	0	Λ-
7	Λ-	0	0
8	0	$a$	0

Формализовать корпус правил можно, вводя различные варианты лингвистических переменных и увеличивая количество варьируемых факторов. Обозначим предложенные в табл. 1 лингвистические переменные следующим образом: высокое – В, низкое – L, среднее – М, положительное – Р, отрицательное – N, нулевое – Z. Введем для предложенных лингвистических переменных терм-множества (множество всех возможных значений лингвистической переменной) [10, 11]:

- «кинематическое рассогласование,  $\Delta u$ » = { $\Delta u_{BN}$ ,  $\Delta u_{MN}$ ,  $\Delta u_Z$ ,  $\Delta u_{MP}$ ,  $\Delta u_{BP}$ };
- «скорость изменения кинематического рассогласования,  $V$ » = { $VMN$ ,  $VMN$ ,  $VZ$ ,  $VMP$ ,  $BP$ };
- «ток управления,  $i$ » = { $i_{BN}$ ,  $i_{MN}$ ,  $i_Z$ ,  $i_{MP}$ ,  $i_{BP}$ }.

Для удобства представления данных введем нормализованные обозначения для лингвистической переменной, описывающей отклик изменения варьируемых факторов (т.е. «ток управления,  $i$ »), и сгруппируем их в табл. 2.

Таблица 2.  
Нормализованные значения лингвистических переменных

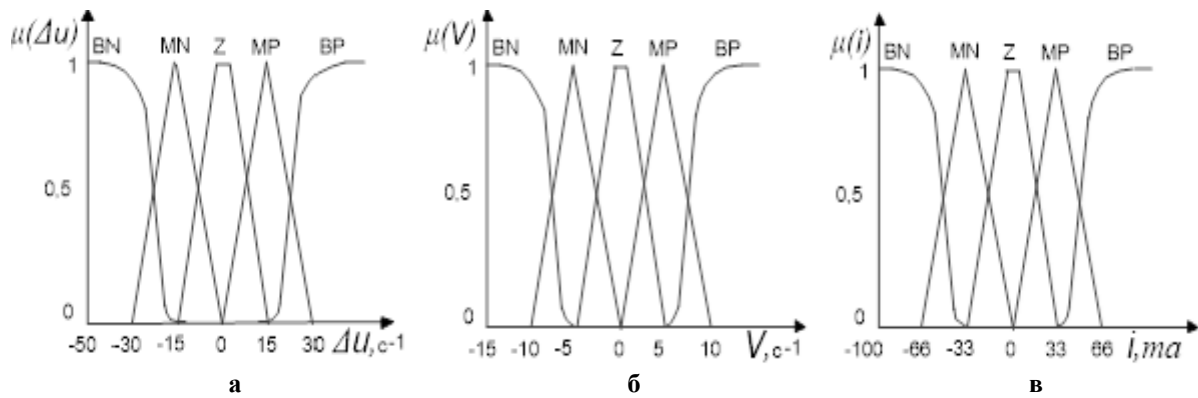
Table 2.  
Normalized values of linguistic variables

№		BN	MN	Z	MP	BP
1	$i$	$-2i$	$-Ii$	$0i$	$Ii$	$2i$
2	$V$	$-2V$	$-IV$	$0V$	$IV$	$2V$
3	$u$	$-2u$	$-Iu$	$0u$	$Iu$	$2u$

Пример терм-множества лингвистической переменной представлен на рис. 10. Корпус правил системы нечеткого вывода формируется на основе метода, изложенного в [2, 4], представлен в табл. 3. Задача управления выполнена в *MatLab Fuzzy Logic Toolbox* [13] в среде *FIS Editor* (рис. 11). Последовательность реализации алгоритма следующая:

- определение нечеткости (фазификация) (рис. 11 а – 11 в);
- формирование нечеткого корпуса правил (рис. 11 г);
- нечеткий вывод (рис. 11 д);
- реализация четкости (дефазификация) (рис. 11 д).

Функция автоматического нечеткого управления системой представлена на рис. 11 е.



**Рис. 10. Пример нечеткой функции принадлежности факторов:**

*а – кинематическое рассогласование; б – скорость изменения кинематического рассогласования; в – ток управления*

**Fig. 10. An example of a fuzzy membership function of factors:**

*a – kinematic mismatch; b – rate of change of kinematic mismatch; c – control current*

**Таблица 3.  
Матрица корпуса правил**

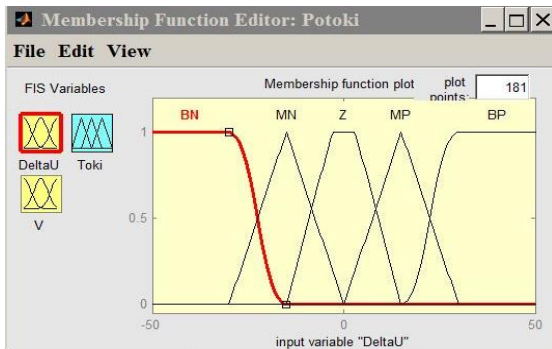
**Table 3.  
Fuzzy associative matrix**

Скорость изменения кинематического рассогласования, $V$	«ток управления, $i$ » как функция от «кинематическое рассогласование, $\Delta u$ »				
	$-2u$	$-1u$	$0u$	$1u$	$2u$
$-2V$	$0i$	$0i$	$0i$	$0i$	$0i$
$-1V$	$1i$	$0i$	$0i$	$0i$	$-1i$
$0V$	$2i$	$1i$	$0i$	$-1i$	$-2i$
$1V$	$2i$	$2i$	$0i$	$-2i$	$-2i$
$2V$	$2i$	$2i$	$0i$	$-2i$	$-2i$

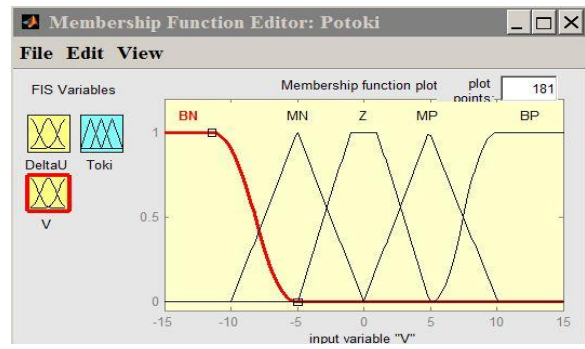
### Выводы

1. Разработан адаптивный алгоритм распределения силовых потоков в трансмиссии активных сочлененных транспортно-технологических машин, основанный на принципах и методах нечеткой логики. К совокупности факторов, являющихся основными критериями для формирования управляющего воздействия, относятся кинематические показатели работы элементов движителя и показатели свойств поверхности по сцеплению и сопротивлению.
2. Алгоритм получен на основании имитационного моделирования движения активной сочлененной транспортно-технологической машины. Математическая модель учитывает кинематическое рассогласование в приводе элементов движителя и скорость изменения кинематического рассогласования. Характеристика опорной поверхности носит стохастический характер. Критерием эффективности выбрана свободная сила тяги машины.
3. Коммутатор управления распределением силового потока, алгоритм которого основан на формализованной задаче нечеткого управления, позволяет обеспечить качественное адаптивное управление активных сочлененных машин, имеющих трансмиссию, отличную от механической.

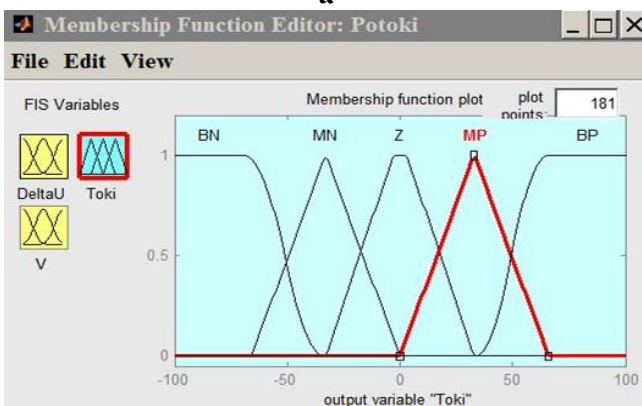
4. Модели, полученные в результате корректной постановки задачи, продемонстрировали свою адекватность; нечеткие выводы сделаны на основании известных общепринятых методик.



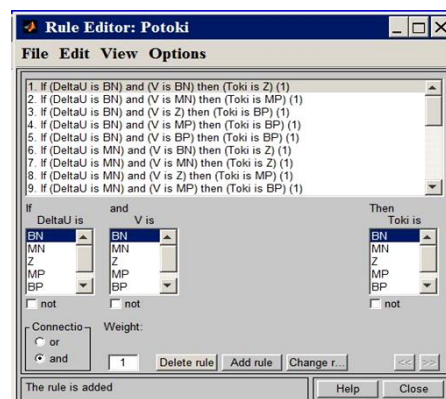
а



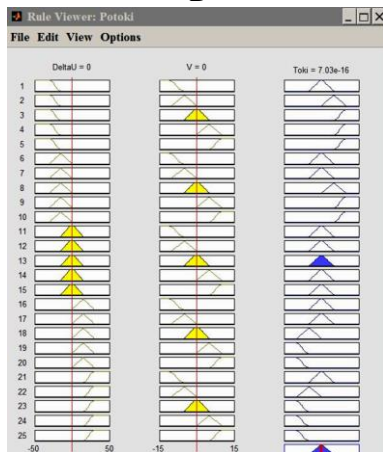
б



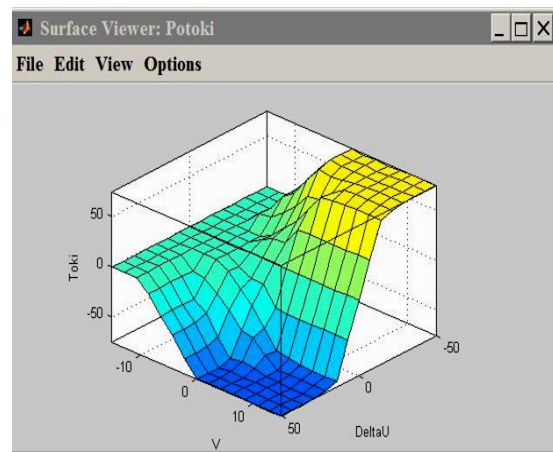
в



г



д



е

Рис. 11. Нечеткий вывод, полученный в среде [14]

а, б – фазификация входных факторов; в – фазификация функции отклика; г – корпус правил нечеткого вывода; д, е – процедура вывода и функция нечеткого управления

Fig. 11. Fuzzy output obtained in Simulink model [14]:

а, b – membership functions of input factors; c – membership function of the response function; d – fuzzy inference rules; e, f – inference procedure and fuzzy control function

**Библиографический список**

1. **Пирковский, Ю.В.** Теория движения полноприводного автомобиля. Прикладные вопросы оптимизации конструкции шасси / Ю.В. Пирковский, С.Б. Шухман. – М.: Юнити, 2001. – 230 с.
2. **Жилейкин, М.М.** Алгоритм работы системы динамической стабилизации за счет управления дифференциалами механической трансмиссии и корректирующего подруливания для трактора / М.М. Жилейкин, Е.В. Ягубова, А.Г. Стрелков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 12 (657). С 45-52.
3. **Антонян, А.В.** Алгоритм распределения крутящего момента в автомобиле с колесной формулой 4x4 для обеспечения устойчивости движения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 9 (690). С 31-37.
4. **Вольская, Н.С.** Алгоритм работы системы управления тяговыми электродвигателями при криволинейном движении многоосных колесных машин по неровностям деформируемого опорного основания / Н.С. Вольская, М.М. Жилейкин, А.Ю. Захаров // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 3 (696). С 33-40.
5. **Прядкин, В.И.** Анализ подходов по исследованию явления циркуляции мощности в трансмиссии полноприводного автомобиля / В.И. Прядкин, В.В. Гудков, П.А. Сокол // Лесотехнический журнал. 2019. № 3. С 205-224.
6. **Баженов, Е.Е.** Сочлененные транспортные системы: теоретические основы / Е.Е. Баженов. – Lambert Academic Publishing, 2012. – 276 с.
7. **Платонов, В.Ф.** Полноприводные автомобили / П.Ф. Платонов. – М.: Машиностроение, 1989. – 308 с.
8. **Платонов, В.Ф.** Многоцелевые гусеничные шасси / В.Ф. Платонов, В.С. Кожевников. – М.: Машиностроение, 1998. – 342 с.
9. **Неймарк, Ю.И.** Динамика неголономных систем / Ю.И. Неймарк, Н.А. Фуфаев. – М.: Наука, 1967. – 520 с.
10. **Баженов, Е.Е.** Управление силовыми потоками в трансмиссии автомобиля на нечеткой логике / Е.Е. Баженов, В.В. Побединский, А.В. Берстенов // Леса России и хозяйство в них. 2014. № 4 (51). С 42-48.
11. **Пегат, А.** Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – М.: БИНОМ, 2009. – 798 с.
12. **Леоненков, А.В.** Нечеткое моделирование в среде MatLab и fussyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
13. **Васильев, В.И.** Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: учебное пособие / В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов. – М.: Радиотехника, 2009. – 393 с.
14. MATLAB® & Simulink® Release Notes for R2008a [Электронный ресурс] // Режим доступа: [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com) (Дата обращения 15.05.2023).

*Дата поступления  
в редакцию: 14.06.2023*

*Дата принятия  
к публикации: 25.07.2023*

УДК 629.113

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_105

## ОЦЕНКА РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЯ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДРЕССОРИВАНИЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННОГО ТРАКТОРА

**С.А. Коростелев**

ORCID: 0009-0003-1382-5589 e-mail: korsan73@mail.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
Барнаул, Россия**Д.В. Талалаев**

ORCID: 0009-0003-3004-1073 e-mail: danil-talalaev@mail.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
Барнаул, Россия**А.В. Лишин**

ORCID: 0009-0009-2048-3701 e-mail: shinli@rambler.ru

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
Барнаул, Россия

Представлены результаты определения перемещений опор системы поддрессоривания силовой установки колесного трактора при выполнении технологических операций при движении по стерне колосовых. Моделирование движения колесного трактора с шарнирно-сочлененной рамой выполнено в среде программного комплекса *Universal Mechanism*. Трактор представлен как многомассовая система с упругими, вязкоупругими и кинематическими связями. Моделирование движения осуществлено для различных скоростей движения и тяговых нагрузок. Определены перемещения, скорости и ускорения силовой установки относительно рамы машины, необходимые для оценки режимов нагружения упругих элементов. На основе анализа полученных данных установлено, что наиболее нагруженной является передняя правая опора силовой установки. При работе трактора со скоростью 13,02 км/ч с крюковой нагрузкой 17,76 кН максимальное перемещение этой опоры составило 3,38 мм. Максимальная относительная деформация упругого элемента при динамическом нагружении не превышает 11,7 %. Статическая деформация для всех опор составила не более 8,2 %. Полученные режимы нагружения позволяют определить напряженно-деформированное состояние упругих элементов и оценить их усталостную прочность.

**Ключевые слова:** трелевочный трактор, колесный трактор, моделирование движения, математическая модель, силовая установка, упругие элементы, амплитуда, колебания, динамические нагрузки, вибрация.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Коростелев, С.А. Оценка режимов нагружения упругих элементов поддрессоривания силовой установки лесохозяйственного трактора / С.А. Коростелев, Д.В. Талалаев, А.В. Лишин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 105-115. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_105

## ANALYSIS OF STRAIN MODES OF THE ELASTIC ELEMENTS OF THE FORESTRY TRACTOR POWER UNIT SUSPENSION SYSTEM

**S.A. Korostelev**

ORCID: 0009-0003-1382-5589 e-mail: korsan73@mail.ru

Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov  
Barnaul, Russia**D.V. Talalaev**

ORCID: 0009-0003-3004-1073 e-mail: danil-talalaev@mail.ru

Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov  
Barnaul, Russia

**A.V. Lishin**

ORCID: **0009-0009-2048-3701** e-mail: **shinli@rambler.ru**

Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov

*Barnaul, Russia*

**Abstract.** The article presents the results of calculating the displacement of the supports of the wheeled tractor power unit suspension system when the tractor is moving on the stubble of grain crops and performing technological operations. Simulation of the movement of the wheeled articulated tractor is performed in the Universal Mechanism software. The tractor is modeled as a multi-mass system with elastic, viscoelastic and kinematic connections. The simulation has been performed at various tractor speeds and various traction loads. Displacements, speeds and accelerations of the power unit relative to the machine frame, necessary to assess the loading of elastic elements, have been determined. Data analysis allows to determine that the right front support of the power unit is the most loaded. The maximum movement of this support was 3,38 mm when the tractor was moving at the speed of 13.02 km/h and the traction load of 17,76 KN. The maximum deformation of the elastic element does not exceed 11,7 % for dynamic loading. The static deformation of all supports does not exceed 8,2 %. The obtained loading modes make it possible to determine the stress-strain state of elastic elements and analyze their fatigue strength.

**Key words:** skidder, wheeled tractor, movement simulation, mathematical model, power unit, elastic elements, amplitude, oscillation, dynamic loads, vibrations.

**FOR CITATION:** S.A. Korostev, D.V. Talalaev, A.V. Lishin. Analysis of strain modes of the elastic elements of the forestry tractor power unit suspension system. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 3. Pp. 105-115.

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_105

## Введение

При выполнении работ в лесном и сельском хозяйствах применяются колесные тракторы с шарнирно-сочлененной рамой отечественного и иностранного производства. При взаимодействии с технологическим оборудованием и поверхностью пути на трактор действуют динамические нагрузки, носящие периодический характер и имеющие различную частоту и амплитуду. Воздействие этих нагрузок на узлы и агрегаты трактора приводят к нарушению их функционирования и к усталостному разрушению. Как правило, колесные тракторы для лесного хозяйства не имеют системы поддрессоривания, и ведущие мосты жестко соединяются с рамой, поэтому снижение динамических нагрузок, вызванных неровностями поверхности пути, осуществляется лишь за счет упругих характеристик шин. Помимо динамических нагрузок, вызванных работой технологического оборудования, и взаимодействием трактора с поверхностью пути, на его остов действуют силы и моменты, вызванные неравномерностью работы силовой установки [1], что также является источником динамических нагрузок и вибрации. Для снижения динамических нагрузок от силовой установки и защиты от вибраций остова трактора применяют элементы поддрессоривания, которые для силовой установки обычно представляют собой резиновые и резинометаллические элементы [2]. Во время движения трактора силовая установка совершает перемещения относительно рамы, что вызвано действующими в трансмиссии колебаниями как самого остова, так и нагрузок. Долговечность резиновых упругих элементов системы поддрессоривания силовой установки зависит от величины деформаций, вызванных колебаниями силового агрегата относительно рамы трактора. В настоящей работе определяются величины вертикальных перемещений опор силовой установки относительно рамы трактора при движении по стерне колосовых при выполнении различных технологических операций.

## Составление математической модели

Для решения задачи разработана математическая модель движения колесного трактора с шарнирно-сочлененной рамой. Трактор рассматривается как многомассовая система твердых тел, которые соединены с помощью упругих, вязкоупругих и кинематических связей. Система твердых тел условно разделена на две подсистемы, находящиеся во взаимодействии.

Первая подсистема (рис. 1) содержит описание характеристик элементов трансмиссии и связей, необходимых для моделирования движения элементов трансмиссии, позволяет определить крутильные колебания в трансмиссии трактора и учесть их влияние на колебания силовой установки.

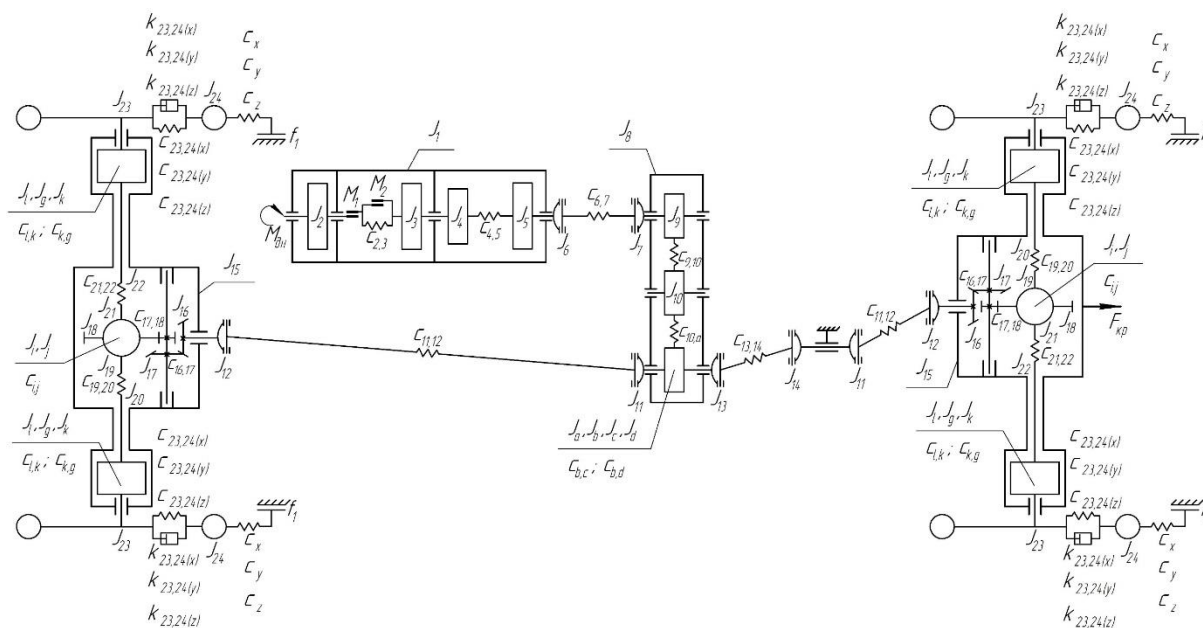


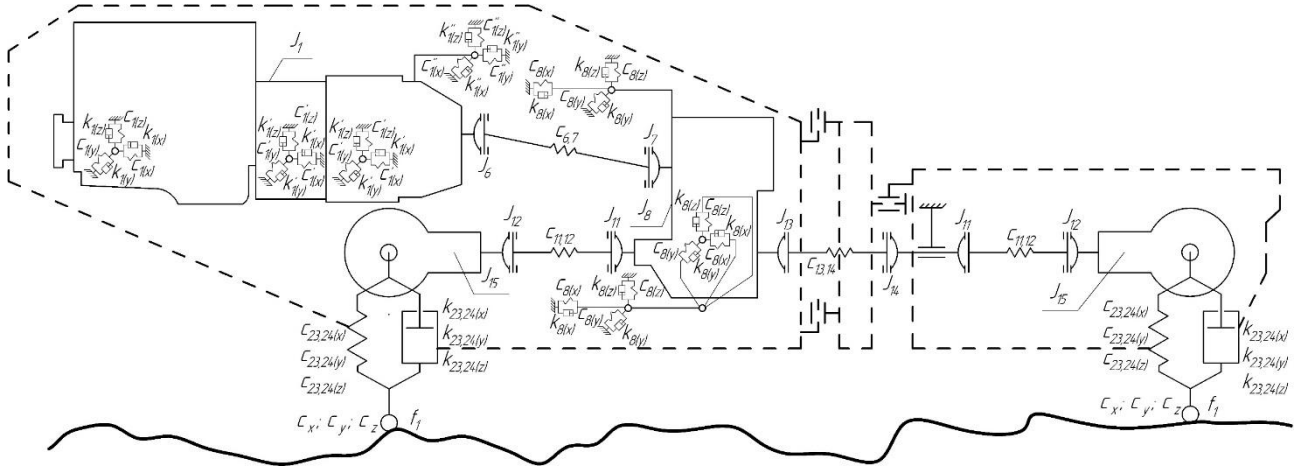
Рис. 1. Подсистема для определения крутильных колебаний в трансмиссии

$J_1$  – приведенная масса и момент инерции корпуса силовой установки;  $J_2$  – ... движущихся масс двигателя к коленчатому валу;  $J_3$  – ... сцепления;  $J_4, J_5$  – ... к входному и выходному валу коробки передач, соответственно;  $J_6, J_{11}, J_{13}$  – ... ведущего карданного вала;  $J_7, J_{12}, J_{14}$  – ... ведомого карданного вала;  $J_8$  – ... корпуса раздаточной коробки (РК);  $J_9$  – ... первичного вала и шестерен РК;  $J_{10}$  – ... промежуточного вала и шестерен РК;  $J_a$  – ... водило;  $J_b$  – ... сателлита;  $J_c$  – ... эпицикла;  $J_d$  – ... солнечной шестерни;  $J_{15}$  – ... корпуса ведущего моста;  $J_{16}, J_{17}$  – ... шестерен и валов главной передачи;  $J_{18}$  – ... корпуса дифференциала;  $J_i$  – ... сателлитов;  $J_j$  – ... шестерен полуосей;  $J_{19}, J_{20}, J_{21}, J_{22}$  – ... полуосей;  $J_l$  – ... солнечной шестерни колесного редуктора (КР);  $J_k$  – ... сателлита;  $J_g$  – эпицикла КР;  $J_{23}$  – ... колесного диска;  $J_{24}$  – ... шины;  $c_{2,3}$  – жёсткость пружин сцепления;  $c_{4,5}$  – приведенная жесткость передач КП;  $c_{9,10}, c_{10,a}, c_{b,c}, c_{b,d}, c_{16,17}, c_{17,18}, c_{i,j}, c_{l,k}, c_{k,g}$  – приведенная жесткость в зацеплении зубчатой передачи;  $c_{6,7}, c_{11,12}, c_{13,14}$  – приведенная угловая жесткость карданного вала;  $c_{19,20}, c_{21,22}$  – приведенная угловая жесткость полуоси;  $c_{23,24(x)}, c_{23,24(y)}, c_{23,24(z)}$  – приведенная жесткость шины по трем ортогональным векторам;  $c_x, c_y, c_z$  – жесткость в контакте шины с дорогой по трем ортогональным векторам;  $k_{23,24(x)}, k_{23,24(y)}, k_{23,24(z)}$  – коэффициент диссипации шины по трем ортогональным векторам;  $f_1$  – коэффициент трения качения;  $M_{дн}$  – номинальный момент, прикладываемый к коленчатому валу двигателя;  $M_1$  – момент трения, развиваемый сцеплением;  $M_2$  – момент трения, фрикционного элемента сцепления;  $F_{кр}$  – крюковая нагрузка

Fig. 1. Subsystem for determining torsional vibrations in the transmission

$J_1$  – mass and mass moment of inertia of the body power unit;  $J_2$  – ... rotation engine components;  $J_3$  – ... clutch;  $J_4, J_5$  – ... input and output shaft of the gearbox;  $J_6, J_{11}, J_{13}$  – ... drive cardan shaft;  $J_7, J_{12}, J_{14}$  – ... driven cardan shaft;  $J_8$  – ... body transfer gearbox (TG);  $J_9$  – ... of the input shaft and gears of the TG;  $J_{10}$  – intermediate shaft and gears of the TG;  $J_a$  – ... planet carrier;  $J_b$  – ... planet gear;  $J_c$  – ... ring gear;  $J_d$  – ... sun gear;  $J_{15}$  – ... axle body;  $J_{16}, J_{17}$  – shafts and gears of the main gear;  $J_{18}$  – ... differential body;  $J_i$  – ... planet gear;  $J_j$  – ... axle gear;  $J_{19}, J_{20}, J_{21}, J_{22}$  – ... axle shaft;  $J_l$  – ... sun gear of the wheel gearbox (WG);  $J_k$  – ... planet gear;  $J_g$  – ... ring gear of the WG;  $J_{23}$  – ... wheel rim;  $J_{24}$  – ... tire;  $c_{2,3}$  – clutch spring stiffness;  $c_{4,5}$  – stiffness between gearbox gears;  $c_{9,10}, c_{10,a}, c_{b,c}, c_{b,d}, c_{16,17}, c_{17,18}, c_{i,j}, c_{l,k}, c_{k,g}$  – gear stiffness;  $c_{6,7}, c_{11,12}, c_{13,14}$  – angular stiffness of the driveshaft;  $c_{19,20}, c_{21,22}$  – angular stiffness of the axle shaft;  $c_{23,24(x)}, c_{23,24(y)}, c_{23,24(z)}$  – tire stiffness along three orthogonal vectors;  $c_x, c_y, c_z$  – stiffness of the tire in contact with the road along three orthogonal vectors;  $k_{23,24(x)}, k_{23,24(y)}, k_{23,24(z)}$  – tire dissipation factor by three orthogonal vectors;  $f_1$  – coefficient of rolling friction;  $M_{дн}$  – maximum torque available from the front of the crankshaft;  $M_1$  – clutch friction torque;  $M_2$  – friction torque of the clutch friction element;  $F_{кр}$  – traction load

Вторая подсистема содержит описание характеристик элементов остова трактора, элементов трансмиссии и связей, необходимых для определения перемещений, скоростей и ускорений подрессоренных элементов трансмиссии (рис. 2). Характеристики жесткости и демпфирования силовых резиновых элементов подрессоривания силовой установки и раздаточной коробки определены по методикам, изложенным в работах [2-7].



**Рис. 2. Подсистема для определения колебаний подрессоренных элементов трансмиссии**

$c_{1(x)}, c_{1(y)}, c_{1(z)}, c'_{1(x)}, c'_{1(y)}, c'_{1(z)}, c''_{1(x)}, c''_{1(y)}, c''_{1(z)}$  – жесткости упругих элементов опор СУ;  
 $c_{8(x)}, c_{8(y)}, c_{8(z)}$  – жесткости упругих элементов опор РК;  
 $k_{1(x)}, k_{1(y)}, k_{1(z)}, k'_{1(x)}, k'_{1(y)}, k'_{1(z)}, k''_{1(x)}, k''_{1(y)}, k''_{1(z)}$  – коэффициент диссипации упругих элементов опор СУ;  
 $k_{8(x)}, k_{8(y)}, k_{8(z)}$  – коэффициент диссипации упругих элементов опор РК

**Fig. 2. Subsystem for determining vibrations of transmission elements**

$c_{1(x)}, c_{1(y)}, c_{1(z)}, c'_{1(x)}, c'_{1(y)}, c'_{1(z)}, c''_{1(x)}, c''_{1(y)}, c''_{1(z)}$  – stiffness of the elastic elements of the power unit supports;  
 $c_{8(x)}, c_{8(y)}, c_{8(z)}$  – stiffness of the elastic elements of the TG;  
 $k_{1(x)}, k_{1(y)}, k_{1(z)}, k'_{1(x)}, k'_{1(y)}, k'_{1(z)}, k''_{1(x)}, k''_{1(y)}, k''_{1(z)}$  – coefficient of energy dissipation of elastic elements of the power unit supports;  $k_{8(x)}, k_{8(y)}, k_{8(z)}$  – coefficient of energy dissipation of elastic elements of the TG

В рассматриваемой конструкции трактора силовая установка соединена с рамой с помощью семи упругих опор (рис. 3). Две опоры расположены спереди силовой установки – правая «А» и левая «В» по ходу движения. В центральной части силовая установка опирается на раму через четыре упругих элемента, имеющих одинаковую конструкцию и, соответственно, одинаковые характеристики жесткости и демпфирования. На рис. 3 эти опоры обозначены с левой стороны по ходу движения первая «D» и вторая «F», с правой стороны «С» и «Е». Одна опора расположена в продольной плоскости симметрии машины «G». Соединение силовой установки с рамой посредством вязкоупругих силовых элементов, описывается выражением:

$$\begin{Bmatrix} F \\ M \end{Bmatrix} = -[C] \begin{Bmatrix} \Delta r \\ \Delta \varphi \end{Bmatrix} - [K] \begin{Bmatrix} v \\ \omega \end{Bmatrix}, \tag{1}$$

где  $F, M$  – силы и моменты, возникающие при смещении корпуса силовой установки от исходного состояния, соответствующего недеформированному состоянию упругих элементов системы подрессоривания;  $C, K$  – матрицы жесткости и демпфирования упругих элементов;  $\Delta r, \Delta \varphi$  – смещение и угол поворота силовой установки относительно опоры;  $v, \omega$  – линейная и угловая скорость, относительно точки закрепления.



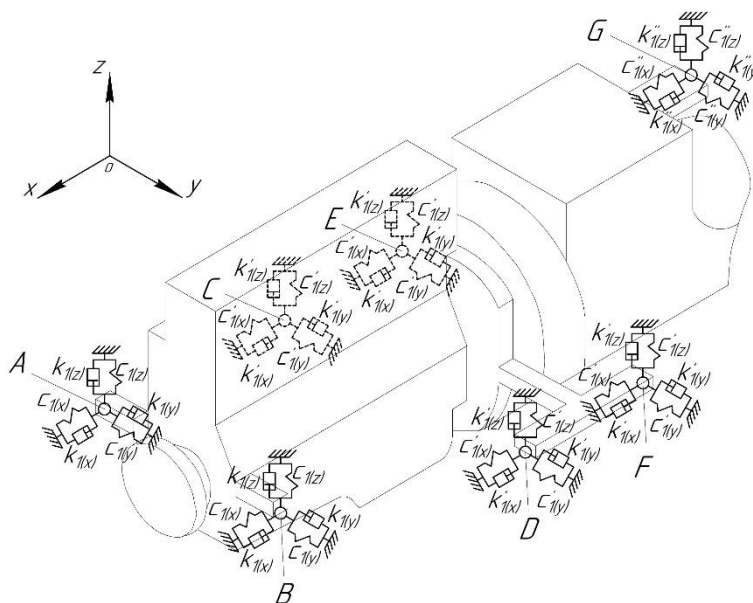


Рис. 3. Схема подрессоривания силовой установки

Fig. 3. Suspension scheme of the power unit

Профиль поверхности пути при движении трактора по стерне колосовых [3] представлен на рис. 4.

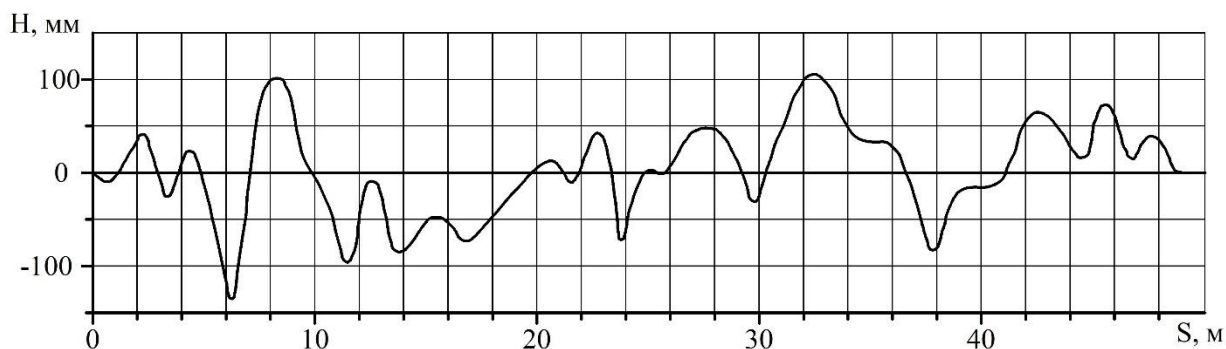


Рис. 4. Параметры микропрофиля поверхности пути [3]

Fig. 4. Road surface micro profile parameters [3]

При выполнении технологических операций на остова трактора через тягово-сцепное устройство воздействует крюковая нагрузка, величина которой зависит от тягового сопротивления сельскохозяйственного агрегата. В настоящей работе для определения тягового сопротивления применяется формула В.П. Горячкина [8]:

$$F_{кр} = f_p \cdot g \cdot m_a + k_p \cdot h_p \cdot b_p + \varepsilon \cdot v^2 \cdot h_p \cdot b_p, \quad (2)$$

где  $f_p$  – коэффициент трения рабочих органов машины о грунт, учитывающий и трение качения опорных катков;  $g$  – ускорение свободного падения;  $m_a$  – масса машины;  $k_p$  – удельное сопротивление на единицу площади поперечного сечения пласта;  $h_p$  – глубина обработки;  $b_p$  – ширина захвата;  $\varepsilon$  – силовой коэффициент, учитывающий свойства грунта;  $v$  – скорость движения.

Процесс движения трактора описывается системой дифференциальных уравнений, которая в общем виде может быть представлена [9-11]:

$$\begin{bmatrix} M & C_q^T \\ C_q & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_e + Q_v \\ Q_c \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где  $M$  – матрица масс и моментов инерции элементов динамической системы,  $\ddot{q}$  – ускорения;  $\lambda$  – множители Лагранжа;  $C_q$  – матрица ограничений Якоби;  $Q_e$  – внешние силы, действующее на тело;  $Q_v$  – силы инерции;  $Q_c$  – силы, ограничивающие перемещения тел.

Решение данной системы осуществляется при помощи численных методов [9] и в настоящей работе выполнено в программном комплексе «Universal Mechanism».

### Результаты исследований и их анализ

В результате моделирования движения трактора по стерне колосовых с крюковой нагрузкой получены линейные и угловые перемещения, скорости и ускорения силовой установки. Рассмотрены четыре режима движения трактора, которые характеризуются различными скоростями и тяговыми усилиями. Моделирование осуществлялось для движения на рабочих передачах с крюковой нагрузкой, соответствующей работе трактора на данной передаче с максимальным тяговым коэффициентом полезного действия по тяговой характеристике (табл. 1).

**Таблица 1.**  
**Режимы движения трактора**

**Table 1.**  
**Tractor driving modes**

Режим	Скорость, км/ч	Крюковая нагрузка, кН
1	4,39	39,18
2	5,95	37,71
3	9,02	27,03
4	13,02	17,76

После монтажа силовой установки на раму трактора под действием статической нагрузки от веса СУ упругие элементы опор деформируются. Исходная высота упругих элементов и соответствующий статический прогиб упругих опор представлены в табл. 2.

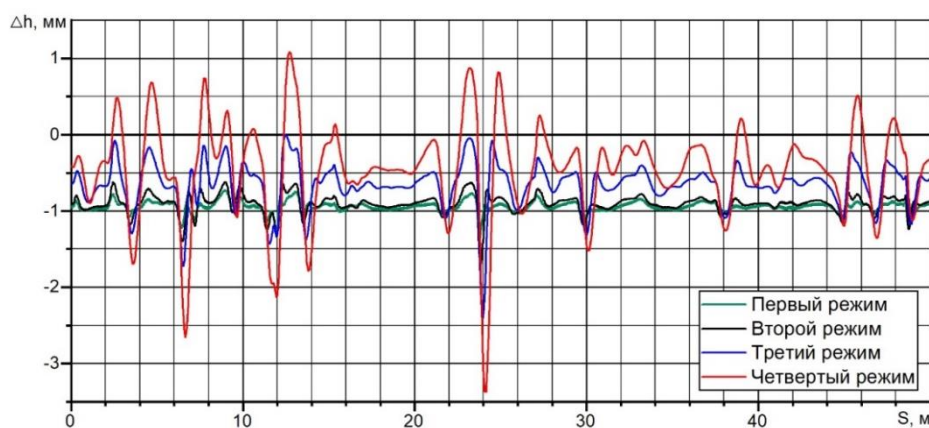
**Таблица 2.**  
**Исходная высота упругого элемента под статической нагрузкой**

**Table 2.**  
**Initial height of elastic element under static load**

Параметр	A	B	C	D	E	F	G
Исходная высота (z), мм	31,18	31,18	28,28	28,28	28,28	28,28	20,00
Высота (z) под статической нагрузкой, мм	28,82	28,71	26,40	26,27	26,43	26,31	18,36
Статический прогиб (z), мм	2,36	2,47	1,88	2,01	1,85	1,97	1,64

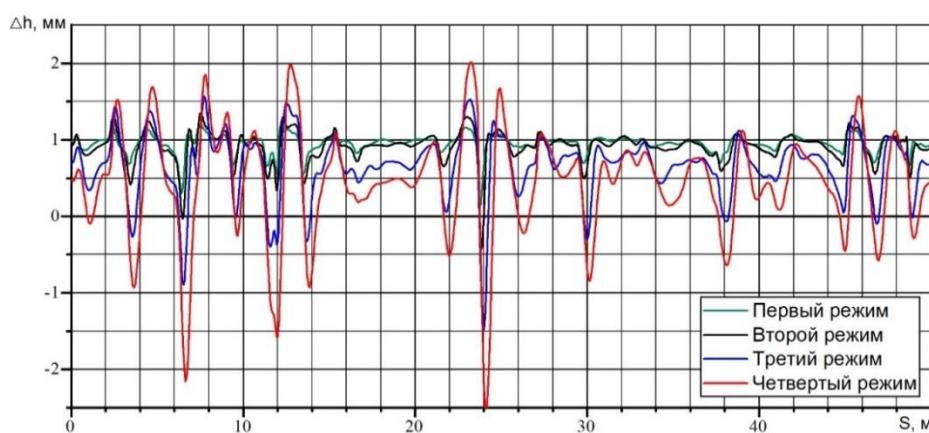
На рис. 5-11 представлены вертикальные перемещения опор силовой установки колесного трактора при движении по профилю, представленному на рис. 4. Вертикальное перемещение опоры  $\Delta h$  соответствует перемещению опоры силовой установки относительно положения равновесия под действием статической нагрузки от веса. Сжатие упругого элемента соответствуют отрицательные значения  $\Delta h$  перемещения опоры силовой установки,  $s$  – положение оси передних колес трактора относительно поверхности пути.

Вертикальные перемещения относительно статического прогиба передних опор «А» и «В» достигают максимального значения при движении трактора на четвертом режиме при прохождении отметки 24 м, где наблюдается наиболее резкое изменение профиля пути, и составляют соответственно -3,38 мм и -2,49 мм. Уменьшение скорости движения трактора приводит к снижению максимальных перемещений опоры «А» на третьем -2,41 мм, на втором -1,73 мм, на первом режимах -1,26 мм. Максимальные перемещения опоры «В» на третьем режиме: -1,49 мм, втором: -0,46 мм. При работе трактора на первом режиме опора «В» разгружается и перемещается на 0,12 мм вверх от статического положения равновесия.



**Рис. 5. Вертикальные перемещения правой передней опоры «А»**

**Fig. 5. Vertical displacements of the right front support «А»**

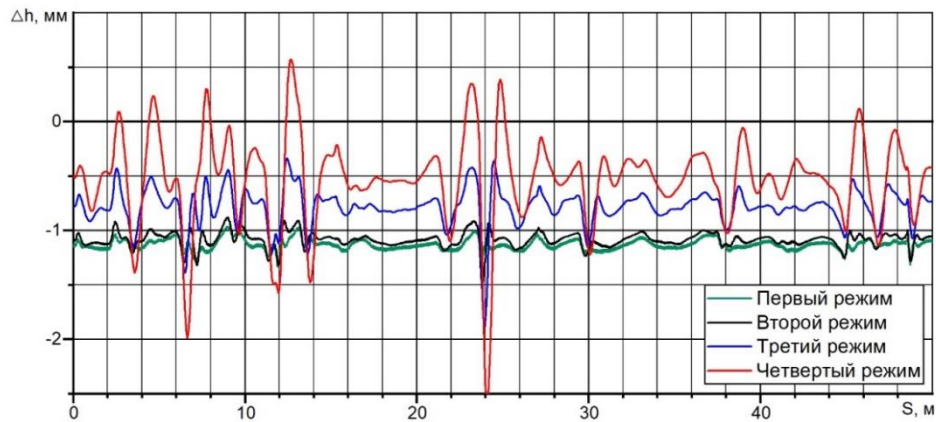


**Рис. 6. Вертикальные перемещения левой передней опоры «В»**

**Fig. 6. Vertical displacements of the left front support «В»**

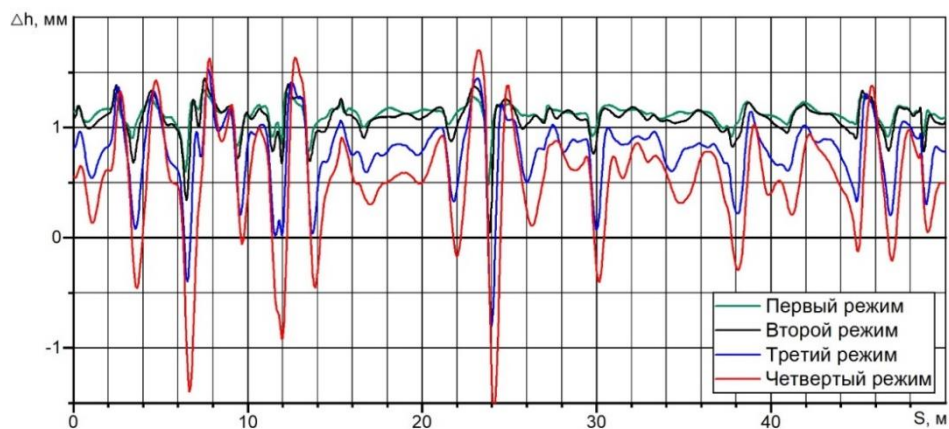
При движении трактора на участке от 18 до 20 м на трактор оказываются наименьшие воздействия со стороны неровностей профиля пути, что позволяет оценить влияние реактивного момента, воспринимаемого упругими опорами силовой установки при движении трактора с различными крюковыми нагрузками. Чем больше величина крюковой нагрузки, тем больший реактивный момент воспринимают упругие элементы опор системы поддрессоривания силовой установки. Под действием этого момента опора «А» получает дополнительную нагрузку, т.е. упругий элемент опоры сжимается, а опора «В», соответственно, разгружается. Величина максимального сжатия упругого элемента опоры «А» под действием опрокидывающего момента не превышает -0,95 мм при движении трактора на первом режиме. Величина минимального сжатия упругого элемента опоры «А» наблюдается на четвертом режиме и со-

ставляет  $-0,5$  мм. При движении трактора на втором и третьем режиме величины вертикального сжатия опоры «А» составили соответственно  $-0,93$  мм и  $-0,7$  мм. Опора «В» разгрузилась, т.е. получила перемещения вверх от статического положения равновесия, на первом режиме  $0,95$  мм, на втором режиме  $0,93$  мм, на третьем режиме  $0,7$  мм и на четвертом режиме  $0,5$  мм.



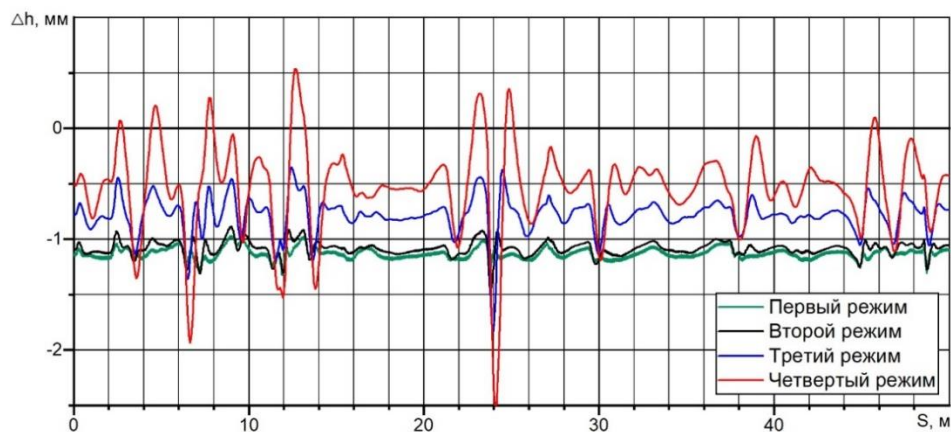
**Рис. 7. Вертикальные перемещения средней правой опоры «С»**

**Fig. 7. Vertical displacements of the right middle support «C»**



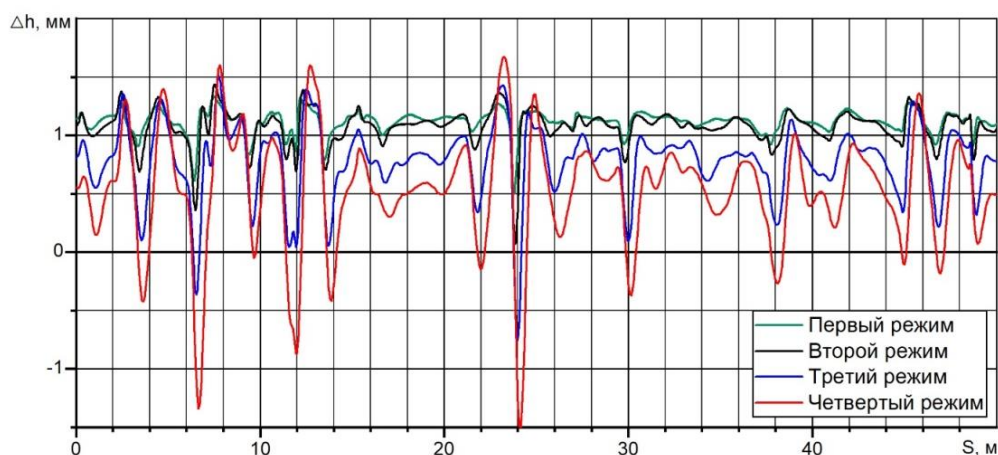
**Рис. 8. Вертикальные перемещения средней левой опоры «D»**

**Fig. 8. Vertical displacements of the left middle support «D»**



**Рис. 9. Вертикальные перемещения средней правой опоры «E»**

**Fig. 9. Vertical displacements of the right middle support «E»**



**Рис. 10. Вертикальные перемещения средней левой опоры «F»**

**Fig. 10. Vertical displacements of the left middle support «F»**

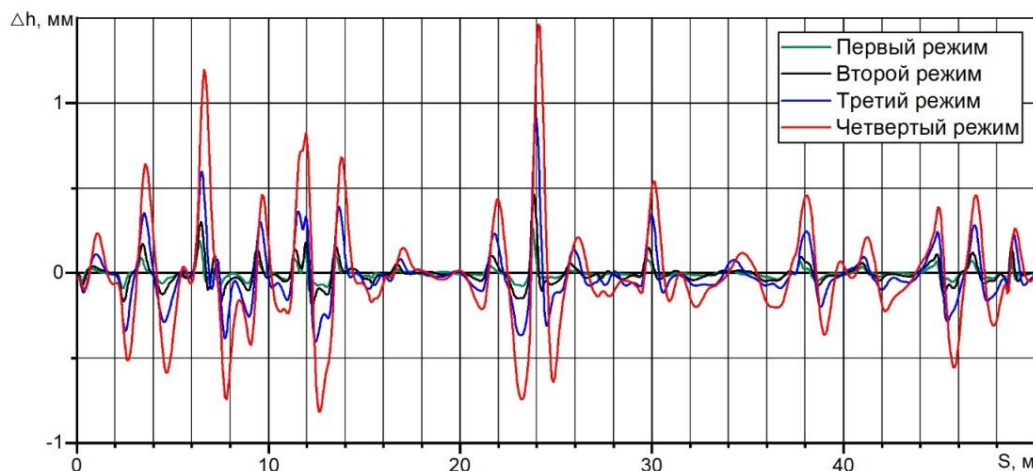
Опоры «С» и «Е» имеют одинаковую конструкцию и расположены близко друг от друга, в связи с чем перемещения опор «С» и «Е» практически не отличаются. То же самое можно сказать относительно пары опор «D» и «F».

Рассмотрим вертикальные перемещения относительно статического прогиба средних опор «С» и «D». Как и для передних опор «А» и «В», перемещения средних опор «С» и «D» достигают максимального значения при движении трактора на четвертом режиме при прохождении отметки 24 м и составляют соответственно -2,49 мм и -1,50 мм. Уменьшение скорости движения трактора приводит к снижению максимальных перемещений опоры «С» на третьем до -1,87 мм, на втором до -1,51 мм, на первом режимах до -1,29 мм. Максимальные перемещения опоры «D» составляют на третьем режиме -0,76 мм. При работе трактора на первом и втором режимах опора «D» разгружается и перемещается соответственно на 0,50 мм и 0,05 мм вверх от статического положения равновесия.

При движении трактора на участке от 18 до 20 м на трактор оказываются наименьшие воздействия со стороны неровностей профиля пути, что позволяет оценить влияние реактивного момента, воспринимаемого упругими опорами силовой установки, при движении трактора с различными крюковыми нагрузками. Под действием реактивного момента опора «С» получает дополнительную нагрузку, упругий элемент опоры сжимается, а опора «D» – разгружается. Величина максимального сжатия упругого элемента опоры «С» под действием опрокидывающего момента не превышает -1,15 мм при движении трактора на первом режиме. Величина минимального сжатия упругого элемента опоры «С» наблюдается на четвертом режиме и составляет -0,55 мм. При движении трактора на втором и третьем режиме величины вертикального сжатия опоры «С» составили соответственно -1,10 мм и -0,75 мм. Опора под действием реактивного момента «D» разгрузилась, т.е. получила перемещения вверх от статического положения равновесия, на первом режиме 1,15 мм, на втором режиме 1,11 мм, на третьем режиме 0,75 мм и на четвертом режиме 0,50 мм.

Опора «G» расположена на продольной оси симметрии трактора, в связи с чем, угловые колебания силовой установки относительно этой оси не приводят к перемещению опоры. Перемещения опоры вызываются линейными колебаниями вдоль вертикальной оси и угловыми колебаниями в продольной плоскости. Таким образом, перемещения опоры вызваны взаимодействием трактора с поверхностью пути и не зависят от величины крюковой нагрузки, т.е. от опрокидывающего момента силовой установки, что отчетливо видно на рис. 11.





**Рис. 11. Вертикальные перемещения центральной опоры «G»**

**Fig. 11. Vertical displacements of the central support «G»**

Вертикальные перемещения относительно статического прогиба опоры «G» достигают максимального значения при движении трактора на четвертом режиме при прохождении отметки 24 м и составляют соответственно 1,45 мм. Уменьшение скорости движения трактора приводит к снижению максимальных перемещений опоры «G» на третьем режиме – до 0,85 мм, на втором – до 0,49 мм, на первом – до 0,25 мм.

### Выводы

Возмущения, возникающие в опорах и действующие на упругий элемент, можно разделить на три группы. К первой группе относятся колебания, возникающие в элементах трансмиссии и передающиеся через остов машины. Ко второй группе следует отнести колебания, возникающие под действием опрокидывающего момента. Величина момента зависит от значения крюковой нагрузки. Под действием опрокидывающего момента опоры правого борта постоянно дополнительно сжимаются, а левого разгружаются и восстанавливают исходную высоту. Таким образом, правые опоры нагружены сильнее, что приведет к более интенсивному их разрушению и снизит долговечность. В третью группу входят колебания, вызванные движением машины по неровностям дороги и передающиеся на СУ через колеса и остов. Эти нагрузки оказывают наибольшее воздействие на величину деформации упругих элементов. Амплитуда колебаний силовой установки возрастает при увеличении скорости движения машины и достигает максимальных значений на четвертом режиме.

Опоры нагружаются неравномерно, что связано со схемой их закрепления, разной жесткостью упругих элементов опор, расположения центра тяжести силовой установки. Наиболее нагруженной является правая передняя опора. Максимальное перемещение этой опоры составляет 3,38 мм, что соответствует относительной деформации упругого элемента 11,7 %. Полученные значения перемещений опор позволяют определить напряженно-деформированное состояние упругих элементов и оценить их усталостную прочность.

*Исследование выполнено в АлтГТУ им. И.И. Ползунова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения №075-11-2021-039 от 25 июня 2021 г.*

**Библиографический список**

1. **Челомей, В.Н.** Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т.: под. ред. В.Н. Челомей – Т.3. Колебания машин, конструкция и их элементов / В.Н. Челомей, Э.Л. Айрапетов, И.А. Биргер, В.Л. Вей и др. – М.: Машиностроение, 1980. – 544 с.
2. **Яворский, Ю.** Резина в автомобилях: пер. с пол. / Ю. Яворский. – Л.: Машиностроение, 1980. – 360 с.
3. **Анилович, В.Я.** Конструирование и расчет сельскохозяйственных тракторов. Справочное пособие / В.Я. Анилович, Ю.Т. Водолажченко. – М.: Машиностроение, 1966. – 520 с.
4. **Коростелев, С.А.** Долговечность и оптимальное проектирование гусеничного движителя с резинометаллическими элементами: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. – Барнаул, 2017. – 358 с.
5. **Барский, И.Б.** Сцепление транспортных и тяговых машин / И.Б. Барский, С.Г. Борисов, В.А. Галягин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 344 с.
6. **Тарасик, В.П.** Теория движения автомобиля. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.П. Тарасик. – СПб.: БХВ-Петербург, 2022. – 576 с.
7. **Шарипов, В.М.** Конструирование и расчет тракторов: Учебник для студентов вузов. 2-е изд. перераб. и доп. / В.М. Шарипов. – М.: Машиностроение, 2009. – 752с.
8. **Гуськов, В.В.** Тракторы: Теория: Учебник для студентов вузов по спец. «Автомобили и тракторы»: / В.В. Гуськов, Н. Н. Велев, Ю.Е. Атаманов. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
9. **Погорелов, Д.Ю.** Введение в моделирование динамики систем тел: учеб. пособие / Д.Ю. Погорелов. – Брянск, БГТУ, 1997. – 156 с.
10. **Shabana, A.A.** Dynamics of Multibody Systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – 374 p.
11. **Shabana, A.A.** Computational Dynamics. – New York: John Wiley & Sons Ltd, 2010. – 528 p.

*Дата поступления  
в редакцию: 06.06.2023*

*Дата принятия  
к публикации: 28.07.2023*

УДК 629.113

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_116

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОЙ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ГРУЗОПЕРЕВОЗКАХ

**С.В. Назаренко**ORCID: 0009-0003-1382-5589 e-mail: [Sergey.Nazarenko@kamaz.ru](mailto:Sergey.Nazarenko@kamaz.ru)

ПАО «КАМАЗ»

*Набережные Челны, Россия***Б.Б. Косицын**ORCID: 0009-0003-3004-1073 e-mail: [kositsyn\\_b@bmstu.ru](mailto:kositsyn_b@bmstu.ru)

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*Москва, Россия***Б.В. Падалкин**ORCID: 0009-0009-2048-3701 e-mail: [padalkin@bmstu.ru](mailto:padalkin@bmstu.ru)

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*Москва, Россия***А.А. Стадухин**ORCID: 0009-0009-2048-3701 e-mail: [ant.m9@ya.ru](mailto:ant.m9@ya.ru)

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*Москва, Россия*

Проведен анализ применения беспилотных колесных машин для осуществления циклических грузоперевозок при реализации технологических процессов на складах, терминалах и производствах. На основании этого предложена концепция беспилотной колесной машины, привод которой осуществляется двумя одинаковыми тяговыми электродвигателями, соединенными с трансмиссией через редукторы с разными передаточными отношениями. В рамках исследования ставится задача рационального распределения тяги между указанными электродвигателями, а также задача определения оптимального скоростного режима беспилотной машины, направленного на минимизацию потерь энергии при движении. Рассматриваются используемые в подобных случаях алгоритмы оптимизации, предложен метод определения закона энергоэффективного движения беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках, основывающийся на генетическом алгоритме. Главная особенность предлагаемого метода – способ учета ограничений, действующих на маршруте: время в пути, максимальные значения ускорений/замедлений, тяговые возможности привода и максимальная разрешенная скорость на участке. Для этого предложены модифицированные функции создания, мутации и рекомбинации, которые необходимы для работы генетического алгоритма. В качестве апробации рассматриваемого метода выполнены предварительные расчеты, позволившие определить параметры генетического алгоритма для проведения дальнейших исследований по синтезу оптимальных законов движения беспилотных колесных машин.

**Ключевые слова:** беспилотная машина, колесная машина, энергоэффективность, генетический алгоритм, закон движения, оптимизация, циклические грузоперевозки.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Назаренко, С.В. Метод определения закона энергоэффективного движения беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках / С.В. Назаренко, Б.В. Косицын, Б.В. Падалкин, А.А. Стадухин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 116-130. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_116



## METHOD FOR DETERMINING THE LAW OF ENERGY EFFICIENT MOVEMENT OF AN UNMANNED WHEELED VEHICLE DURING CYCLIC CARGO TRANSPORTATION

**S.V. Nazarenko**

ORCID: 0009-0003-1382-5589 e-mail: [Sergey.Nazarenko@kamaz.ru](mailto:Sergey.Nazarenko@kamaz.ru)

ПАО «КАМАЗ»

*Naberezhnye Chelny, Russia*

**B.B. Kositsyn**

ORCID: 0009-0003-3004-1073 e-mail: [kositsyn\\_b@bmstu.ru](mailto:kositsyn_b@bmstu.ru)

Bauman Moscow State Technical University

*Moscow, Russia*

**B.V. Padalkin**

ORCID: 0009-0009-2048-3701 e-mail: [padalkin@bmstu.ru](mailto:padalkin@bmstu.ru)

Bauman Moscow State Technical University

*Moscow, Russia*

**A.A. Stadukhin**

ORCID: 0009-0009-2048-3701 e-mail: [ant.m9@ya.ru](mailto:ant.m9@ya.ru)

Bauman Moscow State Technical University

*Moscow, Russia*

**Abstract.** The article analyzes the use of unmanned wheeled vehicles for the implementation of cyclic cargo transportation in the implementation of technological processes in warehouses, terminals and industries. The concept of an unmanned wheeled vehicle is proposed, the drive of which is carried out by two identical traction motors connected to the transmission through gearboxes with different gear ratios. The task of rational thrust distribution between the indicated electric motors is posed, as well as the task of determining the optimal speed mode of an unmanned vehicle, aimed at minimizing energy losses during movement. The article considers the optimization algorithms used in such cases and proposes a method for determining the law of energy-efficient movement of an unmanned wheeled vehicle in cyclic cargo transportation, based on a genetic algorithm. The main feature of the proposed method is the way to take into account the restrictions on the route: travel time, maximum acceleration / deceleration values, drive traction capabilities and the maximum allowed speed on the section. Modified functions of creation, mutation and recombination, which are necessary for the operation of the genetic algorithm are proposed. Preliminary calculations have been performed as an approbation of the proposed method. They made it possible to determine the parameters of the genetic algorithm, allowing further research on the synthesis of optimal laws of motion for unmanned wheeled vehicles.

**Key words:** unmanned vehicle, wheeled vehicle, energy efficiency, genetic algorithm, law of motion, optimization, cyclic cargo transportation.

**FOR CITATION:** S.V. Nazarenko, B.V. Kositsyn, B.V. Padalkin, A.A. Stadukhin. Method for determining the law of energy efficient movement of an unmanned wheeled vehicle during cyclic cargo transportation. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 3. Pp. 116-130. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_3\_116

### Введение

В настоящее время эксплуатация беспилотных колесных машин (БКМ) в основном производится в специально подготовленной среде, например, при внутривоздушных перевозках (перевозки в масштабах склада, терминала [1], промышленного предприятия). Это делает их маршрут циклическим (повторяющимися), а самих БКМ – участниками производственного процесса. С одной стороны, здесь требуется для каждого маршрута жестко определить время в пути и по возможности снизить затраты на передвижение, а с другой

стороны – определенность среды и режима эксплуатации позволяет заранее спланировать и оптимизировать маршрут [2]. Необходимость движения в стесненных условиях (и, возможно, в закрытых помещениях) требует от БКМ высокой маневренности, возможности малых скоростей движения и отсутствия вредных выбросов, что делает желательным применение в машине тягового электропривода.

Имеющийся опыт разработки транспортных машин с тяговым электроприводом показывает необходимость применения двух или более механических диапазонов [3], т.е. в составе трансмиссии требуется применять коробку передач. Это в некоторой мере обесценивает часть преимуществ применения тягового электропривода, в частности, затрудняет обеспечение бесступенчатого разгона (и требует автоматизации переключения передач). Рациональным решением данной инженерной проблемы может быть использование в составе БКМ двух тяговых электродвигателей (ТЭД), один из которых предназначен для обеспечения высокой скорости движения – быстроходный привод (БП), а второй позволяет преодолевать повышенное сопротивление движению – моментный привод (МП). Для этого можно использовать электромашины одинаковые, но имеющие разное фиксированное передаточное отношение в редукторах. Здесь возникает дополнительная задача рационального перераспределения мощности между БП и МП с целью обеспечения меньших затрат энергии. Схожий принцип повышения энергоэффективности электропривода исследовался в [4], однако в данной работе мощность электродвигателей суммировалась в планетарном ряде, а не на грунте.

Для нахождения оптимального закона управления транспортными машинами применяются различные подходы: аналитические вариационные методы, дискретное динамическое программирование Беллмана [5] и различные методы оптимизации. В случае решения такого класса задач, как определение (синтез) рациональной траектории движения до цели с обходом препятствий, используются: алгоритмы муравьиной тропы [6], генетические алгоритмы оптимизации [7], методы роя частиц [8]. Все они способны работать со сложными нелинейными задачами и находить глобальные минимумы целевой функции. Имеется ряд исследований, где генетические алгоритмы используются для решения разнообразных логистических задач (задач перемещения груза от поставщиков к потребителям с учетом распределительных центров, ограничения времени снабжения, задействованного парка транспортных машин, затрат на дорогу и т.д.) [9, 10]. Также следует отметить работы [11, 12], где с помощью генетического алгоритма определяется оптимальный скоростной режим рельсового транспорта.

Проведенный анализ позволяет судить о том, что для задачи определения оптимальных законов управления тяговым электроприводом беспилотной колесной машины (в том числе, для нескольких тяговых электродвигателей в составе трансмиссии) целесообразно использовать генетический алгоритм (ГА). ГА потенциально обладает хорошей производительностью, особенно учитывая то, что расчет ГА можно остановить, используя лучшее на текущий момент решение, которое в той или иной степени приближенно к оптимальному. Кроме того, ГА позволяет проводить оптимизацию не по одному варьируемому параметру, а по нескольким (например, не только по поддерживаемой машиной скорости, но и по степени распределения тяги между электродвигателями).

### **Постановка задачи оптимизации с применением генетического алгоритма**

Как и в случае других алгоритмов, в ГА оптимизация выполняется исходя из некоторого критерия, который описывается целевой функцией (в терминах генетического алгоритма – функция приспособленности). Целевая функция предназначена для сравнения различных наборов варьируемых параметров оптимизируемой системы (т.е. особей) между собой. В процессе каждого шага алгоритма оптимизации каждого поколения (рис. 1) особи с большим значением целевой функции (то есть наименее приспособленные) удаляются. На их место записываются новые особи, полученные одним из двух путей:

- 1) с помощью функции мутации, которая осуществляет малые изменения случайных параметров в наборе (случайных генов особи);
- 2) с помощью функции рекомбинации, которая обменивает значения генов между двумя особями одного поколения.

Поскольку происходит удаление наименее приспособленных особей (отбор), среднее значение целевой функции в каждом поколении уменьшается (особи становятся все более приспособленными). При достижении заданного значения целевой функции или при отсутствии ее изменений от поколения к поколению оптимизация останавливается, а лучший представитель последнего поколения считается оптимальным решением. С целью применения генетического алгоритма для формирования оптимального закона движения БКМ трассу предлагается представить набором участков одинаковой длины (рис. 2), на каждом из которых известны кривизна движения  $k_k$ , угол наклона опорной поверхности  $\alpha_k$  и ограничение максимальной скорости  $V_{max k}$ , где индекс  $k$  – номер участка.

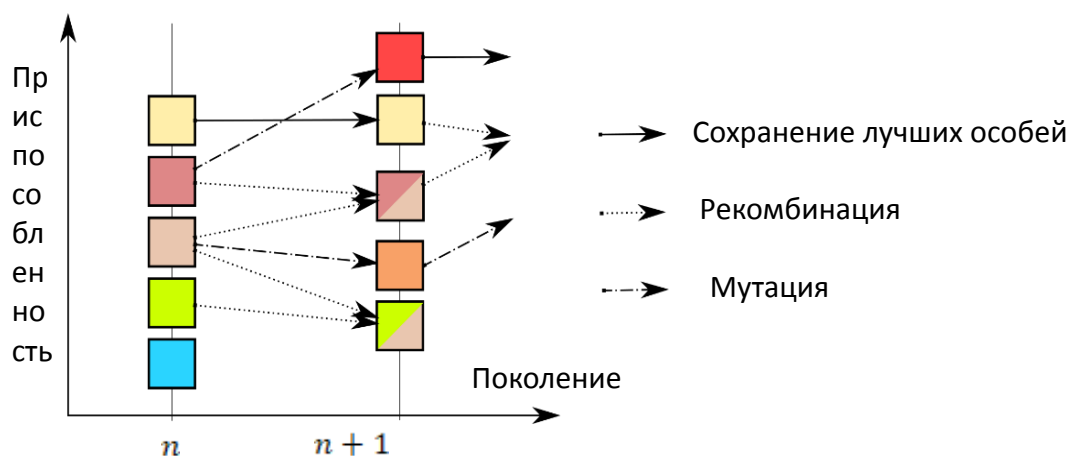


Рис. 1. Схематичное описание работы генетического алгоритма

Fig. 1. Schematic description of the genetic algorithm

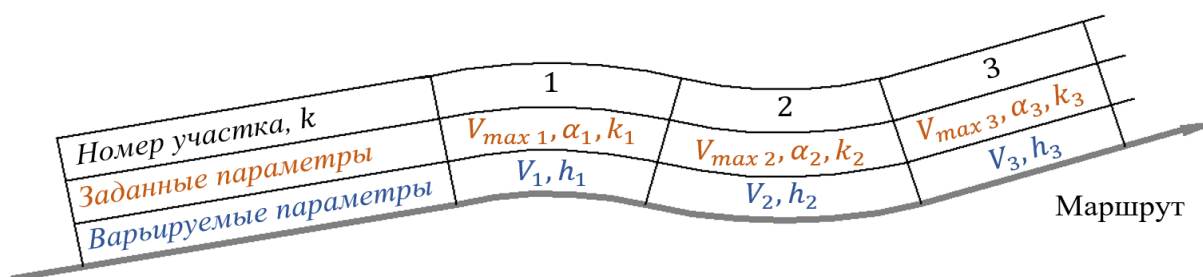


Рис. 2. Представление маршрута движения как набора участков

Fig. 2. Representing a driving route as a set of segments

Каждому участку ставится в соответствие требуемая скорость движения  $V_k$ , и для случая беспилотной КМ с двумя тяговыми двигателями – коэффициент распределения тяги между двигателями  $h_k$ . Величины  $V_k$  и  $h_k$  являются для задачи оптимизации варьируемыми параметрами (то есть геномом особи).

В качестве значения целевой функции генетического алгоритма в зависимости от решаемой задачи можно назначить различные параметры – общую энергию, затраченную на движение КМ, среднее по участкам значение продольных ускорений КМ и т.д. Для задач данного исследования целевая функция вычислялась как суммарная энергия, потерянная в тяговых электродвигателях при движении по маршруту  $E_{пот.эдс}$ . Такой подход обладает

большей чувствительностью по сравнению с анализом общей энергии, затраченной на движение и, соответственно, приводит к более быстрой сходимости алгоритма оптимизации.

$$E_{\text{пот.эдS}} = \sum_k N_{\text{пот.эдk}} \cdot t_k, \quad (1)$$

где  $N_{\text{пот.эдk}}$  – общая мощность потерь тяговых электродвигателей при движении машины по участку  $k$  (вычисляется для каждого ТЭД в соответствии с методом [13]);  $t_k$  – время, затраченное на преодоление участка  $k$ .

Для работы генетического алгоритма следует задать функции создания, мутации и рекомбинации особей. При этом для учета ограничений при выполнении оптимизации во всех функциях необходимо обеспечить выполнение следующих условий при варьировании параметров  $V_k$  и  $h_k$  (т.е. генома) нового поколения:

- 1) общее время движения по маршруту должно соответствовать заданному  $t_S$  (для предотвращения скопления машин в зонах погрузки/разгрузки так как при циклических грузоперевозках машины являются участниками жесткого технологического процесса);
- 2) развиваемая двигателями тяга не должна выходить за внешнюю механическую характеристику;
- 3) максимальное продольное ускорение/замедление не должно превосходить заданное;
- 4) максимальная скорость не должна превосходить ограничение скорости на участке  $V_{\text{max } k}$ .

В остальном геном особей должен быть подвержен случайным изменениям путем мутации или рекомбинации для того, чтобы от поколения к поколению целевая функция уменьшалась.

### Соответствие времени движения на маршруте заданному

Это соответствие предлагается обеспечивать путем «нормализации», т.е. путем умножения изначальной (ненормированной, полученной мутацией или рекомбинацией) скорости движения на каждом участке  $V'_k$  на некоторый коэффициент  $K_V$ . Для определения этого коэффициента на первом этапе установим время  $\Delta t$ , которое требуется машине для прохождения каждого элементарного участка пути:

$$\Delta t = \Delta S / V_{\text{cp}}, \quad (2)$$

где  $\Delta S$  – длина участка,  $V_{\text{cp}}$  – средняя скорость прохождения участка.

Средняя скорость зависит от скоростей на участках следующим образом:

$$V_{\text{cp}} = \frac{V_k + V_{k+1}}{2}. \quad (3)$$

Тогда, с учетом введения коэффициента  $K_V$ :

$$\Delta t = \frac{2\Delta S}{V_{k+1} + V_k} = \frac{2\Delta S}{V'_{k+1} \cdot K_V + V'_k \cdot K_V}. \quad (4)$$

В данном выражении следует также учесть заданные ограничения максимальной скорости на участках  $V_{\text{max } k}$ . Тогда окончательно время прохождения каждого элементарного участка вычисляется по формуле:

$$\Delta t = \frac{2 \Delta S}{\min(V'_{k+1} \cdot K_V, V_{\text{max } k+1}) + \min(V'_k \cdot K_V, V_{\text{max } k})}. \quad (5)$$

Таким образом, коэффициент  $K_V$  для каждого набора варьируемых параметров (особи) и заданного времени прохождения маршрута  $t_S$  можно найти из решения следующего уравнения:

$$t_S - \sum_k \frac{2 d_s}{\min(V'_{k+1} \cdot K_V, V_{\text{max } k+1}) + \min(V'_k \cdot K_V, V_{\text{max } k})} = 0, \quad (6)$$

где  $d_s$  – длина участка пути, на которые разбит маршрут (в данном исследовании принят постоянной величиной).

В итоге в предложенных далее функциях создания мутации и рекомбинации ГА сначала вычисляются даже не собственно скорости на участках, а относительные скорости  $V'_k$ , которые, если умножить их на  $K_V$ , обеспечат заданное время движения на маршруте. На рис. 3 показан пример нормализации исходного скоростного режима (100 секунд на маршруте) с целью обеспечения большего и меньшего времени на маршруте.

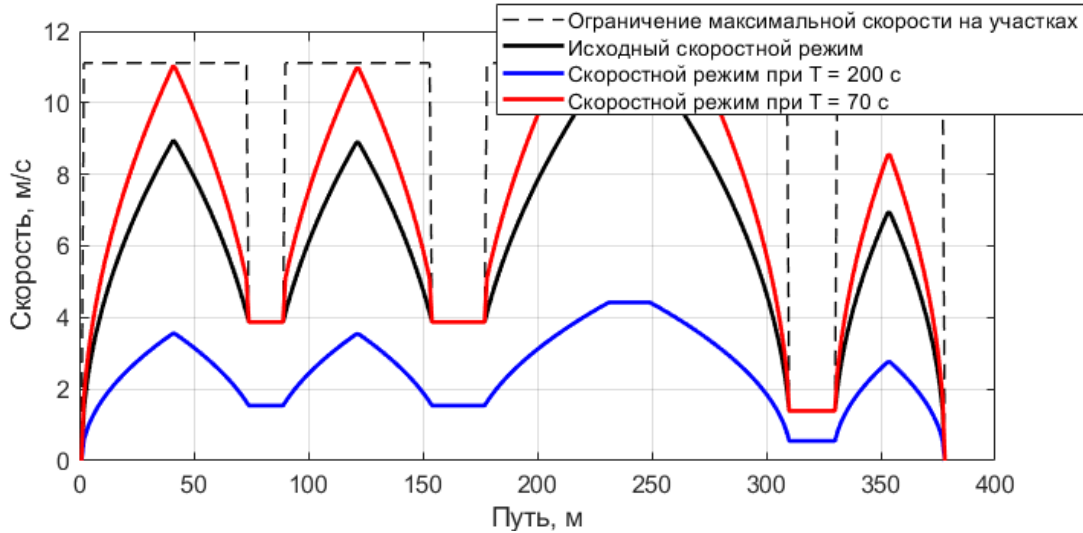


Рис. 3. Пример нормализации скорости для обеспечения заданного времени на маршруте

Fig. 3. Example of speed normalization to ensure a given time on the route

Ограничения на максимальное ускорение (замедление) и возможности тяговых электродвигателей учитываются в соответствии с принципом, изложенным в [14]. Для учета ограничений на ускорения производится последовательный обход маршрута с вычислением скоростей  $V_{a.пр.k}$  на участках в прямом направлении, т.е. скорость машины на текущем участке пути  $k$  должна быть ограничена, если ускорение при переходе с предыдущего участка на текущий превышает допустимые ограничения. При вычислении скоростей  $V_{a.об.k}$ , учитывающих ограничения на максимальное замедление, производится последовательный обход маршрута в обратном направлении. Итоговая скорость на участке  $V_{a.k}$  определяется как минимальная из вычисленных. Указанное можно записать в виде следующих выражений и представить в виде рис. 4.

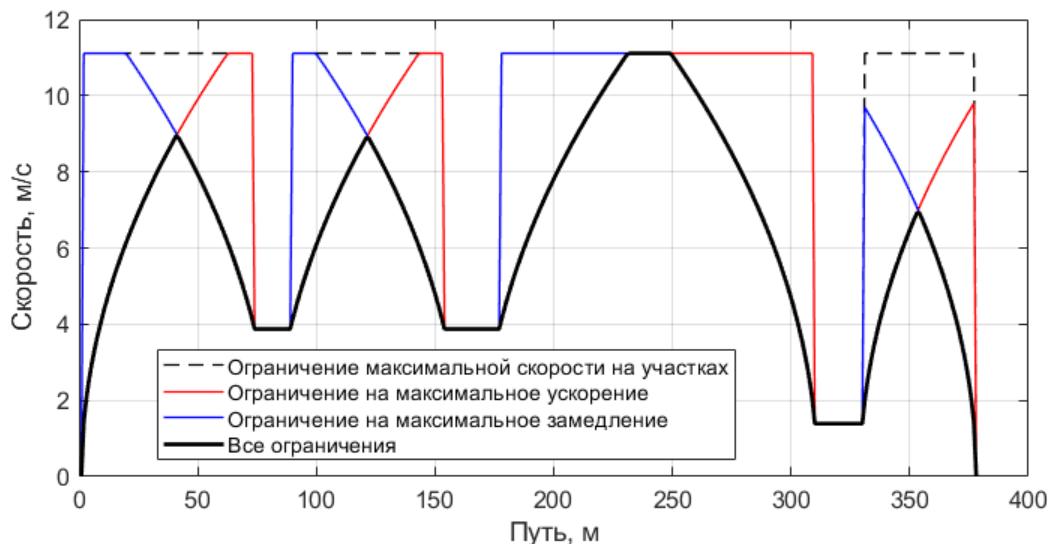
$$V_{a.пр.k} = \min(V_k, \sqrt{V_{a.пр.k-1}^2 + 2a_{max}d_s}, V_{зд.k}), \tag{7}$$

где  $a_{max}$  – ограничения на продольные ускорения при разгоне и торможении беспилотной КМ (в том числе, с учетом сцепных свойств движителя с ОП);  $V_{зд.k}$  – максимальная скорость КМ с учетом ограничения тягового электродвигателя по тяге.

$$V_{a.об.k} = \min(V_k, \sqrt{V_{a.об.k+1}^2 - 2a_{max}d_s}, V_{т.k}), \tag{8}$$

где  $V_{т.k}$  – максимальная скорость КМ с учетом ограничения тормозных механизмов (или тягового двигателя в режиме торможения).

$$V_{a.k} = \min(V_{a.пр.k}, V_{a.об.k}), \tag{9}$$



**Рис. 4. Пример вычисления скорости на маршруте с учетом ограничений на максимальное ускорение и максимальное замедление**

**Fig. 4. An example of calculating the speed on the route, taking into account the restrictions on maximum acceleration and maximum deceleration**

В формулах (7) и (8) используются величины скоростей  $V_{эд,к}$  и  $V_{т,к}$ , зависящие от механических характеристик тягового двигателя, тормозной системы и условий движения. Для получения этих величин необходимо решить обратную задачу динамики движения БКМ, опираясь на математическую модель, которая главным образом характеризуется следующим дифференциальным уравнением:

$$(m\delta + J_z k_k^2) \frac{dV_k}{ds} V_k + J_z \frac{dk_k}{ds} V_k^2 \cdot k_k = \frac{M_k}{r_0} - mg(f_{крив} \cos(\alpha_k) + \sin(\alpha_k)) - c_x F_{лоб} \rho \frac{V_k^2}{2}, \quad (10)$$

где:

$\delta$  – коэффициент учета вращающихся масс;

$J_z$  – момент инерции КМ относительно вертикальной оси;

$k_k$  – кривизна траектории как функция от пути  $s$ ;

$V_k$  – скорость машины;

$M_k$  – общий крутящий момент, создаваемый на ведущих колесах;

$f_{крив}$  – коэффициент сопротивления при криволинейном движении КМ;

$\alpha$  – угол наклона опорной поверхности в продольном направлении.

Из уравнения (10) можно определять крутящий момент  $M_k$ , который необходимо создать на ведущих колесах при заданном режиме движения, а именно известном на каждом участке ускорении  $(dV_k/ds)V_k$ , скорости  $V_k$ , кривизне траектории  $k_k$  и угле наклона опорной поверхности  $\alpha_k$ . Получив из решения уравнения (10) суммарный крутящий момент  $M_k$ , требуемый на ведущих колесах для обеспечения заданного режима движения можно определить соответствующий ему момент электродвигателя  $M_{эд}$  для исследуемого варианта БКМ.

Полученный крутящий момент  $M_{эд}$  должен обеспечиваться (быть меньше) суммарной внешней скоростной характеристикой всех ТЭД БКМ  $M_{сум}( \omega_{сум} )$ . В ином случае необходимо скорректировать скорость на участке  $V_k$  и определить требуемый крутящий момент  $M_k$  заново. В данном исследовании нахождение предельной скорости на участке, исходя из максимальной тяги ТЭД, реализовано путем численного решения уравнения вида:

$$(m\delta + J_z k_k^2) \frac{dV_k}{ds} V_k + J_z \frac{dk_k}{ds} V_k^2 \cdot k_k + mg(f_{\text{крив}} \cos(\alpha_k) + \sin(\alpha_k)) + c_x F_{\text{лоб}} \rho \frac{V_k^2}{2} - \frac{M_{\text{СУВСК}}(\omega_{\text{су}}) i_{\text{тр.в}} \eta_{\text{тр}}}{r_0} = 0. \quad (11)$$

В случае определения оптимального закона управления приводом машины с двумя ТЭД в геном добавляется параметр  $h_k$ , определяющий вклад крутящего момента электродвигателей быстрого и моментного привода на каждом участке маршрута. Тогда с учетом параметра  $h_k$  двигатель МП должен развить на колесах следующий крутящий момент:

$$M_{\text{ЭДМПтреб}} = \frac{M_k h_k}{i_{\text{тр.н}} \eta_{\text{тр}}}, \quad (12)$$

где  $i_{\text{тр.н}}$  – передаточное отношение МП КМ с двумя ТЭД.

В случае, если электродвигатель МП при заданном  $h_k$  в силу своей внешней скоростной характеристики  $M_{\text{ЭДвск}}(\omega_{\text{эд}})$  не способен реализовать требуемый крутящий момент  $M_{\text{ЭДМПтреб}}$ , недостающую тягу должен обеспечить БП, т.е. можно записать:

$$\begin{aligned} M_{\text{ЭДМП}} &= \min(M_{\text{ЭДМПтреб}}, M_{\text{ЭДвск}}(\omega_{\text{эд}})); \\ M_{\text{кМП}} &= M_{\text{ЭДМП}} i_{\text{тр.н}} \eta_{\text{тр}}; \\ M_{\text{ЭДБП}} &= \frac{(M_k - M_{\text{кМП}})}{i_{\text{тр.в}} \eta_{\text{тр}}}, \end{aligned} \quad (13)$$

где:

$M_{\text{ЭДМП}}$  – текущий требуемый крутящий момент электродвигателя МП;

$M_{\text{ЭДБП}}$  – текущий требуемый крутящий момент электродвигателя БП;

$M_{\text{ЭДвск}}(\omega_{\text{эдМП}})$  – значение крутящего момента в соответствии с внешней скоростной характеристикой электродвигателя БКМ;

$M_{\text{кМП}}$  – момент на ведущих колесах беспилотной КМ, обеспечиваемый МП.

Вопросам определения параметров БКМ – мощности ТЭД, передаточных чисел трансмиссии и т.д., предполагается посвятить дальнейшие исследования.

### Генетические операторы (функции создания, мутации и рекомбинации)

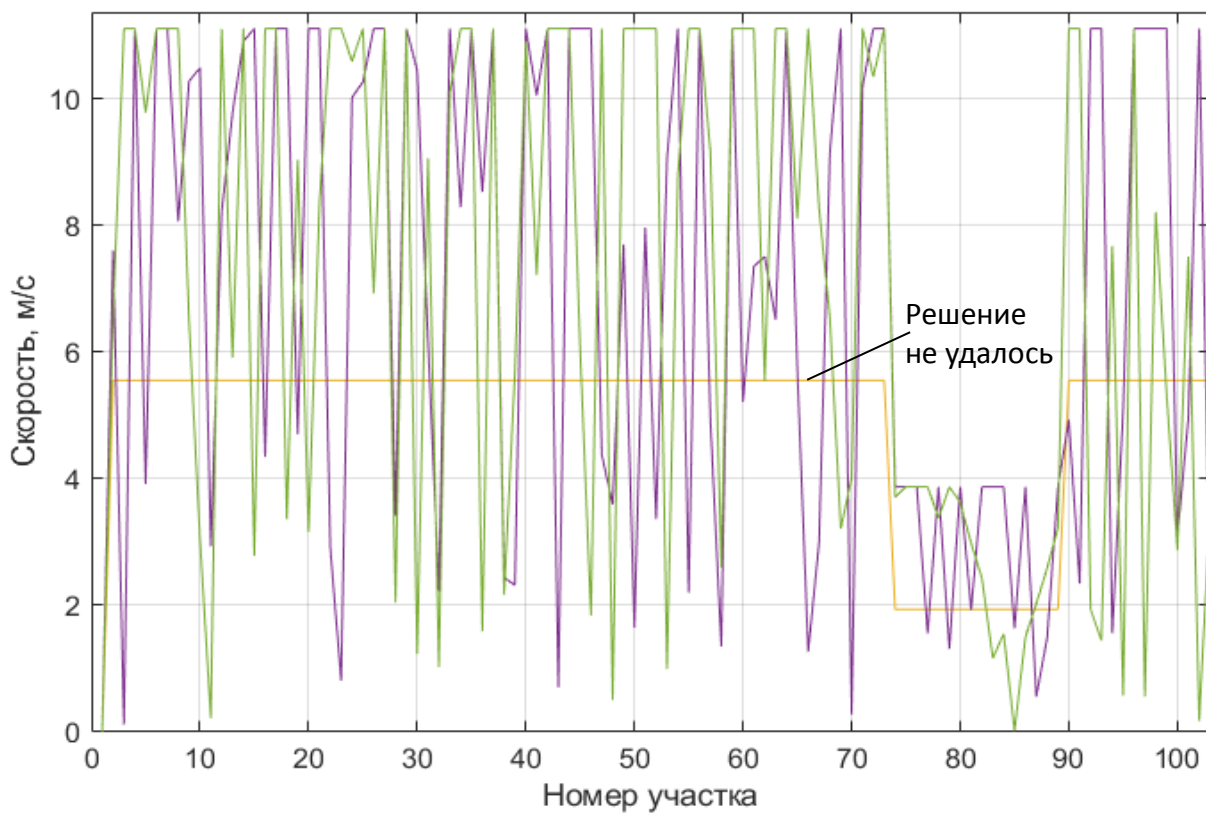
Функция создания (инициализации) популяции генетического алгоритма необходима для начального задания варьируемых параметров для первого поколения особей. От этих начальных значений не требуется обеспечивать высокую приспособленность (малое значение целевой функции), однако необходимо достаточное разнообразие, чтобы успешно решить задачу глобальной оптимизации. Обычно [15] варьируемые параметры первого поколения задаются с помощью равномерного случайного распределения (распределение Монте-Карло), однако исследователи могут модифицировать функцию создания для достижения большего генетического разнообразия. В работе [16] 90 % популяции создается случайным распределением, а 10 % – с помощью специального алгоритма.

Следует учесть то, что значения варьируемых параметров должны лежать в рамках заданных ограничений. В данном исследовании подразумевается, что начальная и конечная скорости КМ равны 0, ни на одном участке скорость не может быть меньше 0, максимальная скорость на участках ограничена при постановке задачи оптимизации, кроме того полученные скорости должны обеспечить заданное общее время на маршруте. Работа функции создания начинается с получения случайного распределения скоростей и степеней использования двигателей для заданного количества представителей первого поколения.

Затем, с целью обеспечения заданного времени движения на маршруте, применяется нормирование скорости (определение  $K_V$ ). В случае, если решение уравнения динамики (11) для разыгранного набора скоростей невозможно, скорости назначаются равными некоторой



фиксированной величине (в данном назначается  $V'_k = V_{max}/2$ , затем проводится нормализация по времени). Прочие ограничения на распределение скоростей по маршруту, вызванные предельным ускорением и возможности тягового привода, в функции создания не применяются, чтобы обеспечить лучшее начальное разнообразие особей. На рис. 5 показан пример получения скоростей на участках с помощью функции создания. Видно влияние ограничений скорости и неудавшиеся попытки решения уравнения динамики. В остальном решение интереса не представляет, так как очевидно содержит большие ускорения и малую энергоэффективность движения. Далее на каждом шаге генетического алгоритма (т.е. к каждому поколению) применяются так называемые генетические операторы, предназначенные для изменения варьируемых параметров. Традиционно это функции мутации и рекомбинации (скрещивания), которые имитируют процессы, протекающие в живой природе. Обычно заранее задают долю представителей поколения, к которым будет применен тот или иной оператор (либо вероятность применения оператора).



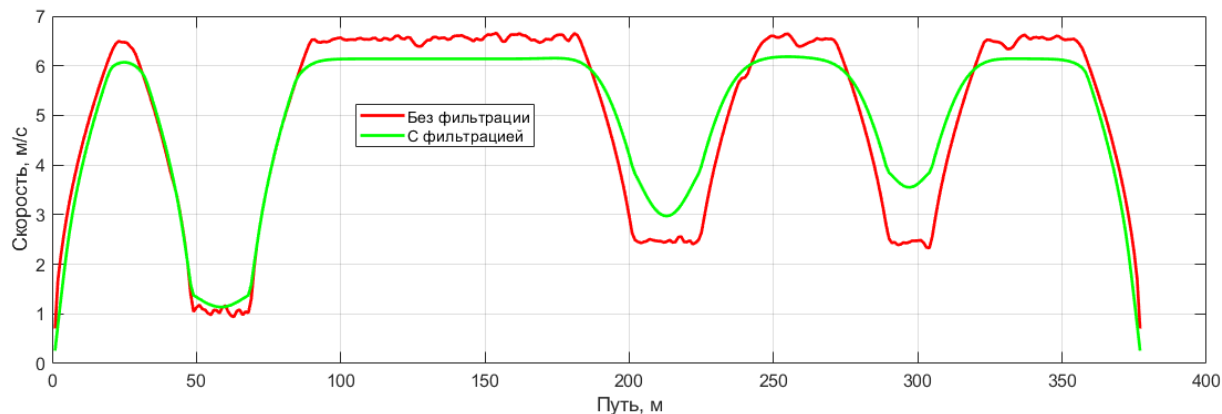
**Рис. 5. Пример получения наборов варьируемых параметров (скоростей на участках) первого поколения с помощью функции создания (инициализации)**

**Fig. 5. An example of obtaining sets of variable parameters (velocities in sections) of the first generation using the creation (initialization) function**

Функция мутации осуществляет случайное по величине изменение одного или нескольких варьируемых параметров. Величина изменения параметров не должна быть слишком велика, в некоторых реализациях ГА величина изменения уменьшается по мере приближения к последнему поколению [15]. Случайные изменения скорости могут иметь следствием большие и разнонаправленные ускорения между участками. Это приводит к повышенным потерям при движении КМ, которые, хоть и естественным образом, исправляются в результате дальнейшей оптимизации, но недостаточно быстро и эффективно. Можно значительно ускорить сходимость метода, если при каждом применении генетического оператора осуществлять «сглаживание» скоростей на участках. Поскольку генетические операторы применяются многократно, достаточно слабого «сглаживания» (с малой шириной окна). В данном



исследовании хорошо себя показал фильтр скользящего среднего с нулевым смещением по фазе и шириной окна 3. На рис. 6 приведено сравнение результатов оптимизации с фильтром и без фильтра при прочих равных условиях. Можно отметить более плавный полученный скоростной режим в вычислениях с фильтрацией (который также обеспечивает меньшие потери в электродвигателях) при одинаковом количестве поколений.



**Рис. 6. Пример получения скоростного режима с использованием фильтра скользящего среднего и без него**

**Fig. 6. An example of obtaining a speed mode with and without a moving average filter**

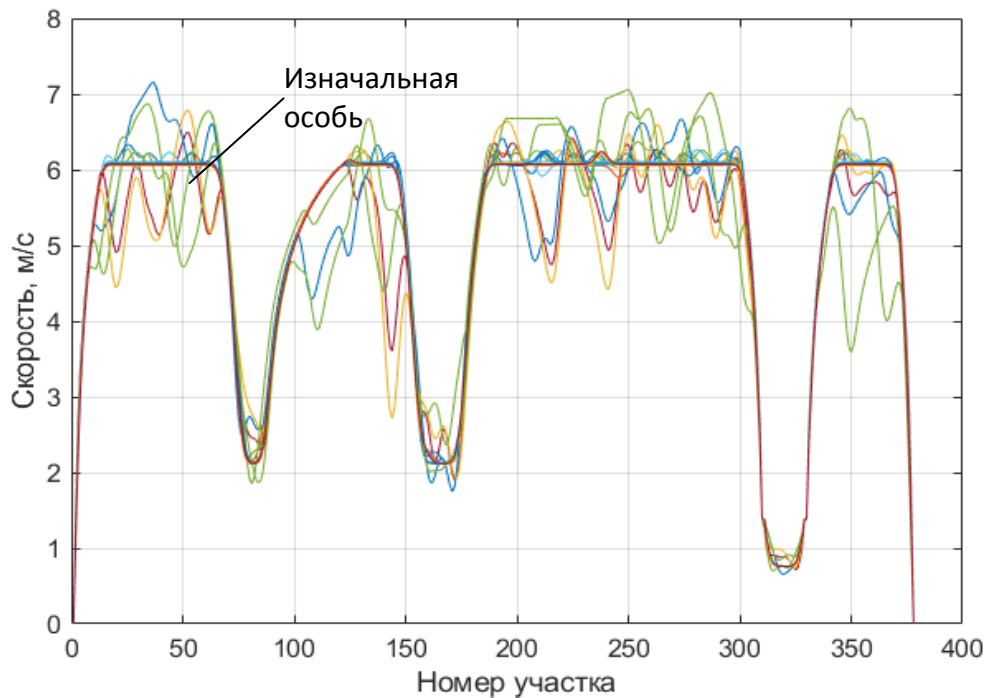
В функции мутации предлагается учитывать ограничения на максимальное ускорение и замедление, а также вызванные тяговыми возможностями колесной машины. С целью получения лучшего разнообразия варьируемых параметров для ранних поколений допустимое продольное ускорение ограничивалось  $4 \text{ м/с}^2$ , для последних 10 % поколений максимальное ускорение было установлено  $1 \text{ м/с}^2$ .

В итоге предложенная функция мутации осуществляет следующие действия:

- изменение случайных генов особи (каждый ген имеет вероятность подвергнуться мутации в 1 %), величина максимального изменения уменьшается с каждым поколением;
- применение «сглаживающего» фильтра скользящего среднего;
- нормирование скорости для обеспечения заданного времени на маршруте;
- учет ограничений по максимальным ускорениям/замедлениям и тяговым возможностям привода беспилотной КМ.

Следует обратить внимание на то, что применение ограничения по максимальным ускорениям/замедлениям после нормирования скоростей обеспечит некоторое отклонение по времени на маршруте. Однако практика показала, что многократное применение рассмотренной функции мутации в каждом поколении приводит к практически полному соответствию заданному времени в последнем поколении. На рис. 7 представлены значения варьируемых параметров (скорость на участках) для раннего этапа оптимизации, которые получены после применения оператора мутации. Следует отметить наличие существенных отличий между особями, которые являются необходимыми для дальнейшего уменьшения целевой функции. Функция рекомбинации должна получать новую особь путем сочетания генома представителей (обычно двух) одного поколения.

Существуют различные подходы к созданию такой функции – применять оператор рекомбинации к случайным или лучшим представителям поколения, учитывать только тех потомков, которые обеспечивают лучшую приспособленность, использовать больше генов особи с лучшей приспособленностью и т.д. В некоторых источниках [17], по аналогии с эволюцией макроскопических животных, функция рекомбинации ГА считается ключевой, а мутация называется вспомогательным оператором. В данной работе итеративным путем получено, что рекомбинацию целесообразно использовать только для достижения некоторой дополнительной изменчивости между поколениями.



**Рис. 7. Пример применения к популяции функции мутации на одном из ранних этапов оптимизации**

**Fig. 7. An example of applying a mutation function to a population at one of the early stages of optimization**

В задачах оптимизации со сложно сочетающимися или дискретными варьируемыми параметрами [16] распространена ситуация, когда произвольный обмен генами приводит к созданию некорректных особей, которые могут не укладываться в заданные ограничения оптимизационной задачи. Это значительно усложняет написание функций рекомбинации. В данной работе ситуация аналогичная – замена варьируемого параметра особи (например, скорости КМ) приводит к изменению времени на маршруте и, возможно, к превышению заданного максимального ускорения. Последующее нормирование и учет ограничений на ускорения могут значительно сократить разнообразие получившихся особей, поэтому предлагается часть ограничений не учитывать.

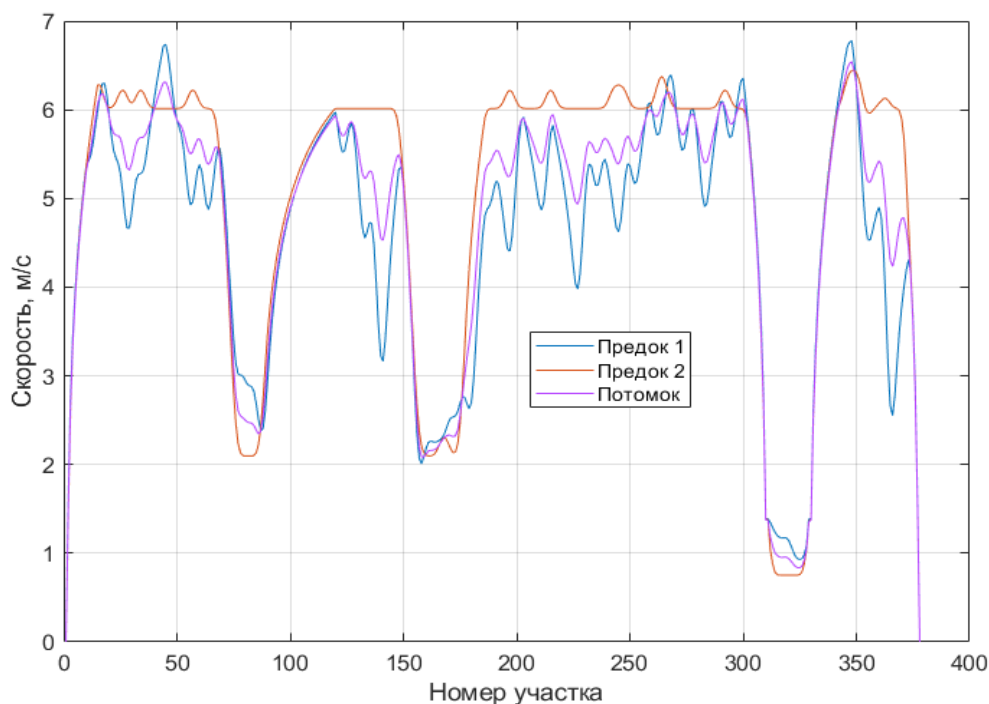
Таким образом, функция рекомбинации (рис. 8) выполняет следующие операции:

- составление особи из генов двух предков (каждый ген имеет 50 % вероятность оказаться в потомке);
- применение «сглаживающего» фильтра скользящего среднего;
- нормирование скорости для обеспечения заданного времени на маршруте.

В настоящем исследовании принято, что 1 % лучших особей (с округлением до большего целого числа) переносится в следующий шаг оптимизации без изменений, к 10 % особей поколения применяется оператор рекомбинации, а к остальным – оператор мутации.

### **Общая схема алгоритма оптимизации**

Условие окончания алгоритма оптимизации обычно заключается в отсутствии значимого изменения значения функции приспособленности лучшего представителя популяции на протяжении нескольких поколений, либо расчет можно останавливать просто по истечении заданного количества поколений.



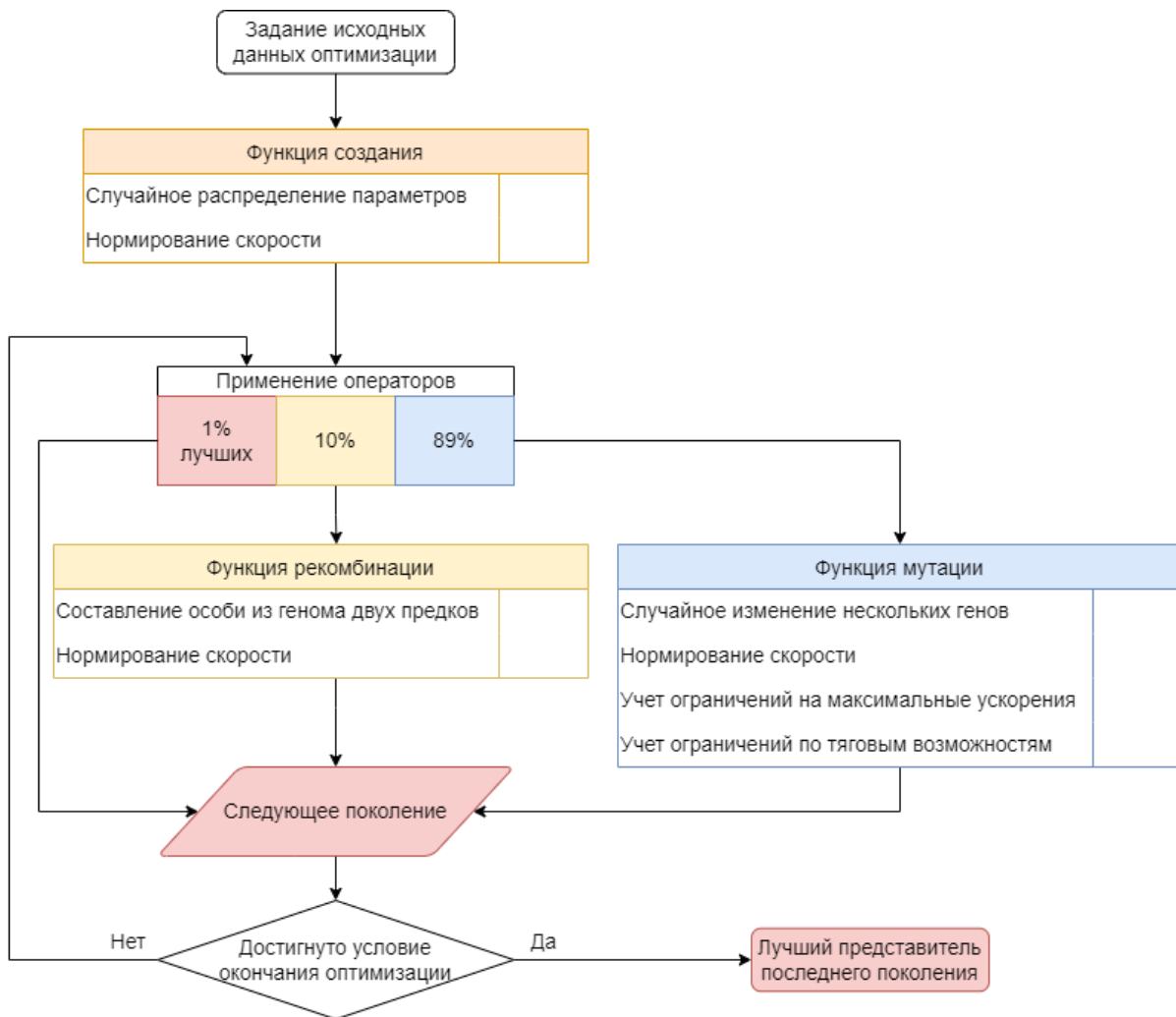
**Рис. 8. Пример получения потомка из предков с помощью функции рекомбинации**

**Fig. 8. An example of obtaining a descendant from ancestors using the recombination function**

В дальнейшем для надежности используется второй вариант остановки вычислений, так как для генетического алгоритма характерны периоды, когда много поколений подряд существенных изменений нет, а затем происходит непредсказуемый «всплеск» разнообразия особей и последующее существенное улучшение функции приспособленности. С учетом этого предлагается следующий алгоритм получения закона движения и управления тяговыми двигателями БКМ по известному маршруту с применением генетического алгоритма (рис. 9). Схема показана для более общего случая определения скоростного режима. Определение параметра использования моментного привода  $h_k$  предлагается осуществлять аналогичным образом, но без необходимости нормирования скорости, и учета остальных ограничений.

#### **Применение генетического алгоритма для определения оптимального закона движения беспилотной колесной машины по заданному маршруту**

Настоящая работа ограничена описанием основных подходов применения ГА для определения оптимального закона движения БКМ. Основные исследования и результаты предполагается привести в следующем исследовании. На данном этапе алгоритм апробируется для определения области его эффективного применения, а именно – для оценки требуемого числа поколений (итераций алгоритма оптимизации) и размера популяции (числа особей в каждом поколении). Увеличение количества поколений позволяет функции приспособленности более точно приблизиться к некоторому локальному минимуму. При этом делать чрезмерно много поколений нецелесообразно, так как для задач локальной оптимизации существуют более вычислительно эффективные алгоритмы (так, в инструментах программного комплекса MATLAB [15] есть возможность последующего автоматического вызова другого алгоритма оптимизации с использованием результатов работы ГА). Большое количество особей в каждом поколении позволяет ГА эффективнее искать глобальный минимум целевой функции. Увеличение обоих параметров (размера популяции и числа поколений) значительно увеличивает время вычислений, что затрудняет использование алгоритма в исследовательских целях и может не позволить использовать его на практике для действующей БКМ.



**Рис. 9. Блок-схема алгоритма оптимизации, используемого в работе для определения скорости и степени использования двигателей беспилотной колесной машины при движении по известному маршруту**

**Fig. 9. Block diagram of the optimization algorithm used to determine the speed and degree of use of the engines of an unmanned wheeled vehicle when moving along a known route**

С целью определения рационального сочетания параметров ГА были проведены пробные расчеты скоростного режима при движении БКМ на заданном маршруте. Результаты представлены в табл. 1, причем следует отметить, что рассчитанные случаи имеют одинаковое общее количество существовавших особей (20000 шт. за все поколения).

**Таблица 1.**

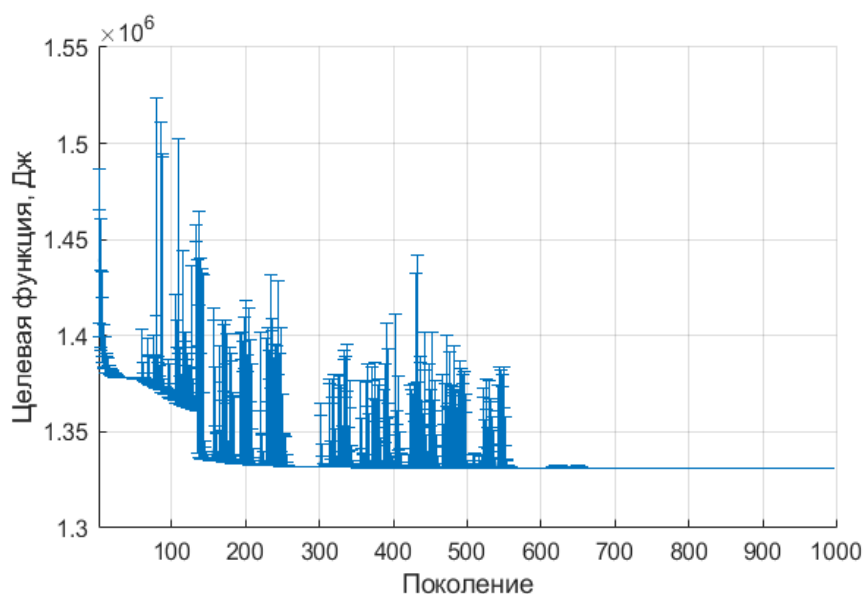
**Затраты энергии на движение и энергия потерь в тяговых электродвигателях. Результаты оптимизации при различных настройках алгоритма**

**Table 1.**

**Energy costs for movement and energy losses in traction motors. Optimization results for different algorithm settings**

Размер популяции	20	200	100	1000
Число поколений	1000	100	200	20
Затраты энергии, Дж	5040699	5020655	5009855	5062251
Потери энергии ТЭД, Дж	1408869	1394662	1387240	1431165

Табл. 1 позволяет судить о том, что для достижения лучшей эффективности вычислений (скорейшей сходимости алгоритма оптимизации) следует соблюдать баланс между количеством особей и поколений. В дальнейших исследованиях задачу определения скоростного режима предлагается решать с использованием 200 поколений по 100 особей. Определение степени использования ТЭД МП и БП требует меньше времени, затраченного на вычисления, так как динамика БКМ от параметра  $h_k$  не зависит, нет необходимости осуществлять дополнительное нормирование скорости (и численно решать уравнения). Поэтому для случая варьирования  $h_k$  было назначено увеличенное количество поколений (1000 поколений и 100 особей в каждом). На рис. 10 показана типичная картина такой оптимизации (в качестве целевой функции использовалось значение потерь в электродвигателях, формула (1)). Более 1000 поколений для ГА в данном случае назначать нецелесообразно.



**Рис. 10.** Пример оптимизации с варьированием степени использования электродвигателей (показаны максимальные и минимальные значения целевой функции для каждого поколения)

**Fig. 10.** An example of optimization with varying the degree of use of electric motors (the maximum and minimum values of the objective function for each generation are shown)

### Заключение

В статье представлен метод определения оптимального скоростного режима и степени использования электродвигателей беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках, базирующийся на генетическом алгоритме. Алгоритм оптимизации предполагает наличие заданного маршрута, разбитого на участки равной длины, каждый из которых характеризуется кривизной, углом наклона опорной поверхности и ограничением максимальной скорости движения машины. В результате работы алгоритма определяется требуемая скорость движения колесной машины и коэффициент распределения тяги между электродвигателями на каждом участке пути. В качестве целевой функции оптимизации используется суммарная энергия потерь в тяговых электродвигателях при движении по маршруту.

На данном этапе представлены только предварительные результаты исследований, выполненных с помощью алгоритма. Основная цель вычислений заключалась в оценке соотношения требуемого количества поколений и требуемого числа особей в каждом поколении для эффективного использования алгоритма. Полученные данные позволяют перейти непосредственно к разработке оптимального закона управления БКМ.

**Библиографический список**

1. Automated port terminal in Qingdao handles 790,000 TEUs within first year. [Electronic document] Access mode [http://www.xinhuanet.com/english/2018-05/12/c\\_137174428.htm](http://www.xinhuanet.com/english/2018-05/12/c_137174428.htm) (дата обращения: 06.06.2023).
2. **Bertazzi, L.** An exact approach for cyclic inbound inventory routing in a level production system / L. Bertazzi, D. Laganà, J.W. Ohlmann, R. Paradiso // *European Journal of Operational Research*. Volume 283. Issue 3. 2020. P. 915-928. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.11.060
3. **Горелов, В.А.** Метод определения параметров электромеханической трансмиссии фронтального погрузчика / В.А. Горелов, Б.Б. Косицын, А.А. Стадухин, О.И. Чудаков // *Тракторы и сельхозмашины*. 2021. Вып. 5. С. 38-45.
4. **M. De Carlo, G. Mantriota.** Electric vehicles with two motors combined via planetary gear train // *Mechanism and Machine Theory*. V. 148. 2020 DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.103789
5. **Косицын, Б.Б.** Метод определения энергоэффективного закона движения электробуса по городскому маршруту: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 165 с.
6. **Vahid, S. A.** Optimal path planning for unmanned surface vehicle using new modified local search ant colony optimization / S. Vahid, A. Dideban // *J Mar Sci Technol* 27, 1207-1219. 2022. DOI: 10.1007/s00773-022-00898-2
7. **Hellström, T.** Path planning for off-road vehicles with a simulator-in-the-loop. Electronic document [Access mode] [https://www.researchgate.net/publication/268426994\\_Path\\_planning\\_for\\_off-road\\_vehicles\\_with\\_a\\_simulator-in-the-loop](https://www.researchgate.net/publication/268426994_Path_planning_for_off-road_vehicles_with_a_simulator-in-the-loop) (дата обращения: 06.06.2023).
8. **Qian, Q.** Optimal path planning for two-wheeled self-balancing vehicle pendulum robot based on quantum-behaved particle swarm optimization algorithm / Q. Qian, J. Wu, Z. Wang // *Pers Ubiquit Comput* 23, 2019. 393–403 p. DOI: 10.1007/s00779-019-01216-1
9. **Dzupire. N. Ch.** A Multi-Stage Supply Chain Network Optimization Using Genetic Algorithms/ Nelson Christopher Dzupire, Yaw Nkansah-Gyekye // *Mathematical Theory and Modeling*. Vol.4, No.8, 2014.
10. **Kuo, R.J.** A hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimisation for solving bi-level linear programming problem—A case study on supply chain model / R.J. Kuo, Y.S. Han // *Applied Mathematical Modelling*. 2011. 35(8). 3905-3917 p.
11. **Chang, C.S.** Optimising train movements through coast control using genetic algorithms / C.S. Chang, S.S. Sim // *IEE Proceedings-Electric Power Applications*. 1997. № 144. P. 65-73.
12. An optimal automatic train operation (ATO) control using genetic algorithms (GA) / Seong Ho [et al.] // *Proceedings of IEEE. IEEE Region 10 Conference. 160 TENCON 99. «Multimedia Technology for Asia-Pacific Information Infrastructure» (Cat. No.99CH37030)*. 1999. № 1. P. 360-362.
13. **Падалкин, Б.В.** Метод оценки эффективности применения электромеханических трансмиссий транспортных средств на этапе проектирования / Б.В. Падалкин, В.В. Иваненков, Б.Б. Косицын, А.А. Стадухин, К.С. Балковский // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2020. Вып. № 2 (44). С. 58-67. DOI: 10.31992/2074-0530-2020-44-2-58-68
14. **Косицын, Б.Б.** Научные методы повышения подвижности боевых колесных машин путем совершенствования тормозных свойств: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: МГТУ, 2021. – 280 с.
15. Mathworks. Genetic Algorithm Options [Electronic document] Access mode <https://www.mathworks.com/help/gads/genetic-algorithm> (дата обращения: 06.06.2023).
16. **Ombuki, B.** Multi-Objective Genetic Algorithms for Vehicle Routing Problem with Time Windows / B. Ombuki, V.J. Ross, F. Hanshar // *Appl Intell* 24, 2006. Pp.17-30.
17. **Андреев, А.А.** Применение генетических алгоритмов при оптимизации нелинейных функций // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2009. Т.14. №.5-2. С. 1036-1040.

**Дата поступления  
в редакцию: 23.06.2023**

**Дата принятия  
к публикации: 28.07.2023**

## НАШИ АВТОРЫ

### ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

**Гордеев Максим Михайлович** – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Винокуров Максим Сергеевич** – магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Епифанов Сергей Александрович** – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Епифанова Анастасия Сергеевна** – научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

**Катаева Лилия Юрьевна** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук

**Кокоулина Мария Владимировна** – младший научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Кузнецов Иван Владимирович** – старший преподаватель Дальневосточного государственного университета путей сообщения

**Куркин Андрей Александрович** – проректор по научной работе Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, профессор, д-р физ.-мат. наук

**Куркина Оксана Евгеньевна** – ведущий научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук

**Масленников Дмитрий Александрович** – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук

**Пономарчук Юлия Викторовна** – директор Института Управления Автоматизации и Телекоммуникаций, Дальневосточного государственного университета путей сообщения, канд. физ.-мат. наук

**Санников Алексей Николаевич** – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Тимофеева Ольга Павловна** – заведующая кафедрой «Информатика и системы управления» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент

**Фалеева Елена Валерьевна** – заведующая кафедрой «Вычислительная техника и компьютерная графика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения, доцент, канд. техн. наук

**Халиман Влада Витальевна** – преподаватель Дальневосточного государственного университета путей сообщения

### ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

**Волков Василий Юрьевич** – начальник группы АО ОКБ «Гидропресс»

**Голибродо Лука Антонович** – ведущий инженер-конструктор АО ОКБ «Гидропресс»

**Дикова Татьяна Сергеевна** – студент Обнинского института атомной энергетики НИЯУ МИФИ

**Кабина Марина Сергеевна** – студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Крутиков Алексей Александрович** – ведущий инженер-конструктор АО ОКБ «Гидропресс»

**Кудрявцев Андрей Юрьевич** – ведущий научный сотрудник Российского федерального ядерного центра «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

**Полунинчев Виталий Иванович** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Терехова Анна Михайловна** – старший преподаватель Обнинского института атомной энергетики НИЯУ МИФИ

**Цветкова Дарья Дмитриевна** – студент Обнинского института атомной энергетики НИЯУ МИФИ

## **МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО**

**Акрамов Бахром Ниязович** – доцент Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими, канд. техн. наук

**Баженов Евгений Евгеньевич** – профессор Уральского аграрного университета, д-р техн. наук, доцент

**Бондарь Владимир Николаевич** – директор научно-образовательного центра Южно-Уральского государственного университета, доцент, канд. техн. наук

**Исмаатов Исмоилджон Ахмадович** – старший преподаватель Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими, канд. техн. наук

**Коростелев Сергей Анатольевич** – заведующий кафедрой «Наземные транспортно-технологические системы» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, доцент, д-р техн. наук

**Косицын Борис Борисович** – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

**Крудышев Владимир Валерьевич** – начальник кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных технических средств Уральского института ГПС МЧС России, доцент, канд. с.-х. наук

**Лишин Алексей Владимирович** – аспирант Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

**Назаренко Сергей Владимирович** – главный конструктор инновационных автомобилей ПАО «КАМАЗ»

**Новопашин Леонид Алексеевич** – доцент Уральского аграрного университета, канд. техн. наук

**Падалкин Борис Васильевич** – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

**Стадухин Антон Алексеевич** – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

**Талалаев Даниил Викторович** – аспирант Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова



## 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 рубрике журнала и паспорту специальности ВАК**. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), **библиографический список, содержащий только цитируемые или рассматриваемые в тексте работы**. Ссылки нумеруются в порядке цитирования. **Самоцитирование** рекомендуется **ограничить тремя пунктами**. Рекомендуется использовать в библиографическом списке ссылки на научные работы по теме исследования, индексируемые в международных базах научного цитирования. Библиографический список не должен включать неопубликованные работы.
- К статье необходимо **приложить файл с информацией об авторах** на русском языке: ФИО (полностью), должность, место работы (полное название организации, город, страна), идентификатор ORCID, e-mail, ученая степень и звание.
- Текст набирается через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое, верхнее и нижнее – 20 мм. Переносы не допускаются. Используется формат *Word for Windows* и стандартные шрифты *Times New Roman* и *Symbol*.
- Формульные выражения выполняются 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, подрисовочная 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@nttu.ru\*\*](mailto:hranilov@nttu.ru)

**2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл,  
радиационная безопасность**

Максим Александрович Легчанов: [\*\*legchanov@nttu.ru\*\*](mailto:legchanov@nttu.ru)

**2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы**

Владимир Сергеевич Макаров: [\*\*vladimir.makarov@nttu.ru\*\*](mailto:vladimir.makarov@nttu.ru)

16+

**ТРУДЫ НГТУ  
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

**№ 3 (142)**

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**

*Редакция:*

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

rsl@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать: 01.09.2023 Дата выхода в свет 11.09.2023. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>.

Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 8,25. Тираж 300 экз. Заказ .

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.

Типография НГТУ.

Адрес университета и типографии:

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24

**Индекс 44757**  
**Объединенный каталог «Пресса России»**

**Свидетельство о регистрации**  
**периодического печатного издания**  
**ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013 г.**