

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

№ 1 (152)

Нижний Новгород 2026

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2026. № 1 (152). – 138 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

**Н.Ю. Бабанов, В.В. Беляков, В.А. Горбунов, С.М. Дмитриев,
Н.Ю. Золотых, М.А. Легчанов, В.С. Макаров, В.Р. Милов, Ю.И. Молев, В.Н. Наумов, П.В. Пакшин,
Н.А. Прибатурин, Н.В. Старостин, А.С. Суркова, В.П. Хранилов, А.Е. Хробостов**

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

М.А. Легчанов – ответственный секретарь рубрики «Ядерная энергетика и атомное машиностроение»

Ю.И. Молев – ответственный секретарь рубрики

«Машиностроение и транспорт: теория, технологии, производство»

В.И. Казакова (ответственный редактор)

А.В. Крылова (ответственный секретарь)

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, 2026

**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

№ 1 (152)

Nizhny Novgorod 2026

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, M.A. Legchanov, V.S. Makarov, V.R. Milov, Yu.I. Molev, V.N. Naumov, P.V. Pakshin, N.A. Pribaturin, N.V. Starostin, A.S. Surkova, N.Yu. Zolotykh

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

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

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

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

EDITOR AND PUBLISHER:

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

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

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

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ	7
Куликов М.С., Прилуцкий М.Х. Распределение производственных ресурсов с учетом минимизации времен пролеживания деталей	7
Насонов М.А., Манцеров С.А. Управление потоками заданий ремонтных бригад в условиях изменчивости графика обслуживания оборудования	17
Родимков Ю.А. Использование циклического буфера для повышения точности восстановления искажений волнового фронта методами глубокого обучения для задач управления деформируемым зеркалом	32
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ	43
Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Игонин М.А. Исследование влияния масштаба модели и числа Рейнольдса на процессы гидродинамики и неизотермического перемешивания теплоносителя на выходе из колонны ТВС призматической активной зоны ВТГР	43
Матюшев Л.А., Игнатъев А.А., Митрюхин А.Г., Фиськов А.А., Шамрай Е.Л., Коробейников К.Ю., Осмаков Н.А. Расчетный анализ осаждения дебриса при его транспортировке к фильтрам САОЗ для АЭС с реакторами типа ВВЭР	52
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	67
Дианов В.А., Бокарев А.И., Нескин И.В., Дьяков Ф.К., Мазур Е.П. Сбор данных о дорожной эксплуатации прототипа отечественного электромобиля для возможности проведения ускоренных ресурсных испытаний в заданном эквиваленте поврежденности	67
Елисеев М.Е., Ерофеева Л.Н., Елисеева И.Н., Баранова М.С. Определение параметров подвижности транспортных средств в крупном городе путем анализа GPS-треков маршрутных транспортных средств	85
Падалкин Б.В., Стадухин А.А., Сахаров Д.С. Сравнительный анализ механизмов поворота «Бортовой фрикцион» и «ЗК»	95
Трусевич И.А., Абдулов С.В., Тараторкин И.А., Держанский В.Б. Совершенствование конструкции системы кондиционирования перспективной транспортной машины на основе расчетно-экспериментального подхода	108
Шаповалов С.В. Применение метода анализа иерархий для оценки значимости эксплуатационных свойств колесного шасси для транспортировки тяжелого оборудования	124
НАШИ АВТОРЫ	133

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE, MANAGEMENT AND SYSTEM ANALYSIS	7
Kulikov M.S., Prilutskii M.Kh. Production resource allocation considering minimization of part-waiting time	7
Nasonov M.A., Mantserov S.A. Task flow management for maintenance teams under changing equipment service schedules	17
Rodimkov Yu.A. Using circular buffer to improve accuracy of wavefront distortion reconstruction using deep learning methods for deformable mirror control problems	32
NUCLEAR POWER AND ATOMIC POWER ENGINEERING	43
Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Legchanov M.A., Igonin M.A. Study of model scale and Reynolds number influence on coolant hydrodynamics and non-isothermal mixing at fuel assembly column outlet of HTGR prismatic core	43
Matyushev L.A., Ignatyev A.A., Mitryukhin A.G., Fis'kov A.A., Shamray E.L., Korobeynikov K.Yu., Osmakov N.A. Computational analysis of debris deposition during its transportation to ECCS filters for WWER nuclear power plants	52
MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION	67
Dianov V.A., Bokarev A.I., Neskin I.V., Dyakov P.K., Mazur E.P. Collecting road operation data of domestic electric vehicle prototype for possibility of conducting accelerated resource tests with given damage equivalent	67
Eliseev M.E., Erofeeva L.N., Eliseeva I.N., Baranova M.S. Determining vehicle mobility parameters in large city by analyzing GPS tracks of public transport vehicles	85
Padalkin B.V., Stadukhin A.A., Sakharov D.S. Comparative analysis of «Side friction clutch» and «ZK» steering mechanisms	95
Trusevich I.A., Abdulov S.V., Taratorkin I.A., Derzhansky V.B. Improving the design of the air conditioning system of a promising transport vehicle based on a calculation and experimental approach	108
Shapovalov S.V. Analytic hierarchy process application to assess importance of performance properties of wheeled chassis for transporting heavy equipment	124
AUTHORS	133

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

УДК 004.02

DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_7

EDN WYXFEI

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ
С УЧЕТОМ МИНИМИЗАЦИИ ВРЕМЕН ПРОЛЕЖИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ****М.С. Куликов**ORCID: 0000-0002-4777-771X e-mail: vokil@mail.ruНижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
*Нижний Новгород, Россия***М.Х. Прилуцкий**ORCID: 0000-0002-7694-3916 e-mail: pril@iani.unn.ruНижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Нижний Новгород, Россия

Разработан программный продукт SMART-ресурс, предназначенный для решения задач распределения производственных ресурсов при автоматизации процессов изготовления высокотехнологичных изделий, собственных предприятиям машиностроительного дивизиона ГК «Росатом». Рассматривается задача минимизации времен межоперационного пролеживания деталей, позволяющая уменьшать запасы незавершенного производства, предотвращая тем самым рост себестоимости выпускаемой продукции. В рамках разработанного SMART-ресурса программно реализован алгоритм, позволяющий решать поставленную задачу.

Ключевые слова: NP-трудная задача; производственное планирование; распределение ресурсов; фронтальный алгоритм; фронтальный алгоритм с рангами и обратной связью; незавершенное производство; программное средство.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Куликов, М.С. Распределение производственных ресурсов с учетом минимизации времен пролеживания деталей / М.С. Куликов, М.Х. Прилуцкий // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 7-16. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_7 EDN: WYXFEI

**PRODUCTION RESOURCE ALLOCATION CONSIDERING
MINIMIZATION OF PART-WAITING TIME****M.S. Kulikov**ORCID: 0000-0002-4777-771X e-mail: vokil@mail.ruNizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky
*Nizhny Novgorod, Russia***M.Kh. Prilutskii**ORCID: 0000-0002-7694-3916 e-mail: pril@iani.unn.ruNizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The SMART-resource software has been developed to address the challenges of production resource allocation during the automation of high-tech products manufacturing processes typical for enterprises of the Rosatom engineering division. Minimizing the part-waiting time between operations allows to reduce the stock of work in progress, thereby preventing an increase in the cost of manufactured products. The algorithm for solving the given problem is implemented in the SMART-resource.

Key words: NP-hard task; production planning; resource allocation; frontal algorithm; frontal algorithm with ranks and feedback; work in progress; software tool.

FOR CITATION: Kulikov M.S., Prilutskii M.Kh. Production resource allocation considering minimization of part-waiting time. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 7-16. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_7 EDN: WYXFEI

Введение

Вопросы решения оптимизационных задач производственного планирования широко обсуждаются в современной литературе. Эти задачи, как правило, относятся к классу NP-трудных задач, для решения которых не существует точных алгоритмов, отличных от полного перебора, который для реальных большеразмерных задач практически невозможен. Это обуславливает применение для решения реальных прикладных, большеразмерных задач эвристических процедур. Применение гибридных алгоритмов и алгоритмов, связанных с машинным обучением, обсуждается в работах [1-5]. Методы целочисленного программирования применительно к решению таких задач небольшой размерности обсуждаются в работах [6, 7]. Необходимо отметить также работы Нижегородской школы по вопросам распределения производственных ресурсов для высокотехнологичных предприятий [8-17].

1. Содержательное описание проблемы производственного планирования для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства

Содержательно проблема производственного планирования может быть описана следующим образом. Заданный план производства определяет множество операций, подлежащих выполнению для изготовления изделий. Задано множество используемых для выполнения взаимозависимых операций ресурсов предприятия. Технология изготовления изделий определяется ориентированным графом без петель и контуров, который задает на множестве операций частичный порядок – для каждой операции множество ей непосредственно предшествующих и непосредственно за ней следующих операций. Если для операции множество ей предшествующих операций пусто, то она является «начальной» и определяет начало изготовления соответствующего изделия. Для нее задан начальный срок изготовления, раньше которого она не может начать выполняться. Начальные сроки выполнения операций могут быть связаны с обеспеченностью операций материальными ресурсами, которые в заданные моменты поступят в систему. Если для операции множество последующих операций пусто, то она является «завершающей» и для нее задан директивный срок, который определяет время завершения этой операции, а тем самым и время, к которому соответствующее изделие должно быть изготовлено. Для каждой операции указаны ресурсы, которые используются для ее выполнения, причем операции могут выполняться с разной интенсивностью потребления ресурсов, а тем самым и с разной длительностью. Для каждой операции определена минимально и максимально возможная интенсивность расходования ресурсов и ресурсоемкость операции по каждому ресурсу, который используется для выполнения этой операции. Интенсивность потребления ресурсов связана, например, с т.н. ручными операциями, выполнение которых может потребовать нескольких исполнителей, соответственно, время выполнения операции может в силу этого меняться. Для изделий заданы «приоритеты», определяющие «важность» изделий с точки зрения возможных штрафных санкций за нарушения заданных директивных сроков изготовления изделий. Естественными условиями таких задач являются условия выполнения операций до полного изготовления без перерывов и невозможность использовать один и тот же ресурс для выполнения разных операций.

Не уменьшая общности, будем отождествлять проблему производственного планирования процесса изготовления изделий с проблемой эффективного распределения производственных ресурсов. Общая проблема эффективного распределения производственных ресурсов заключается в составлении производственного плана: для каждой операции определить время начала выполнения, выбрать, какие доступные ресурсы в каком количестве будут из-

расходованы для выполнения операции с целью наилучшего выполнения заданных директивных сроков изготовления изделий и с учетом минимизации времен межоперационного пролеживания деталей. Для решения этой проблемы дано содержательное описание объекта оптимизации, построена математическая модель проблемы распределения ограниченных производственных ресурсов. В рамках модели поставлена каноническая для таких предприятий оптимизационная задача 1 минимизации отклонений от заданных директивных сроков изготовления запланированных изделий, а также актуальная оптимизационная задача 2 минимизации времен межоперационного пролеживания деталей, позволяющая уменьшать запасы незавершенного производства, тем самым предотвращая рост себестоимости выпускаемой продукции. Разработан и программно реализован алгоритм, позволяющий решать поставленные задачи.

2. Математическая модель

2.1. Исходные параметры математической модели

Пусть $T = \{1, \dots, T_0\}$ – множество тактов планирования;

$I = \{1, \dots, n\}$ – множество операций всех подлежащих выполнению изделий;

$J = \{1, \dots, m\}$ – множество ресурсов, используемых для выполнения операций;

$K = \{1, \dots, k\}$ – множество заказов плана производства;

$T = \{1, \dots, T_0\}$ – множество тактов планирования;

V_l – множество операций заказа l , $l \in K$, при этом $\bigcup_{l=1}^k V_l = \{1, \dots, n\}$ – множество всех операций всех заказов определяют общее множество операций;

$V_i \cap V_{i''} = \emptyset, i', i'' \in I$ и $l' \neq l''$ – одна операция не может входить в разные заказы;

$G_l = (V_l, A_l), A_l \subseteq V_l^2$ – ориентированный граф без петель и контуров, определяющий технологию заказа l , $l \in K$;

p_l – штраф за отставание на 1 такт изготовления изделия l от заданного для этого изделия директивного срока, $l \in K$;

t_i^H – ранее начало выполнения операции i , $i \in I^H$, где I^H – множество начальных операций, для которых заданы начальные сроки;

t_i^A – (директивный) срок завершения операции i , $i \in I^A$, где I^A – множество завершающих операций, для которых заданы директивные сроки;

t_i^P – ранее начало выполнения операции i , связанное с обеспеченностью операции материальными ресурсами, $i \in I^P$, где I^P – множество операций, начало выполнения которых зависит от поступления в систему материальных ресурсов, необходимых для их выполнения;

r_{ij} – ресурсоемкость операции i по ресурсу j , $i \in I, j \in J$;

W_{jt} – количество ресурса j , которое в такт t доступно к использованию, $j \in J, t \in T$;

m_{ij} и M_{ij} соответственно, минимальная и максимальная интенсивности потребления операцией i ресурса j в один такт планирования, $i \in I, j \in J$.

Замечание 1. Будем полагать, что для операций, для которых нельзя изменять интенсивность $m_{ij} = M_{ij}, i \in I, j \in J$.

2.2. Варьируемые параметры математической модели

$x_i \in T$ – время начала выполнения операции i , $i \in I$.

z_{ijt} – интенсивность потребления в такт t операцией i ресурса j , $t \in T, i \in I, j \in J$.

Тогда время выполнения операции i , если она выполнялась с использованием ресурсов j_1, j_2, \dots, j_s с определенными интенсивностями, будет равно $t_i = \max_{t \in T} \frac{r_{ij}}{\sum_{t \in T} z_{ijt}}$, где максимум берется по всем j_1, j_2, \dots, j_s .

2.3. Ограничения математической модели

$x_i \in T, i = \overline{1, n}$.

(1)

(Времена начала выполнения операций принадлежат множеству тактов планирова-

ния)

$$z_{ijt} \geq 0, i \in I, j \in J, t \in T. \quad (2)$$

(Естественные условия неотрицательности переменных)

$$x_i \geq t_i^p, i \in I^p. \quad (3)$$

(Начала выполнения операций ограничены заданными сроками, связанными с обеспеченностью операций материальными ресурсами)

$$x_i \geq t_i^h, i \in I^h. \quad (4)$$

(Начала изготовления изделий ограничено заданными начальными сроками)

$$x_{i'} + t_{i'} \leq x_i, i': (i', i) \in A_l, i \in V_l, l \in K. \quad (5)$$

(Если операция i' предшествует операции i , то время начала выполнения операции i может наступить не раньше, чем завершит свое выполнение операция i')

$$|\{i | r_i = j, x_i \leq t \leq x_i + t_i\}| \leq 1, t \in T, j \in J. \quad (6)$$

(Для каждой операции используемый для ее выполнения ресурс не может быть использован, пока эта операция выполняется)

$$\sum_{i \in I} z_{ijt} \leq W_{jt}, i \in I. \quad (7)$$

(Ограничения на потребление операциями необходимых для выполнения ресурсов)

3. Постановка задач

3.1. Прямая задача 1 минимизации отклонений от заданных директивных сроков изготовления запланированных изделий

Рассмотрим критерий:

$$F(X) = \sum_{l=1}^k p_l \max \left(0, \max_{i \in V_l} (x_i + t_i - t_i^d) \right). \quad (8)$$

(Суммарный штраф, связанный с нарушениями заданных директивных сроков по изделиям)

Задача 1. Найти такое допустимое решение системы ограничений (1)-(7), для которого принимает минимальное значение критерий (8). Поставленная задача 1 относится к классу NP-трудных задач, т.к. к ней за полиномиальное время сводится известная классическая задача о камнях [18].

В качестве алгоритма решения поставленной задачи используется разработанный авторами фронтальный алгоритм с рангами и обратной связью.

3.2. Обратная задача 2 минимизации времен межоперационного пролеживания деталей

Задача 2 решается после решения задачи 1 при ее известном решении X_0 .

Рассмотрим дополнительное ограничение математической модели:

$$F(X) \leq F(X_0). \quad (9)$$

(Значение функционала на оптимальном решении задачи 2 не должно превышать оптимум решения задачи 1)

В качестве критерия для задачи 2 рассмотрим функционал:

$$F(X) = \sum_{i \in (I^p \cup I^h)} x_i, \quad (10)$$

определяющий суммарное время начала выполнения всех начальных операций и операций, связанных с обеспеченностью их ресурсами.

Задача 2. Найти такое допустимое решение системы ограничений (1)-(7), (9), для которого принимает максимальное значение критерий (10).

Предлагаемый фронтальный алгоритм с рангами и обратной связью позволяет решать поставленные задачи.

4. Фронтальный алгоритм с рангами и обратной связью

В основе фронтального алгоритма с рангами и обратной связью лежит классический фронтальный алгоритм [8-10].

4.1. Классический фронтальный алгоритм

Классический фронтальный алгоритм к определенному такту времени формирует множество операций (фронт операций), любая из которых может начать выполняться, начиная с этого такта, т.е. все ей предшествующие операции уже выполнены и ресурсов для ее выполнения достаточно. Затем на множестве этих операций задается линейный порядок, преобразующий фронт операций – множество операций, в вектор операций. Компоненты вектора определяют порядок возможного включения очередной операции в строящееся расписание.

Существуют разные схемы упорядочения операций из фронта. В основном они формируют для каждой операции из фронта некоторые коэффициенты (ранги), которые и определяют процедуру упорядочения. Схема работы классического фронтального алгоритма следующая. Рассматривается фронт операций в определенный такт планирования. На множестве операций фронта задается линейный порядок, преобразующий фронт операций в вектор операций. Берется операция, соответствующая первой компоненте вектора, и включается в строящееся расписание. Так как классический фронтальный алгоритм не обладает обратной связью, включенная в строящееся расписание операция уже не может быть заменена на другую операцию. Ресурсы, которые должна использовать включенная в расписание операция, исключаются из рассмотрения, и осуществляется переход к операции, соответствующей следующей компоненте вектора. Проверяется, достаточно ли для ее выполнения ресурсов. Если да, то операция включается в расписание, а используемые ею ресурсы исключаются из рассмотрения. Если ресурсов для выполнения очередной операции недостаточно, осуществляется переход к следующей операции. Процедура повторяется, пока не будут просмотрены все операции из фронта операций. Затем рассматривается очередной такт планирования, для которого формируется фронт операций, и процедура включения операций в строящееся расписание повторяется. Простота в реализации, линейная вычислительная сложность и построение в результате работы алгоритма допустимого расписания, являются достоинствами канонического фронтального алгоритма. Однако отсутствие обратной связи, очевидно, не может гарантировать для задач большой вычислительной сложности, которыми являются задачи эффективного распределения производственных ресурсов, получение решения высокого качества. Для улучшения качества работы классического фронтального алгоритма используется его модификация, «фронтальный алгоритм с рангами и обратными связями» [15, 16].

4.2. Фронтальный алгоритм с рангами и обратной связью

Фронтальный алгоритм с рангами и обратной связью основан на вычислительной схеме, включающей в себя схему классического фронтального алгоритма, схему пересчета рангов операций и схему переупорядочивания операций в зависимости от новых рангов. Построенное каноническим фронтальным алгоритмом расписание анализируется, определяются те операции, которые влияют на нарушение директивных сроков, им присваиваются новые ранги, влияющие на упорядочение операций из фронта операций. Заново применяется классический фронтальный алгоритм, и заново преобразуются ранги у определенных операций. Работа алгоритма прекращается либо по заданному числу шагов работы классического фронтального алгоритма, или в случае, если очередное полученное решение не улучшило показатели предыдущего решения.

Для решения задачи 1 используется фронтальный алгоритм с рангами. Его использование к решению задачи 2 происходит после преобразования задачи 2 к виду задачи 1 следующим образом:

- директивные сроки меняются местами с начальными сроками,
- преобразуются календари, связанные с обеспеченностью системы ресурсами и определяющие периоды, когда возможно выполнение операций,
- к преобразованной задаче 2 применяется фронтальный алгоритм с рангами и обратной связью,
- полученное решение преобразуется с учетом предыдущих изменений.

5. Вычислительный эксперимент

Вычислительный эксперимент проводился на иллюстративном примере, приближенном к реальному объекту с параметрами, представленными в табл. 1.

Таблица 1.
Характеристики примера

Table 1.
Example parameters

Параметр	Значение
Количество операций	300 000
Количество изделий	30
Общее число ресурсов	800

На основании описанной стратегии сначала решалась прямая задача 1 минимизации отклонений от заданных директивных сроков изготовления запланированных изделий. Результаты решения представлены в табл. 2.

Таблица 2.
Результаты решения

Table 2.
Solution results

Изделия №	Исходное решение прямой задачи 1
	Максимальный размер нарушений директивных сроков (такты)
1	167
2	358
3	320
4	616
5	322
6	384
7	579
8	492
9	606
10	562
11	1379
12	850
13	835
14	826
15	831
16	1159
17	682
18	1245
19	1245
20	631
21	1333
22	1406
23	1511
24	937
25	1734
26	1110
27	1270
28	749
29	663
30	1831

Затем решалась обратная задача 2 минимизации времен межоперационного пролеживания деталей.

В табл. 3 приведены различия в результатах решения задачи 1 и задачи 2 по временам межоперационного пролеживания. При этом при решении задачи 2 условия (9), гарантирующие неповышение величины штрафа, соответствующего оптимальному решению задачи 1, полностью выполнены.

Таблица 3.
Различия в результатах решения
Table 3.
Differences in solution results

Изделия, для которых заданы операции с признаками минимизации времен пролеживания	Решение задачи 1 минимизации отклонений от заданных директивных сроков изготовления запланированных изделий	Решение задачи 2 минимизации времен межоперационного пролеживания, без деградации критерия по директивным срокам
№	Пролеживание изделий (такты)	Пролеживание изделий (такты)
1	299	256
2	272	162
3	221	221
4	1	1
5	504	504
6	543	543
7	788	394
8	1659	829
9	534	534
Всего	4821	3444

Вывод: при решении задачи 2 контролируется основной критерий оптимизации (минимизация нарушения директивных сроков), гарантируя отсутствие деградации данного критерия при минимизации незавершенного производства. При этом суммарное время пролеживания контролируемых изделий сократилось на 28.5 %.

Заключение

Рассмотрена проблема эффективного распределения производственных ресурсов при планировании процесса изготовления изделий для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства. Построена математическая модель, в рамках которой ставятся две оптимизационные задачи по критерию минимизации отклонений от заданных директивных сроков и минимизации межоперационного пролеживания деталей. Показано, как с помощью специальных преобразований обе задачи становятся «подобными», т.е. для решения любой из них можно применить тот же самый алгоритм. Такой алгоритм – фронтальный с рангами и обратной связью – разработан и программно реализован. На иллюстративном примере, приближенном к реальному объекту, показаны результаты проведенного вычислительного эксперимента.

Библиографический список

1. **Гладков, Л.А.** Гибридная модель решения задач оперативного производственного планирования / Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова, С.А. Громов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 4(198). – С. 99-110.
2. **Шкурба, В.В.** Календарное планирование. Конструктивная оптимизация. Индустрия праксеотехники // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 10. – С. 122-132.

3. **Гераськин, М.И.** Оптимальные механизмы планирования позаказного производства по финансовым и временным критериям / М.И. Гераськин, В.В. Егорова // Управление большими системами: сборник трудов. – 2015. – № 58. – С. 179-211.
4. **Грачев, С.П.** Методы и средства построения интеллектуальных систем для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами в реальном времени / С.П. Грачев, А.А. Жилиев, В.Б. Ларюхин [и др.] // Автоматика и телемеханика. – 2021. – № 11. – С. 30-67.
5. **Сотсков, Ю.Н.** Область оптимальности перестановки обслуживания на одном приборе требований с неопределенными длительностями // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 5. – С. 60-90.
6. **Кибзун, А.И.** Модель целочисленного линейного программирования как математическое обеспечение системы оптимального планирования потокового производства на этапе оперативного графирования / А.И. Кибзун, В.А. Рассказова // Автоматика и телемеханика. – 2023. – № 5. – С. 113-132.
7. **Куприянов, Б.В.** Оценка и оптимизация производительности рекурсивного конвейера // Автоматика и телемеханика. – 2020. – № 5. – С. 6-25.
8. **Afraimovich, L.** Control Activities Planning Problem. / L. Afraimovich, M. Prilutskii, V. Vlasov // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2021. – Т. 729. LNEE. – С. 341-350.
9. **Прилуцкий, М.Х.** Задачи оптимального планирования как задачи распределения ресурсов в сетевых канонических структурах / М.Х. Прилуцкий, В.С. Власов, О.В. Кривошеев // Информационные технологии. – 2017. – Т. 23, № 9. – С. 650-657.
10. **Прилуцкий, М.Х.** Задачи календарного планирования для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производства / М.Х. Прилуцкий, И.В. Нетронин // Системы управления и информационные технологии. – 2019. – № 3(77). – С. 46-51.
11. **Прилуцкий, М.Х.** Задачи объемно-календарного планирования для предприятий с единичным и мелкосерийным характером производств / М.Х. Прилуцкий, И.В. Нетронин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. – № 4 (127). – С. 36-43.
12. **Кумагина, Е.А.** Задачи распределения разнородных ресурсов в сетевых канонических структурах / Е.А. Кумагина, М.Х. Прилуцкий // Известия ТРТУ. – 2001. – № 4(22). – С. 194-200.
13. **Афраймович, Л.Г.** Система производственного планирования Smart-ресурс / Л.Г. Афраймович, М.С. Куликов, М.Х. Прилуцкий, Н.В. Старостин // VIII Молодежная конференция по управлению проектами: сборник тезисов докладов, Нижний Новгород, 17 ноября 2023 года. – Н. Новгород: ООО «Литера», 2023. С. 7.
14. **Афраймович, Л.Г.** Производственное планирование в условиях неполноты данных / Л.Г. Афраймович, В.Е. Костюков, М.С. Куликов [и др.] // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сборник научных трудов, Москва, 17-20 июня 2024 года. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2024. С. 1829-1834.
15. **Прилуцкий, М.Х.** Управляемый фронтальный алгоритм решения задачи распределения ресурсов в сетевых канонических структурах / М.Х. Прилуцкий, Е.А. Кумагина // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2008. – № 6. – С. 152-155.
16. **Куликов, М.С.** Ранговый итерационный алгоритм решения задачи распределения ресурсов в сетевых системах // Системы управления и информационные технологии. 2011. № 4 (46). С. 37-43.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025611198 РФ. Программный модуль объемно-календарного планирования: заявл. 13.11.2024; опубл. 16.01.2025 / М.Х. Прилуцкий, Н.В. Старостин, Л.Г. Афраймович [и др.]; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».
18. **Гэри, М.** Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон; Пер. с англ. Е.В. Левнера, М.А. Фрумкина. – М.: Мир, 1982. – 416 с.

References

1. Gladkov L.A., Gladkova N.V., Gromov S.A. Gibridnaja model' reshenija zadach operativnogo proizvodstvennogo planirovanija [Hybrid model for operational production planning tasks]. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki [News of the Southern Federal University. Technical Sciences]. 2018; (4(198)): 99-110 (in Russian).
2. Shkurba V.V. Kalendarnoe planirovanie. Konstruktivnaja optimizacija. Industrija prakseotehniki [Calendar planning. Constructive optimization. The industry of praxeotechnology]. Avtomatika i telemekhanika [Automation and Remote Control]. 2010; (10): 122-132 (in Russian).

3. Geras'kin M.I., Egorova V.V. Optimal'nye mekhanizmy planirovaniya pozakaznogo proizvodstva po finansovym i vremennym kriterijam [Optimal planning mechanisms for job-shop production based on financial and time criteria]. *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov* [Large Systems Control: Proceedings]. 2015; (58): 179-211 (in Russian).
4. Grachev S.P., Zhilyaev A.A., Lyaryukhin V.B., et al. Metody i sredstva postroeniya intellektual'nyh sistem dlja reshenija slozhnyh zadach adaptivnogo upravlenija resursami v real'nom vremeni [Methods and tools for building intelligent systems to solve complex problems of adaptive real-time resource management]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2021; (11): 30-67 (in Russian).
5. Sotskov Y.N. Oblast' optimal'nosti perestankovki obsluzhivaniya na odnom pribore trebovanij s neopredelennymi dlitel'nostjami [Optimality region of permutation for servicing jobs with uncertain durations on a single machine]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2020; (5): 60-90 (in Russian).
6. Kibzun A.I., Rasskazova V.A. Model' celochislennogo linejnogo programmirovaniya kak matematicheskoe obespechenie sistemy optimal'nogo planirovaniya potokovogo proizvodstva na jetape operativnogo grafikovanija [An integer linear programming model as a mathematical framework for the optimal flow-shop production planning system at the stage of operational scheduling]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2023; (5):113-132 (in Russian).
7. Kupriyanov B.V. Ocenka i optimizacija proizvoditel'nosti rekurzivnogo konvejera [Performance evaluation and optimization of a recursive pipeline]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control]. 2020; (5): 6-25 (in Russian).
8. Afraimovich L., Prilutskii M., Vlasov V. Control Activities Planning Problem. *Lect Notes Electr Eng*. 2021; 729: 341-50.
9. Prilutskii M.Kh., Vlasov V.S., Krivosheev O.V. Zadachi optimal'nogo planirovaniya kak zadachi raspredelenija resursov v setevykh kanonicheskikh strukturah [Optimal planning problems as resource allocation problems in network canonical structures]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies]. 2017;23(9):650-700 (in Russian).
10. Prilutskii M.Kh., Netronin I.V. Zadachi kalendarnogo planirovaniya dlja predpriyatij s edinichnym i melkoseriinyim karakterom proizvodstva [Scheduling problems for enterprises with single-unit and small-batch production characteristics]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* [Control Systems and Information Technologies]. 2019; (3(77)):46-51 (in Russian).
11. Prilutskii M.Kh., Netronin I.V. Zadachi ob"emno-kalendarnogo planirovaniya dlja predpriyatij s edinichnym i melkoseriinyim karakterom proizvodstv [Capacity scheduling problems for enterprises with single-unit and small-batch production characteristics]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2019; (4(127)):36-43 (in Russian).
12. Kumagina E.A., Prilutskii M.Kh. Zadachi raspredelenija raznorodnykh resursov v setevykh kanonicheskikh strukturah [Heterogeneous resource allocation problems in network canonical structures]. *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TRTU]. 2001;(4(22)):194-200 (in Russian).
13. Afraimovich L.G., Kulikov M.S., Prilutskii M.Kh., Starostin N.V. Sistema proizvodstvennogo planirovaniya Smart-resurs [Smart-resource production planning system]. In: VIII Molodezhnaya konferentsiya po upravleniyu proektami: sbornik tezisov dokladov, Nizhnii Novgorod, 17 noyabrya 2023 goda [VIII Youth Conference on Project Management: Abstracts, Nizhny Novgorod, November 17, 2023]. N. Novgorod: OOO «Litera»; 2023. p. 7 (in Russian).
14. Afraimovich L.G., Kostyukov V.E., Kulikov M.S., et al. Proizvodstvennoe planirovanie v usloviyah nepolnoty dannykh [Production planning under conditions of data incompleteness]. In: XIV Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya: sbornik nauchnykh trudov, Moskva, 17-20 iyunya 2024 goda [XIV All-Russian Conference on Control Problems: Proceedings, Moscow, June 17-20, 2024]. Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN; 2024. p. 1829-1834 (in Russian).
15. Prilutskii M.Kh., Kumagina E.A. Upravlyaemyi frontal'nyi algoritm resheniya zadachi raspredeleniya resursov v setevykh kanonicheskikh strukturakh [Controlled frontal algorithm for solving the resource allocation problem in network canonical structures]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Bulletin of the Lobachevsky University of Nizhny Novgorod]. 2008;(6):152-155 (in Russian).
16. Kulikov M.S. Rangovyi iteratsionnyi algoritm resheniya zadachi raspredeleniya resursov v setevykh sistemakh [Rank iterative algorithm for solving the resource allocation problem in network systems].

Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii [Control Systems and Information Technologies]. 2011; 4(46): 37-43 (in Russian).

17. Certificate of state registration of the computer program No. 2025611198 Russian Federation. Program module for capacity scheduling: stated 13.11.2024: published 16.01.2025 / M.Kh. Prilutskii, N.V. Starostin, L.G. Afraimovich, et al.; applicant – Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod» (in Russian).
18. Garey M.R., Johnson D.S. Computability and computational complexity: machines and difficult tasks / Translation from English by E.V. Levner, M.A. Frumkin. Moscow: Mir; 1982. 416 p. (In Russian).

*Дата поступления
в редакцию: 14.11.2025*

*Дата принятия
к публикации: 02.02.2026*

УДК 004.02+658.58

DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_17
EDN CQRUXC

УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ ЗАДАНИЙ РЕМОНТНЫХ БРИГАД В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГРАФИКА ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

М.А. НасоновORCID: 0000-0002-0200-8271 e-mail: ma.nasonov@sintez-oka.ru

Группа компаний «Синтез-ОКА»

*Дзержинск, Россия***С.А. Манцеров**ORCID: 0000-0001-8458-8259 e-mail: mca_9@nntu.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

Представлен новый подход к управлению потоками заданий ремонтных бригад на основе адаптации принципов *Workload Control* к системе технического обслуживания и ремонтов оборудования промышленного предприятия. Предложен алгоритм замкнутого цикла распределения заданий, включающий контроль допуска, балансировку загрузки и динамическое перераспределение работ при изменении условий. В алгоритм интегрированы правила диспетчеризации и механизм анализа отклонений, что обеспечивает адаптивность к поступлению срочных и внеплановых заявок. Формализована структура исходных данных, определены входные и выходные параметры, разработан псевдокод и набор метрик для оценки эффективности. Экспериментальная проверка на тестовом наборе данных, имитирующем реальные условия производственного подразделения, подтвердила работоспособность метода и его применимость при ограниченных ресурсах. Результаты демонстрируют потенциал интеграции алгоритма в информационные системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) для повышения устойчивости планирования и равномерности загрузки ремонтных бригад.

Ключевые слова: управление загрузкой; планирование заданий; балансировка загрузки; диспетчеризация; адаптивный алгоритм.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Насонов, М.А. Управление потоками заданий ремонтных бригад в условиях изменчивости графика обслуживания оборудования / М.А. Насонов, С.А. Манцеров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 17-31. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_17 EDN: CQRUXC

TASK FLOW MANAGEMENT FOR MAINTENANCE TEAMS UNDER CHANGING EQUIPMENT SERVICE SCHEDULES

M.A. NasonovORCID: 0000-0002-0200-8271 e-mail: ma.nasonov@sintez-oka.ru

Sintez-OKA Group of Companies

*Dzerzhinsk, Russia***S.A. Mantserov**ORCID 0000-0001-8458-8259 e-mail: mca_9@nntu.ru

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

Nizhny Novgorod, Russia

The paper proposes a new approach to managing maintenance team task flows is proposed, adapting the principles of *Workload Control* to the maintenance and repair system of an industrial enterprise. A closed-loop task allocation algorithm was developed, combining admission control, workload balancing and dynamic redistribution of work when conditions change. The algorithm integrates dispatching rules and a deviation analysis mechanism, ensuring

adaptability to urgent and unscheduled requests. The model formalizes the initial data structure, defines input and output parameters, and introduces pseudocode and a set of performance metrics. Experimental verification on a test dataset simulating real conditions of the production unit confirmed the algorithm's feasibility and applicability under resource constraints. The results demonstrate its potential for integration into maintenance and repair information systems to enhance planning stability and ensure balanced workload distribution among maintenance teams.

Keywords: Workload Control; maintenance and repair; task scheduling; load balancing; dispatching; adaptive algorithm.

FOR CITATION: Nasonov M.A., Mantserov S.A. Task flow management for maintenance teams under changing equipment service schedules. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 17-31.
DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_17 EDN: CQRUXC

Введение

Эффективность производственных процессов на современных промышленных предприятиях в значительной степени определяется надежностью и доступностью оборудования. В этих условиях особое значение приобретает система технического обслуживания и ремонтов (ТОиР), отвечающая как за поддержание технической исправности оборудования, так и за непрерывность технологических потоков [1-3]. Исторически устоявшаяся методика расчета планов-графиков ТОиР оборудования включает процедуру формирования годового и квартального расписания на основе нормативов. Представленная в работе [4] модель демонстрирует наилучшую эффективность в условиях стабильного графика, когда объем внеплановых мероприятий незначителен, а процессы исполнения поддаются предсказуемому регулированию. Однако по мере увеличения количества внеплановых заявок, требующих включения в график ТОиР, система сталкивается с растущими трудностями организации работы ремонтных бригад на уровне оперативного распределения заданий. На практике это приводит к ряду системных проблем, существенно влияющих на производственные показатели. Одной из наиболее заметных из них является неравномерность загрузки ремонтных бригад. Часто планы формируются без учета оперативных изменений, что порождает перегрузку одних исполнителей и вынужденные простои других. Следствием становится рост времени простоев оборудования, так как несвоевременно выполненные работы накапливаются, а отсутствие механизма динамического перераспределения ресурсов не позволяет гибко реагировать на изменение ситуации. Очевидно, что именно жесткая структура графиков, недостаточно адаптированная к оперативным корректировкам, замедляет реакцию на события. В таких условиях возрастает нагрузка на обслуживающий персонал, поскольку большую часть изменений приходится вносить вручную, что сопровождается значительными временными затратами и снижением общей управляемости.

Актуальность перехода к управлению заданиями в условиях быстро меняющихся приоритетов обслуживания оборудования обусловлена необходимостью системной трансформации процессов исполнения заданий ТОиР. Управление должно не только учитывать текущую загрузку, но и обеспечивать гибкое реагирование на изменяющиеся условия производственной обстановки. Это требует таких функциональных характеристик, как способность к минимизации перегрузок и простоев, сокращение времени отклика на внеплановые работы, возможность перераспределения задач в режиме реального времени и интеграция с информационной системой предприятия для автоматизации расчетов и поддержки принятия решений. Цель внедрения механизма управления загрузкой ремонтных бригад заключается в обеспечении устойчивости и непрерывности процессов исполнения мероприятий ТОиР в условиях высокой производственной изменчивости и ограниченности доступных ресурсов.

Методы и материалы исследования

Среди существующих решений для гибкого планирования ТОиР можно выделить модель [5], в которой предложен подход к организации обслуживания на основе алгоритмов целочисленного линейного программирования. Авторы интегрируют техническое обслуживание в производственный график, учитывая доступность оборудования и влияние плановых остановок на выпуск продукции. Такой подход позволяет не только оптимизировать интервалы обслуживания, но и минимизировать производственные потери за счет совместного планирования. Однако, несмотря на высокую точность, подобные модели сложно масштабировать для динамичной среды с ограниченными ресурсами. В работе [6] рассматривается задача построения оптимального расписания профилактического обслуживания, в которой модель учитывает параметры надежности, вероятность отказа, риск незапланированного простоя и стоимость простоев оборудования. Несмотря на высокую степень формализации, подобные модели обладают ограниченной адаптивностью к появлению в графике внеплановых и срочных заданий, не содержащих полной исходной информации о характеристиках надежности (например, о вероятности отказа в конкретных условиях эксплуатации), что усложняет их применение в условиях быстро меняющейся производственной среды.

Подход к динамическому планированию мероприятий ТОиР с учетом реальных условий эксплуатации, включая группировку задач и человеческий фактор, предложен в работе [7]. Авторы рассматривают не только технические параметры, но и влияние утомляемости персонала, вероятность ошибки, а также ограниченность ресурсов обслуживания. Вводится механизм адаптивного перепланирования по скользящему горизонту и агрегирования заданий, направленный на минимизацию затрат и рисков. Однако в такой модели не рассматривается связь с уровнями долгосрочного и краткосрочного планирования проведения мероприятий ТОиР, что делает проблематичным синхронизацию графиков ТОиР и производства на разных уровнях управления. В работе [8] подчеркивается, что большинство существующих моделей ограничены учетом двух из трех ключевых аспектов: производства, технического обслуживания и ресурсов. По мнению авторов, наиболее слабо представлены интегрированные подходы к управлению графиками с учетом ограниченности ремонтных бригад и необходимости согласования с производственными задачами. Исследования классифицируются по уровням интеграции (P-M, P-R, P-M-R), подчеркивается, что реальные организационные ограничения часто остаются вне моделей. Для устранения этого предлагается подход, направленный на частичное восполнение этого пробела за счет включения ограничения по ресурсам и перераспределения заданий в рамках ограниченного пула ремонтных бригад.

В последнее время существенное внимание уделяется использованию цифровых инструментов мониторинга, предиктивной аналитики и автоматизированной диспетчеризации. В работе [9] рассматриваются методы обучения с подкреплением и глубокого обучения с подкреплением (RL/DRL), применяемые к задачам планирования ТОиР и оптимизации производственных политик. Это, по мнению авторов, позволяет формировать адаптивные стратегии обслуживания в условиях неопределенности, минимизируя простои и издержки. Показывается, как различные архитектуры (DQN, PPO, Actor-Critic) могут быть использованы для автоматической генерации политик обслуживания и оптимального распределения ресурсов. Однако такие методы актуальны, прежде всего, для высокоавтоматизированных производственных систем, где оперативная адаптация к изменяющимся условиям обеспечивается высоким уровнем оснащения цифровыми устройствами. Авторы работы [10] предлагают подход, интегрированный с принципами *Индустрии 4.0* и позволяющий динамически корректировать производственные графики. Ключевым преимуществом модели является способность адаптироваться к реальным колебаниям графиков во времени за счет интеграции с ERP-системами и цифровыми каналами данных. Это подчеркивает важность разработки гибких систем планирования, способных реагировать на нестабильность производственной обстановки.

Заслуживают внимания гибридные подходы, включающие предварительную фильтрацию операций, жесткие ограничения на горизонты оптимизации и применение эвристических правил [11]. Это подтверждает актуальность разработки более легких, интерпретируемых методов, позволяющих перераспределять задания в условиях ограниченных вычислительных и организационных ресурсов [12].

Таким образом, несмотря на наличие значительного количества работ, посвященных отдельным аспектам организации, диспетчеризации и гибкого планирования заданий ТОиР, сохраняется дефицит решений, ориентированных на реализацию механизма управления исполнением заданий ТОиР с учетом реальной загрузки, ресурсных ограничений и условий производственной среды.

На этом фоне интерес вызывает методология *Workload Control* (WLC), изначально разработанная для управления производственными заказами в условиях ограниченных ресурсов. Принципы WLC (рис. 1) находят все большее применение в смежных задачах, включая логистику, обслуживание и диспетчеризацию производства [13-16].

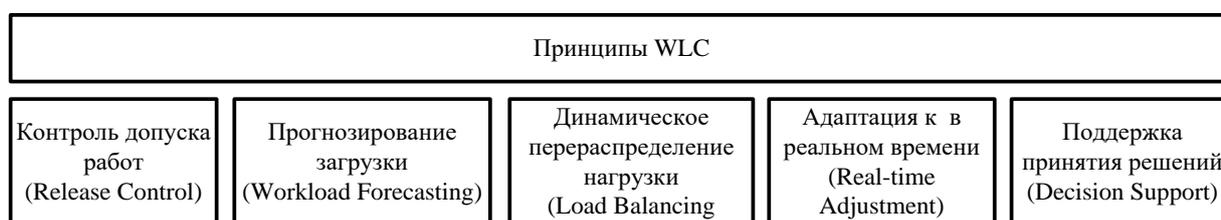


Рис. 1. Принципы WLC

Fig. 1. WLC principles

Адаптация ключевых принципов WLC к задачам ТОиР приводится в табл. 1.

Таблица 1.

Ключевые принципы WLC и их адаптация к системе ТОиР

Table 1.

Key principles of WLC and their adaptation to the maintenance and repair system

№ п.	Принцип WLC	Содержание	Реализация в задачах ТОиР
1	Release Control	Контроль допуска работ в систему на основе загрузки	Анализ ресурсоемкости и приоритета работ перед допуском в график ТОиР
2	Workload Forecasting	Прогнозирование загрузки и доступных мощностей	Расчет загрузки ремонтных бригад и оценка возможности принять новые задания
3	Load Balancing	Динамическое перераспределение нагрузки	Назначение/переназначение работ между бригадами для выравнивания загрузки
4	Real-time Adjustment	Корректировка плана при изменении условий	Реагирование на внеплановые ремонты и аварии, перераспределение ресурсов
5	Decision Support Interface	Поддержка принятия решений человеком-диспетчером	Автоматизированные рекомендации и визуализация вариантов перераспределения

Приведенные принципы концепции WLC отражают фундаментальные идеи организации процесса исполнения графика ТОиР с точки зрения управления потоками заданий. В контексте системы ТОиР они могут быть интерпретированы как гипотеза о возможности повышения устойчивости планирования за счет согласования скорости поступления и выполнения ремонтных работ. В частности, принцип входного контроля – регулирование поступления заданий в систему ТОиР приобретает форму динамического допуска заявок на выполнение ремонтов в зависимости от текущей загрузки ремонтных бригад и объема незавершен-

ных работ. Система должна сохранять баланс между входящим потоком заданий и доступными ресурсами, предотвращая перегрузку и образование избыточного «ремонтного задела». Поэтому принцип выходного контроля – управление выпуском заданий в рассматриваемой задаче – проявляется как согласование сроков и приоритетов между различными типами ремонтных мероприятий (плановыми, внеплановыми, аварийными). Он обеспечивает поддержание стабильного ритма выполнения работ и равномерное распределение трудозатрат между бригадами. Гипотеза о применимости данных принципов в контуре управления ТОиР заключается в том, что реализация двойного контроля (входного и выходного) создает предпосылки для адаптивного перераспределения заданий при изменении внешних условий, например, при поступлении срочных работ или снижении доступности ресурсов. Кроме того, использование правил диспетчеризации позволяет формализовать процесс принятия решений при распределении заданий. Это делает возможным построение алгоритмов, обеспечивающих согласование между плановыми показателями обслуживания и фактическими возможностями исполнителей, что соответствует идеологии WLC как системы, балансирующей между требованиями спроса и ограничениями производственной мощности.

Адаптация методологии WLC для задач планирования ТОиР предполагает не только контроль допуска заданий и балансировку загрузки, но и организацию замкнутого цикла регулирования потоков заданий. Подобный принцип, обеспечивающий согласование входных и выходных потоков в производственных системах, развит в [17], где предложена гибридная модель WLC, совмещающая дискретно-событийную имитацию и дискретно-временные регуляторы. Модель автоматически корректирует скорость выпуска заказов из пула и пропускную способность рабочих центров на основе фактического уровня незавершенного производства (WIP), что позволяет поддерживать устойчивость системы и компенсировать возмущения в режиме реального времени. Следовательно, при разработке алгоритма управления потоками ремонтных заданий важно обеспечить аналогичную способность к адаптации – через периодический анализ загрузки бригад и динамическое перераспределение заданий при отклонениях. Приоритеты заданий формируются в соответствии с известными правилами упорядочения, используемыми в теории расписаний: *Earliest Due Date (EDD)*, *Weighted Shortest Processing Time (WSPT)*, *Minimum Slack (MS)* и *Apparent Tardiness Cost with Setups (ATCS)* [18]. Эти правила широко применяются для задач диспетчеризации, где необходимо согласовать сроки выполнения и ресурсные ограничения, и в настоящем исследовании служат инструментом для ранжирования заданий по степени приоритетности при формировании пула и его выпуске в исполнение.

Для дальнейшей формализации предложенного подхода были определены исходные множества, параметры и этапы алгоритма (табл. 2 и 3).

Таблица 2.
Обозначения

Table 2.
Notations

Обозначение	Расшифровка	Тип
A	Множество всех заданий (плановых и внеплановых)	Множество
A_p	Задания, готовые по фронту работ и ресурсам	Множество
A_d	Задания, прошедшие контроль допуска	Множество
A_{ex}	Задания, переданные в исполнение	Множество
A_{ug}	Множество срочных заявок	Множество
M	Фронт работ, ресурсная обеспеченность	Множество
J	Множество ремонтных бригад	Множество
T	Множество временных интервалов	Множество

Окончание табл. 2.
Обозначения
Table 2 termination.
Notations

Обозначение	Расшифровка	Тип
R_j	Доступный ресурс времени бригады j	Скаляр
Q_j	Квалификация бригады j	Атрибут бригады
R	Совокупность ресурсов (материалы, инструменты, оснастка), необходимых для выполнения работ	Ресурсы
$W_j(t)$	Прогнозная загрузка бригады j в период t	Функция/массив
D_i	Трудоемкость задания i (человеко-часы)	Скаляр
P_i	Приоритет задания i	Скаляр
Q_i^{req}	Требуемая квалификация для задания i	Атрибут
δ_i	Факт отклонения по сроку исполнения задания i	Скаляр
U	Флаг необходимости перерасчета или возврата	Двоичный

Таблица 3.
Входные и выходные параметры алгоритма управления заданиями

Table 3.
Input and output parameters of the task management algorithm

№	Этап алгоритма	Входные параметры	Выходные параметры
1	Формирование пула заданий	A, M, T, Q_j	A_p
2	Прогнозирование загрузки	A_p, J, R_j	$W_j(t)$
3	Контроль допуска	$A_p, Q_j, Q_i^{req}, W_j(t)$	A_d
4	Перераспределение заданий	$A_d, W_j(t), P_i, Q_j$	Обновленное A_d
5	Назначение и запуск	A_d, J	A_{ex}
6	Мониторинг исполнения	A_{ex} , факт исполнения	δ_i , статусы
7	Анализ и определение отклонений	$\delta_i, A_{ug}, W_j(t)$	Обновленные A, U

Граф, представленный на рис. 2, демонстрирует замкнутый цикл управления потоками заданий и включает несколько этапов.

Цикл организован таким образом, чтобы обеспечить своевременное и обоснованное принятие решений о запуске заданий в условиях изменяющейся оперативной обстановки, ограниченной доступностью ресурсов, срочностью внеплановых заявок и колебаниями загрузки ремонтных бригад. Логика алгоритма управления циклом организована в виде последовательности этапов, перечень и содержание которых представлены в табл. 4.

Псевдокод реализации алгоритма приведен на рис. 3. Он описывает упрощенную последовательность шагов распределения заданий ремонтным бригадам на принципах WLC, включая формирование пула, контроль допуска и балансировку нагрузки.

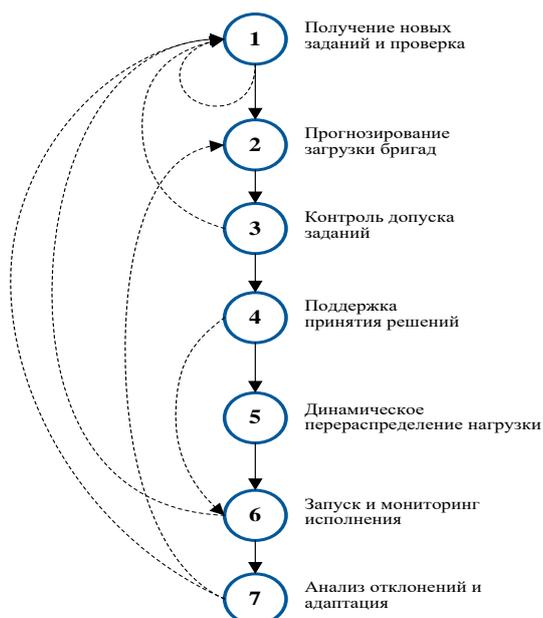


Рис. 2. Граф алгоритма управления потоками заданий в системе ТОиР

Fig. 2. Graph of the task flow control algorithm in the maintenance and repair system

Таблица 4.

Содержание этапов алгоритма

Table 4.

Algorithm stages

№	Этап	Содержание
1	Формирование пула заданий	Поступившие задания (плановые и внеплановые) агрегируются в общее множество A . Из него отбираются задачи, для которых подготовлен фронт работ, обеспечены ресурсы и доступна полная исходная информация. В результате формируется множество A_p , передаваемое на следующий этап.
2	Прогнозирование загрузки ремонтных бригад	Для каждой ремонтной бригады $j \in J$ рассчитывается прогнозная нагрузка $W_j(t)$ на временном интервале T_i . Анализируются пики загрузки и формируются сигналы перегрузок при превышении порогового значения ресурса R_j .
3	Контроль допуска заданий	Задания из проверяются на соответствие ресурсным и квалификационным ограничениям. В множество включаются только те задачи, которые могут быть выполнены без перегрузки и при наличии соответствующей квалификации исполнителей
4	Динамическое перераспределение заданий	При наличии сигналов перегрузки или поступлении срочных заявок из множества, производится перераспределение заданий между ремонтными бригадами. Учитываются текущая нагрузка, квалификация, приоритеты и доступные временные окна
5	Назначение заданий и передача на исполнение	Сформированные назначения передаются в систему мониторинга исполнения. Фиксируются статусы задач и производится контроль текущего хода выполнения
6	Анализ отклонений и принятие решений	По завершении выполнения или при наступлении событий (срочные заявки, отклонения) осуществляется анализ выполнения: рассчитываются отклонения δ_i , оцениваются риски. При необходимости инициируется возврат к этапам 2-3 с флагом $U = True$

```

Вход:
  T = {T1, ..., Tm}    // бригады
  Cap[T]              // доступная мощность бригад на период
  Jobs = {J1, ..., Jn} // задания периода
  WIPref              // целевой уровень WIP
  rule ∈ {EDD, WSPT, MS, ATCS}

Выход:
  Schedule[T]        // упорядоченный список заданий по бригадам

1: // Формирование приоритетов
2: for each J in Jobs do
3:   PI(J) ← Priority(rule, J) // напр.: EDD → PI=due date; WSPT → PI=dd/dur
4: end for
5: sort Jobs by PI(J) ascending
6: move Jobs to Pool

7: // Входной контроль (input control)
8: WIP ← 0
9: Buffer ← ∅
10: while Pool ≠ ∅ and WIP < WIPref do
11:   J ← extract_first(Pool)
12:   push(Buffer, J)
13:   WIP ← WIP + 1
14: end while

15: // Распределение по бригадам (output control)
16: for each J in Buffer do
17:   T* ← argmin_{T ∈ T} Load[T]
18:   if Load[T*] + dur(J) ≤ Cap[T*] then
19:     Schedule[T*].append(J)
20:     Load[T*] ← Load[T*] + dur(J)
21:     WIP ← WIP - 1
22:   else
23:     defer J to next period
24:   end if
25: end for

```

Рис. 3. Упрощенный алгоритм управления потоками заданий ремонтных бригад (на принципах WLC)

Fig. 3. A simplified algorithm for managing repair crew task flows (based on WLC principles)

Представленный псевдокод иллюстрирует ключевые шаги алгоритма, реализующего принципы двойного контроля (входного и выходного). Такая форма описания обеспечивает воспроизводимость метода и делает возможной его интеграцию в программную среду моделирования или аналитическую подсистему информационной системы ТОиР.

Для количественной оценки эффективности алгоритма управления потоками заданий на основе принципов WLC предлагается использовать совокупность интегральных и частных метрик, отражающих качество планирования, сбалансированность загрузки ресурсов, устойчивость к отклонениям и способность системы к адаптации. Оценка начинается с расчета коэффициента запуска заданий, определяющего долю задач, фактически допущенных к исполнению:

$$K_d = \frac{|A_{ug}|}{|A_{ex}|} \quad (1)$$

K_d служит показателем того, насколько эффективно работает механизм допуска заданий при заданных ограничениях. Значение K_d , близкое к 1, свидетельствует о высокой эффективности допуска при заданных ресурсных и организационных ограничениях.

Следующий параметр – средняя загрузка ремонтных бригад, рассчитываемая как среднее значение прогнозной загрузки по всем бригадам на каждом шаге времени:

$$\bar{W} = \frac{1}{|J| \cdot T} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} W(t) \quad (2)$$

Эта метрика позволяет оценить общую загрузку системы и ее использование в течение планового горизонта.

С целью анализа рисков сбоев и перегрузок рассчитывается коэффициент перегрузки, отражающий среднее относительное превышение допустимой загрузки:

$$K_{over} = \frac{1}{|J| \cdot T} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} \left(0, \frac{W_j(t) - R_j}{R_j} \right) \quad (3)$$

Показатель K_{over} , близкий к 0, указывает на устойчивую и сбалансированную систему. Он служит индикатором устойчивости системы и помогает выявлять структурные узкие места. Еще одним характеризующим параметром является среднее отклонение между планом и фактом выполнения заданий, который показывает точность соблюдения плановых сроков выполнения заданий:

$$\bar{\Delta d} = \frac{1}{|A_{ex}|} \sum_{i \in A_{ex}} |\delta_i| \quad (4)$$

Чем ниже значение этой метрики, тем выше соответствие между расчетным планом и реальным исполнением, а также устойчивость алгоритма к возмущениям.

Для оценки способности алгоритма обрабатывать внеплановые и срочные заявки предлагается использовать долю таких заданий, успешно допущенных к исполнению:

$$K_{ug} = \frac{|A_{ug}|}{|A_{ex}|} \quad (5)$$

Этот показатель отражает гибкость и оперативность алгоритма, а также характеризует его применимость в условиях нестабильной среды и высоких требований к времени реакции.

В совокупности указанные метрики позволяют не только оценить эффективность функционирования алгоритма, но и проводить сравнительный анализ различных сценариев, параметрических режимов и организационных структур, в которых может быть применен предложенный способ.

Для проверки работоспособности алгоритма выполнена его реализация в среде *Jupyter Notebook* с использованием языка программирования *Python* и библиотек *pandas* и *matplotlib*. Эти инструменты выбраны не только за счет своей гибкости и широких аналитических возможностей, но и по той причине, что они уже применяются в ИТ-ландшафте исследуемого промышленного предприятия и могут быть встроены в виде сервисов аналитических решений [19]. Это существенно упрощает задачу интеграции алгоритма в существующую информационную систему ТООР, а также облегчает его сопровождение и дальнейшее развитие.

В качестве исходных данных использован подготовленный набор, представляющий типичную оперативную ситуацию планирования ремонтных заданий, фрагмент которого приводится в табл. 5.

Набор данных включает:

- перечень заданий с указанием идентификатора, типа задания (плановое, внеплановое, аварийное и др.), временного окна выполнения, оценки трудозатрат (в человеко-часах), необходимой квалификации исполнителей и текущего статуса выполнения (начато / не начато);
- информацию о ремонтных бригадах, включая их идентификаторы, уровень квалификации, доступное рабочее время в плановом периоде и текущую загруженность.

Таблица 5.
Фрагмент набора данных с заданиями

Table 5.
Fragment of the data set with tasks

№	Тип задания	Оценка труд. (ч.)	Квалификация	Приоритет	Доступное временное окно (дн.)	Флаг пересчета (0/1)	Назначение	Статус
1	План	4	2	1	с 4 по 7	0	Бригада 2	начато
2	Срочн.	2	3	1	с 4 по 8	1	Бригада 1	начато
3	Срочн.	4	1	1	с 4 по 8	1	Бригада 3	начато
4	Внепл.	6	2	2	с 6 по 9	0		нет
5	План	4	3	1	с 8 по 9	0		нет
6	Срочн.	5	3	2	с 7 по 10	1		нет
7	Внепл.	2	1	3	с 8 по 11	0		нет
8	План	6	2	2	с 9 по 12	0		нет
9	Внепл.	3	2	4	с 9 по 13	1		нет

Диаграмма на рис. 4 иллюстрирует временные интервалы выполнения заданий, где каждое задание представлено отрезком, начинающимся в момент старта и заканчивающимся в срок завершения.

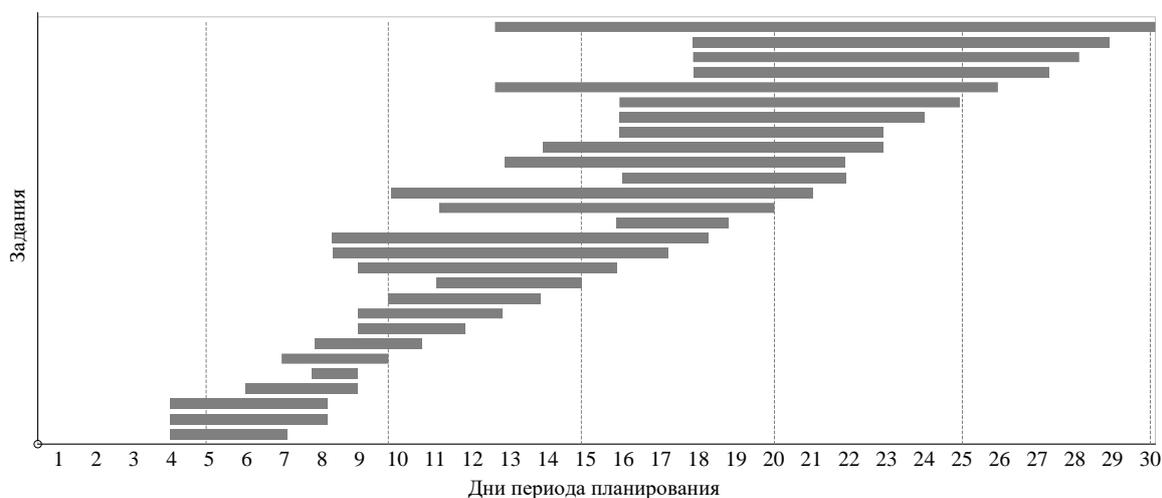


Рис. 4. Временные окна выполнения заданий

Fig. 4. Time windows for task execution

Алгоритм последовательно обрабатывает каждое новое задание, оценивая доступные ресурсы, квалификационные требования и остаток рабочего времени у каждой бригады, после чего производит назначение или фиксирует невозможность его выполнения в рамках текущих ограничений. Результат работы алгоритма назначения заданий приведен в табл. 6, где представлены сведения о каждом задании: идентификатор, тип (плановое, внеплановое и т.д.), временное окно выполнения, предполагаемые трудозатраты и назначенная бригада. Алгоритм выполняет распределение заданий с учетом соответствия квалификации исполнителей требуемому уровню, а также наличия доступных часов у бригады, равномерности распределения рабочей нагрузки между всеми доступными бригадами. В случаях, когда ни одна бригада не соответствует условиям назначения (например, из-за перегрузки или нехватки

квалификации), в поле «Назначенная бригада» указывается значение «нет доступной бригады». На рис. 5 представлена визуализация суммарной нагрузки на ремонтные бригады после перераспределения заданий, исключая уже начатые; столбчатая диаграмма показывает объем назначенной работы (в человеко-часах) по каждой из доступных бригад.

Таблица 6.
Результат работы алгоритма

Table 6.
Algorithm output

№	Тип задания	Срок исполнения	Трудозатраты (ч.)	Назначенная бригада
4	Внеплановое	с 6 по 9	6	Бригада 1
5	План	с 8 по 9	4	Бригада 1
6	Срочное	с 7 по 10	5	Бригада 1
7	Внеплановое	с 8 по 11	2	Бригада 2
8	План	с 9 по 12	6	Бригада 2
9	Внеплановое	с 9 по 13	3	Бригада 2
10	Внеплановое	с 10 по 14	8	Бригада 1
11	План	с 11 по 15	5	Бригада 2
12	Внеплановое	с 9 по 16	9	Бригада 1
13	План	с 8 по 17	2	Бригада 2
14	План	с 8 по 18	5	Бригада 1
15	План	с 16 по 19	1	Бригада 1
16	Срочное	с 11 по 20	2	Бригада 3
17	Внеплановое	с 10 по 21	8	нет доступной бригады
18	Внеплановое	с 16 по 22	6	Бригада 2
19	Внеплановое	с 12 по 22	2	Бригада 3
20	Внеплановое	с 14 по 23	5	Бригада 2
21	Внеплановое	с 16 по 23	1	Бригада 2
22	Срочное	с 16 по 24	7	нет доступной бригады
23	План	с 16 по 25	4	Бригада 3
24	Внеплановое	с 12 по 26	7	нет доступной бригады
25	Внеплановое	с 18 по 27	8	Бригада 2
26	План	с 19 по 28	6	нет доступной бригады
27	План	с 19 по 29	4	Бригада 3
28	Внеплановое	с 12 по 30	1	Бригада 3

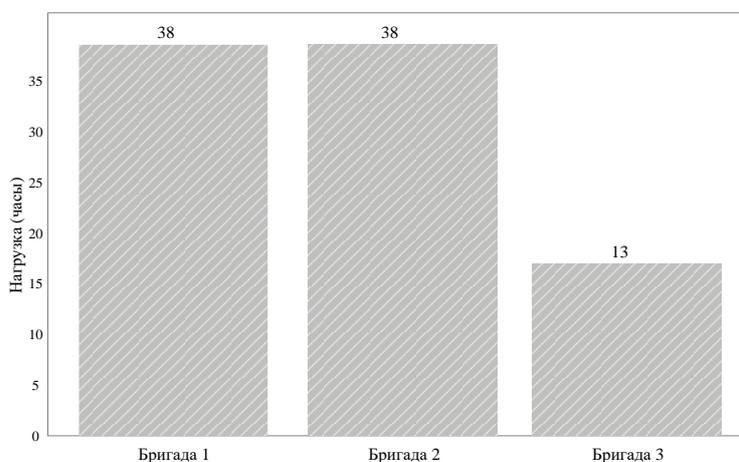


Рис. 5. Загрузка ремонтных бригад после исключения начатых заданий

Fig. 5. Loading of repair crews after exclusion of started tasks

Представленный набор данных позволил протестировать работу алгоритма в рамках приближенного к реальности сценария. Однако следует отметить, что приведенный пример носит демонстрационный характер и не содержит всей полноты информации, необходимой для полноценной количественной оценки эффективности работы алгоритма. В частности, отсутствуют такие важные параметры, как фактическое время исполнения заданий, данные об отклонениях от графика, предельные значения загрузки ремонтных бригад, а также исторические сведения об объемах внеплановых и срочных работ.

Тем не менее, структура и формат данных, полученных в результате выполнения алгоритма, соответствуют требованиям, предъявляемым к применению метрик, определенных выше. Это позволяет утверждать, что при наличии накопленной статистики, получаемой в процессе опытной эксплуатации или при интеграции в информационную систему предприятия, возможно автоматизированное применение следующих показателей:

- коэффициента успешного назначения заданий;
- коэффициентов средней и максимальной загрузки бригад;
- количества временных конфликтов между назначениями;
- уровня отклонений от допустимых сроков исполнения.

Таким образом, уже на этапе внедрения алгоритма создаются предпосылки для непрерывной оценки и оптимизации его работы на основе данных реального производственного цикла. Дальнейшая работа должна быть сосредоточена на интеграции модуля расчета метрик в контур системы ТОиР и формировании процедур накопления и анализа статистики исполнения.

Результаты и обсуждение

На основании результатов распределения заданий были рассчитаны количественные метрики эффективности алгоритма, представленные в табл. 7.

Таблица 7.

Метрики оценки работы алгоритма на тестовом наборе данных

Table 7.

Metrics for evaluating the algorithm's performance on the test dataset

Метрика	Значение
Общее число заданий (не начатых)	25
Число успешно назначенных заданий	21
Процент успешно назначенных заданий (%)	84,0
Число конфликтов временных окон	178
Коэффициент загрузки по бригадам	Нет данных

Несмотря на общую успешность распределения заданий (84 % заданий получили назначение), в четырех случаях алгоритм не смог найти доступную бригаду, что отразилось значением «нет доступной бригады». Это указывает на наличие ограничений, связанных с временными окнами или перегрузкой ремонтных бригад. Такие случаи имеют важное диагностическое значение: они сигнализируют о потенциальной несбалансированности производственного плана, необходимости коррекции параметров загрузки или включения более гибких правил переброса задач. Показатель «Число конфликтов временных окон», равный 178, отражает количество пересечений заданий во времени, в которых возникает конкуренция за ресурсы. Данная метрика имеет значение при анализе плотности графика и помогает оценить устойчивость расписания при росте числа заданий. В рассматриваемом эксперименте приоритет выполнения не был задействован, что также ограничивает возможности алгоритма в условиях дефицита ресурсов. На текущем этапе оценка таких метрик, как коэффициент загрузки бригад, степень перераспределения заданий и среднее отклонение от оптимального графика, не была реализована из-за отсутствия норм времени на выполнение задач. Од-

нако в промышленной эксплуатации все необходимые параметры (временные нормы, статусы выполнения, отклонения от графика) присутствуют в информационной системе, что позволяет включить оценку эффективности в производственный контур без изменения существующего учета.

Таким образом, проведенный эксперимент подтвердил работоспособность алгоритма в тестовой среде и выявил ключевые аспекты, требующие дальнейшего исследования: накопление статистики для расширенного анализа, автоматическое устранение конфликтов, интеграция с модулями прогнозирования загрузки и расширение модели приоритетов.

Заключение

Проведенный анализ проблематики управления потоками заданий на ремонтные работы в условиях изменчивого графика показал необходимость динамического перераспределения задач с учетом текущей загруженности ресурсов и ограничений по времени. Разработанный алгоритм ориентирован на интеграцию в информационную систему ТООИР и способен адаптироваться к оперативным изменениям без потери управляемости процессов. Математическая формализация задачи, а также введенные критерии и метрики позволили объективно подойти к оценке эффективности алгоритма. Практический пример с использованием Python-инструментов и тестового набора данных продемонстрировал возможность автоматизированного назначения заданий и выявил потенциальные конфликты, связанные с ограниченностью ресурсов. Результаты эксперимента подтвердили работоспособность предложенного подхода в ограниченной тестовой среде. Вместе с тем, выявленные случаи неназначенных заданий и конфликты временных окон указывают на необходимость дальнейшей проработки механизма приоритизации, обработки исключений и накопления статистических данных для адаптации параметров модели.

В дальнейшем планируется расширение функциональности алгоритма за счет интеграции прогнозных моделей загрузки, учета нормативов выполнения и автоматической корректировки графиков. Полученные результаты могут быть использованы в системах управления производственным обслуживанием, а также в других прикладных задачах диспетчеризации и управления потоками заданий в условиях ограниченных ресурсов.

Библиографический список

1. **Новикова, Т.А.** Сравнительный анализ существующих стратегий организации технического обслуживания и ремонта сложных технических систем / Т.А. Новикова, Е.В. Ляпунцова // *Инновации в менеджменте*. – 2024. – № 4(42). – С. 48-55.
2. **Житомирский, Б.Л.** Современное состояние и перспективы развития системы технического обслуживания и ремонта газотурбинных двигателей / Б.Л. Житомирский, Г.К. Сиденко, Т.В. Игнатова // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. – 2025. – № 1(145). – С. 72-78.
3. **Завьялов, А.П.** Об изменении требований к технической диагностике для внедрения методов предиктивной аналитики при переходе к риск-ориентированной системе эксплуатации оборудования топливно-энергетического комплекса / А.П. Завьялов, И.Ф. Дяченко // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. – 2025. – № 1(145). – С. 68-71.
4. **Купреенко, А.И.** Планирование технических обслуживаний и ремонтов оборудования / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, А.А. Рытчер // *Современные тенденции развития аграрной науки: Сбор. науч. трудов межд. науч.-пр. конф. Часть 2*. – Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2022. – С. 546-549.
5. **Pires, C.** Mathematical model for maintenance planning of machine tools / C. Pires, I. Lopes, L. Basto // *Procedia Manufacturing*. – 2019. – Vol. 38. – Pp. 1197-1204.
6. **Angeles, E.** Optimal Inspection and Preventive Maintenance Scheduling of Mining Equipment / E. Angeles, M. Kumral // *Journal of Failure Analysis and Prevention*. – 2020. – Vol. 20, No. 4. – P. 1408-1416. – DOI 10.1007/s11668-020-00949-z.

7. **Sheikhalishahi, M.** Dynamic maintenance planning approach by considering grouping strategy and human factors / M. Sheikhalishahi, A. Azadeh, L. Pintelon // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2017. – Vol. 107. – Pp. 289-298.
8. **Geurtsen M.** Production, maintenance and resource scheduling: A review / M. Geurtsen, J.B.H.C. Didden, J. Adan [et al.] // *European Journal of Operational Research*. – 2022. – DOI 10.1016/j.ejor.2022.03.045.
9. **Ogunfowora, O.** Reinforcement and deep reinforcement learning-based solutions for machine maintenance planning, scheduling policies, and optimization / O. Ogunfowora, H. Najjaran // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2023. – Vol. 70. – P. 244-263. – DOI 10.1016/j.jmsy.2023.07.014.
10. **Kianpour, P.** Automated job shop scheduling with dynamic processing times and due dates using project management and industry 4.0. / P. Kianpour, D. Gupta, K.K. Krishnan, B. Gopala-krishnan // *Journal of Industrial and Production Engineering*. – 2021. – No. 38(7). – Pp. 485-498.
11. **Kunath, S.** MILP performance improvement strategies for short-term batch production scheduling: a chemical industry use case / S. Kunath, M. Kühn // *SN Appl. Sci.* – 2022. – № 4. P. 87.
12. **Huang, L.** An Auto-MILP Model for Flexible Job Shop Scheduling Problem / L. Huang, R. Su // *IFAC-Papers OnLine*. – 2022. – Vol. 55, Issue 3. – Pp. 137-142.
13. **Haeussler, S.** Comparison between rule-and optimization-based workload control concepts: a simulation optimization approach / S. Haeussler, P. Netzer // *International Journal of Production Research*. – 2020. – Vol. 58(12). – P. 3724-3243.
14. **Missbauer, H.** Order release in production planning and control systems: challenges and opportunities / H. Missbauer, R. Uzsoy // *International Journal of Production Research*. – 2022. – Vol. 60, № 1. – P. 256-276.
15. **Costa, F.** Labor flexibility integration in workload control in Industry 4.0 era / F. Costa, A. Portioli-Staudacher // *Operations Management Research*. – 2021. – Vol. 14, № 3-4. – P. 420-433.
16. **Vanheusden S.** Analysing the effectiveness of workload balancing measures in order picking operations / S. Vanheusden, T. Van Gils, K. Braekers [et al.] // *International Journal of Production Research*. – 2022. – Vol. 60, № 7. – P. 2126-2150.
17. **Mušič, G.** Closed-loop workload input-output control of production systems: A hybrid simulation study / G. Mušič, J.K. Sagawa // *Computers & Industrial Engineering*. – 2024. – Vol. 198. 110669. DOI: 10.1016/j.cie.2024.110669.
18. **Pinedo, M.L.** *Scheduling*. – Springer Science Business Media: LLC, 2016. – 674 p.
19. **Насонов, М.А.** Архитектурная трансформация системы технического обслуживания оборудования на промышленном производстве / М.А. Насонов, И.С. Решетников // *Автоматизация в промышленности*. – 2025. – № 3. – С. 3-11.

References

1. Novikova T.A., Lyapunsova E.V. Sravnitel'nyi analiz sushchestvuyushchikh strategii organizatsii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Comparative analysis of existing strategies for organizing maintenance and repair of complex technical systems]. *Innovatsii v menedzhmente* [Innovations in Management]. 2024; 4(42): 48-55 (in Russian).
2. Zhitomirskii B.L., Sidenko G.K., Ignatova T.V. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta gazoturbinnnykh dvigatelei [Current state and development prospects of the gas turbine engine maintenance and repair system]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa* [Equipment and Technologies for the Oil and Gas Complex]. 2025; 1(145): 72-78 (in Russian).
3. Zavyalov A.P., Dyachenko I.F. Ob izmenenii trebovaniy k tekhnicheskoi diagnostike dlya vnedreniya metodov prediktivnoi analitiki pri perekhode k risk-orientirovannoi sisteme ekspluatatsii oborudovaniya toplivno-energeticheskogo kompleksa [On changing the requirements for technical diagnostics for implementing predictive analytics methods when transitioning to a risk-based equipment operation system in the fuel and energy sector]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa* [Equipment and Technologies for the Oil and Gas Complex]. 2025; 1(145): 68-71 (in Russian).
4. Kupreenko A.I., Isaev Kh.M., Rytcher A.A. Planirovanie tekhnicheskikh obsluzhivaniy i remontov oborudovaniya [Planning of equipment maintenance and repairs]. In: *Sovremennye tendentsii razvitiya agrarnoi nauki: Sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Chast' 2* [Modern trends in the development of agrarian science: Collection of scientific papers of the internation-

- al scientific-practical conference. Part 2]. Bryansk: Bryansk State Agrarian University; 2022. p. 546-549 (in Russian).
5. Pires C., Lopes I., Basto L. Mathematical model for maintenance planning of machine tools. *Procedia Manuf.* 2019;38:1197-204.
 6. Angeles E., Kumral M. Optimal inspection and preventive maintenance scheduling of mining equipment. *J Fail Anal Prev.* 2020;20(4):1408-16. doi: 10.1007/s11668-020-00949-z.
 7. Sheikhalishahi M., Azadeh A., Pintelon L. Dynamic maintenance planning approach by considering grouping strategy and human factors. *Process Saf Environ Prot.* 2017;107:289-98.
 8. Geurtsen M., Didden JBHC., Adan J., et al. Production, maintenance and resource scheduling: A review. *Eur J Oper Res.* 2022. doi: 10.1016/j.ejor.2022.03.045.
 9. Ogunfowora O., Najjaran H. Reinforcement and deep reinforcement learning-based solutions for machine maintenance planning, scheduling policies, and optimization. *J Manuf Syst.* 2023;70:244-263. doi: 10.1016/j.jmsy.2023.07.014.
 10. Kianpour P, Gupta D, Krishnan KK, Gopala-krishnan B. Automated job shop scheduling with dynamic processing times and due dates using project management and industry 4.0. *J Ind Prod Eng.* 2021;38(7):485-498.
 11. Kunath S., Kühn M. MILP performance improvement strategies for short-term batch production scheduling: a chemical industry use case. *SN Appl Sci.* 2022;4:87.
 12. Huang L., Su R. An Auto-MILP model for flexible job shop scheduling problem. *IFAC-PapersOnLine.* 2022;55(3):137-142.
 13. Haeussler S., Netzer P. Comparison between rule- and optimization-based workload control concepts: a simulation optimization approach. *Int J Prod Res.* 2020;58(12):3724-3743.
 14. Missbauer H., Uzsoy R. Order release in production planning and control systems: challenges and opportunities. *Int J Prod Res.* 2022;60(1):256-276.
 15. Costa F., Portioli-Staudacher A. Labor flexibility integration in workload control in Industry 4.0 era. *Oper Manag Res.* 2021;14(3-4):420-433.
 16. Vanheusden S., Van Gils T., Braekers K., et al. Analysing the effectiveness of workload balancing measures in order picking operations. *Int J Prod Res.* 2022;60(7):2126-2150.
 17. Mušič G., Sagawa J.K. Closed-loop workload input-output control of production systems: A hybrid simulation study. *Comput Ind Eng.* 2024;198:110669. doi: 10.1016/j.cie.2024.110669.
 18. Pinedo M.L. *Scheduling.* 5th ed. New York: Springer; 2016. 694 p.
 19. Nasonov M.A., Reshetnikov I.S. Arkhitekturnaya transformatsiya sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya oborudovaniya na promyshlennom proizvodstve [Architectural transformation of the equipment maintenance system in industrial production]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti [Industrial Automation].* 2025;(3):3-11 (in Russian).

**Дата поступления
в редакцию: 24.11.2025**

**Дата принятия
к публикации: 31.01.2026**

УДК 004.852

DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_32
EDN XMHBAP

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО БУФЕРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИСКАЖЕНИЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА МЕТОДАМИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРУЕМЫМ ЗЕРКАЛОМ

Ю.А. РодимковORCID: 0000-0003-2962-9366 e-mail: rodimkov@itmm.unn.ruНижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Нижний Новгород, Россия

Предлагается новый подход обучения нейронной сети для восстановления искажений волнового фронта, основанный на использовании циклического буфера данных. В отличие от традиционных методов, где обучающая выборка фиксируется заранее, предложенный подход предусматривает динамическое обновление данных в процессе обучения. Это позволяет снизить риск переобучения нейронной сети и повысить устойчивость решения задачи восстановления волнового фронта.

Ключевые слова: нейронные сети; глубокое обучение; синтетические данные; переобучение; циклический буфер; параллельные вычисления; лазерная физика; оптические системы; искажения волнового фронта; калибровка лазерной установки.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Родимков, Ю.А. Использование циклического буфера для повышения точности восстановления искажений волнового фронта методами глубокого обучения для задач управления деформируемым зеркалом // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 32-42. EDN XMHBAP
DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_32

USING CIRCULAR BUFFER TO IMPROVE ACCURACY OF WAVEFRONT DISTORTION RECONSTRUCTION USING DEEP LEARNING METHODS FOR DEFORMABLE MIRROR CONTROL PROBLEMS

Yu.A. RodimkovORCID: 0000-0003-2962-9366 e-mail: rodimkov@itmm.unn.ruNizhny Novgorod State University n.a. N.I. Lobachevsky
Nizhny Novgorod, Russia

This paper proposes a new approach to training a neural network for wave front distortion reconstruction, based on the use of a circular buffer. Unlike traditional methods, where the training set is fixed in advance, the proposed approach involves dynamic data updating during the training process. This reduces the risk of overfitting the neural network and increases the reliability of the wave front reconstruction solution.

Keywords: neural networks; deep learning; synthetic data; overfitting; circular buffer; parallel computing; laser physics; optical systems; wave front distortions; laser calibration.

FOR CITATION: Rodimkov Y.A. Using circular buffer to improve accuracy of wavefront distortion reconstruction using deep learning methods for deformable mirror control problems. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 32-42. EDN XMHBAP DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_32

Введение

Для достижения экстремальных интенсивностей в фокальной плоскости лазерных установок, включая современные петаваттные системы [1, 2], требуется устранение искажений волнового фронта. Подобные искажения возникают вследствие оптических aberrаций и технологических несовершенств таких элементов, как линзы и зеркала. Для устранения искажений волнового фронта необходима калибровка адаптивной оптической системы, обычно состоящей из деформируемого зеркала, системы управления им и датчика волнового фронта. Калибровка выполняется с помощью управления сегментами на деформируемом зеркале с целью устранения всех искажений.

Один из методов выбора оптимального управления заключается в измерении искажений волнового фронта. Это позволяет определить и задать с помощью системы управления необходимую кривизну деформируемого зеркала для коррекции волнового фронта. Классический метод калибровки предполагает использование датчика волнового фронта для измерения искажений. Однако существенным ограничением такого подхода является то, что на плотность потока в фокальной плоскости влияют aberrации необщего пути (non-common path aberrations), которые не учитываются датчиком волнового фронта, поскольку они возникают после его расположения [3-5].

Для устранения этой проблемы необходимо задавать управление на основе анализа потока энергии в фокусе. Для этого устанавливается камера с ПЗС-матрицей (прибор с зарядовой связью) [6] в фокальной плоскости, что позволяет получать изображения с распределением энергии в фокусе.

Существуют различные методы управления деформируемым зеркалом, использующие информацию из фокальной плоскости и напрямую управляющие зеркалом, основанные на жадном поиске [7, 8], генетических алгоритмах [8-10], стохастическом градиентном спуске [11-13], а также алгоритме моделирования отжига [14, 15]. К недостаткам этих методов относятся относительно большое время работы и риск застревания в локальных минимумах. Поэтому в последние годы набирает популярность применение методов глубокого обучения [16-20] для восстановления искажений волнового фронта и выбора оптимального управления. Особенностью таких подходов является возможность предварительно обучить нейронную сеть на большом массиве данных, что позволяет быстро и достаточно точно восстанавливать искажения волнового фронта по изображениям, полученным в фокальной плоскости.

В данной работе предлагается метод повышения точности калибровки оптической системы за счет использования циклического буфера с обновлением синтетических данных в процессе обучения нейронной сети для восстановления искажений волнового фронта по плотности потока в фокусе. В силу отсутствия размеченных экспериментальных данных для обучения моделей глубокого обучения используются синтетические данные, получаемые с помощью численного моделирования. Целью данной работы является не представление наилучшего метода восстановления искажений волнового фронта, а демонстрация подхода, позволяющего повысить точность за счет использования вычислительных узлов без необходимости дополнительной памяти и ресурсов на хранение и обработку данных.

Постановка задачи

Процедура калибровки адаптивной оптической системы схематично представлена на рис. 1. Пусть N_r, N_ϕ – количество точек дискретизации по радиусу и углу соответственно. Волновой фронт с искажениями $p_1 \in R^{N_r \times N_\phi}$ поступает на деформируемое зеркало, после чего сигнал направляется на полупрозрачное зеркало. Одна часть сигнала направляется для фокусировки, а другая поступает на датчик волнового фронта, обычно состоящий из оптических элементов. Датчик волнового фронта способен достаточно быстро и точно измерять искажения волнового фронта. Однако у описанного подхода есть несколько существенных не-

достатков, связанных с абберациями необщего пути. В частности, не учитываются искажения $p_3 \in R^{N_r \times N_\phi}$, возникающие в фокусирующем тракте. И наоборот, учитываются искажения $p_2 \in R^{N_r \times N_\phi}$, возникающие в тракте датчика волнового фронта, которые не влияют на область в фокусе.

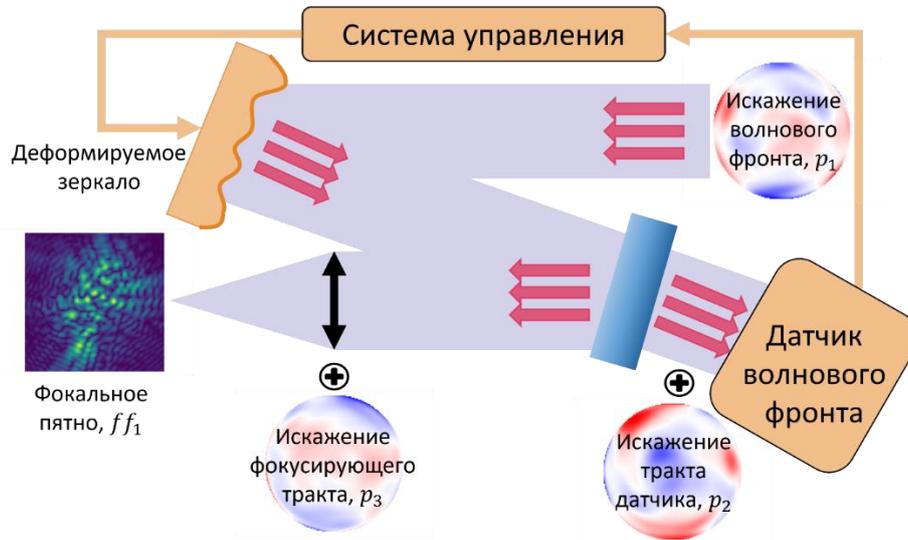


Рис. 1. Схема работы адаптивной оптической системы

Fig. 1. The operating diagram of the adaptive optical system

Для восстановления искажений волнового фронта нейронную сеть можно обучить решать обратную задачу. Прямым процессом является получение изображений в фокальной плоскости $ff_1 \in R^{b \times c}$ и его окрестности $ff_2 \in R^{b \times c}$ по искажениям волнового фронта $p \in R^{N_r \times N_\phi}$. Здесь b, c – размеры изображения в фокальной плоскости и его окрестности соответственно. Для этого в данной работе используется численное моделирование, с помощью которого формируется синтетический набор данных. Обратная задача формулируется как восстановление искажений p с помощью нейронной сети $NN: NN(ff_1, ff_2) \rightarrow p$. Распределение энергии в окрестности фокуса используется для устранения неопределенности [21]. В противном случае одной и той же информации в фокальной плоскости могут соответствовать различные искажения волнового фронта.

Математическая модель для сбора синтетических данных

Одним из способов параметризации искажений волнового фронта являются полиномы Цернике [22], которые широко применяются в задачах оптики [23, 24]. Среди их главных преимуществ можно выделить их ортогональность на единичном круге, а также ограниченность значений в диапазоне от -1 до 1 . В рамках данной задачи лазерный импульс с искаженным волновым фронтом формировался как сумма ста полиномов Цернике со случайными коэффициентами a_i . После формирования лазерного импульса с помощью преобразования Фурье рассчитывалось распределение энергии в фокусе и в его окрестности.

Четные и нечетные полиномы задавались следующим образом: $Z_n^m(p, \varphi) = R_n^m(p) \cos(m\varphi)$ и $Z_n^{-m}(p, \varphi) = R_n^m(p) \sin(m\varphi)$, где m и n – неотрицательные целые числа, удовлетворяющие условию что $n \geq m$, φ – азимутальный угол, p – радиальное расстояние, $0 \leq p \leq 1$. Радиальные многочлены R_n^m определяются следующим образом:

$$R_n^m(p) = \sum_{k=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! \left(\frac{n+m}{2} - k\right)! \left(\frac{n-m}{2} - k\right)!} p^{n-2k}$$

для четных значений $n - m$, и равны нулю для нечетных $n - m$. Графики значений полиномов Цернике в единичном круге представлены на рис. 2.

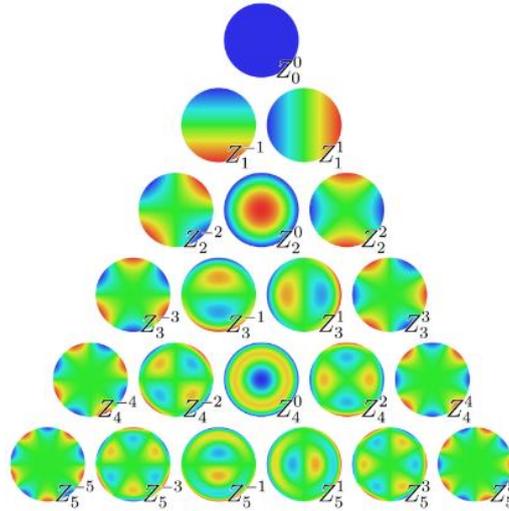


Рис. 2. Пример искажений волнового фронта в единичном круге для разных полиномов Цернике

Fig. 2. An example of wavefront distortions in a unit disk for different Zernike polynomials

Искажения лазерного импульса задавались следующим образом:

$$W(r, \varphi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n a_{nm} Z_n^m(r, \varphi)$$

Учитываются первые 100 полиномов. a_{nm} – коэффициенты, определяющие величину искажения для каждого полинома, N – максимальный порядок полиномов. Коэффициенты для полиномов Z_0^0 , Z_1^{-1} и Z_1^1 были равны нулю. Для расчета распределения энергии в окрестности фокуса к коэффициенту Z_0^0 прибавлялось значение 0.5.

Электрическое поле рассчитывалось следующим образом:

$$E(p, \varphi) = e^{\frac{2\pi i W(p, \varphi)}{\lambda}}$$

где λ – длина волны, равная 10^{-6} . Далее с помощью преобразования Фурье электрическое поле распространялось в дальнюю зону, $F(u, v) = \mathcal{F}(E(r, \varphi))$. Далее рассчитывалась интенсивность: $I(u, v) = |F(u, v)|^2$. Здесь u и v – пространственные частоты по двум осям, или координаты в дальней зоне.

Примеры синтетических данных представлены на рис 3. С увеличением силы искажения распределение энергии в фокусе становится все более хаотичным, среднеквадратичное отклонение волнового фронта соответственно увеличивается. Для обучения изображения распределений энергии в фокусе и вне фокуса нормировались на максимум отдельно для каждого изображения, так как в экспериментальных данных отсутствует информация об амплитуде сигнала. Искажения волнового фронта нормировались на тройную длину волны.

Методология

Одной из ключевых проблем методов глубокого обучения является переобучение. Самым простым решением является увеличение размера выборки. Однако это приводит к ряду других сложностей. Во-первых, вычислительная мощность устройств обычно значительно превосходит возможности устройств хранения данных. Если объем данных превышает объем оперативной памяти, и данные хранятся на жестком диске, скорость загрузки может значительно снизиться. В результате возникает необходимость загружать данные по одному объекту при каждом обращении к конкретному элементу выборки.

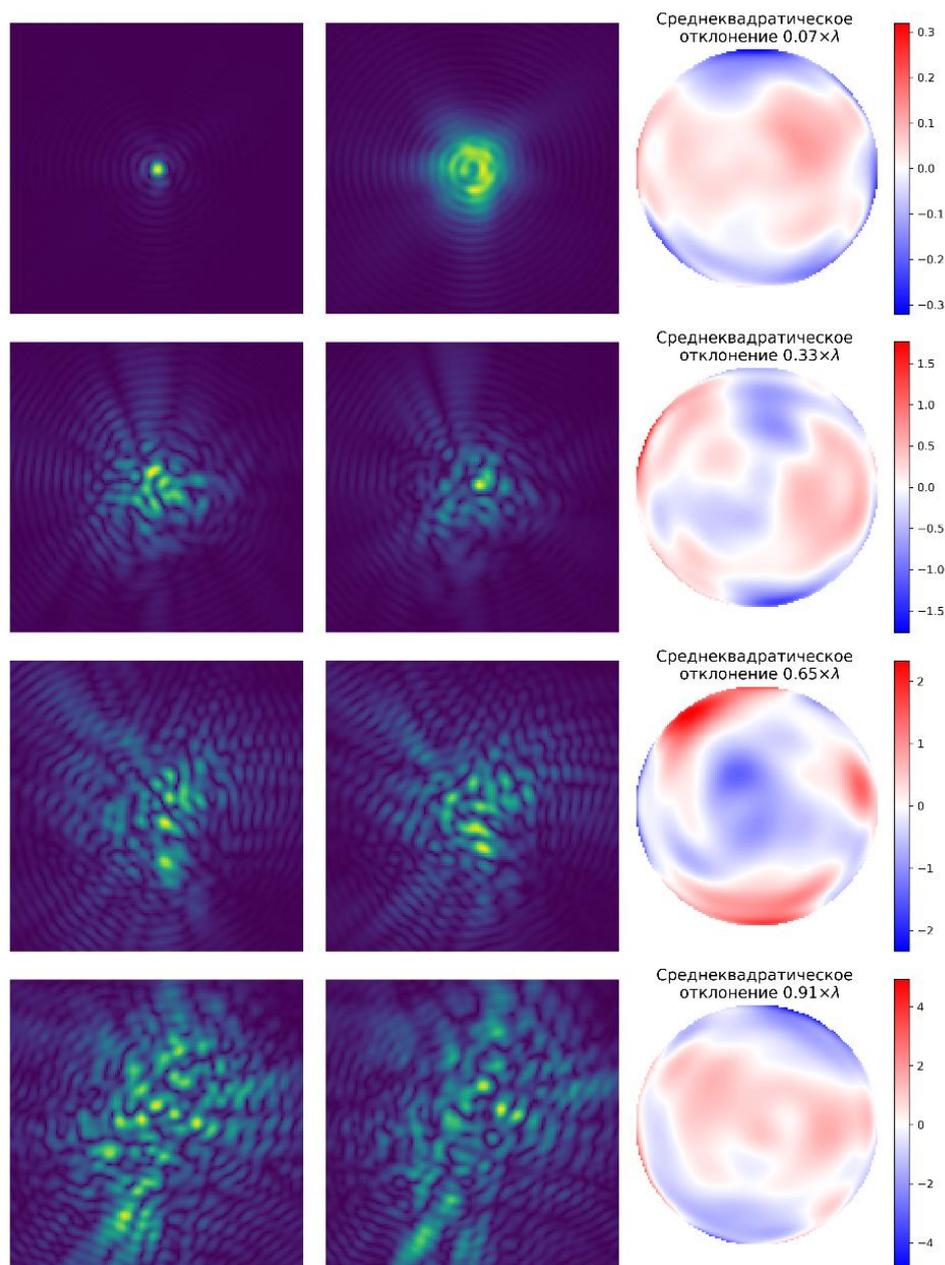


Рис. 3. Примеры синтетических данных

Столбцы (слева направо): распределение энергии в фокусе; в окрестностях фокуса; соответствующее искажение волнового фронта

Fig. 3. Examples of synthetic data

Columns (left to right): energy distribution at the focus; in the vicinity of the focus; corresponding wavefront distortion

Кроме того, при обучении используется случайный порядок обращения к данным, что делает процесс загрузки непоследовательным и нерегулярным, снижает эффективность использования вычислительных ускорителей. Во-вторых, неудовлетворительные результаты, полученные на выборке малого размера, требуют увеличения объема набора данных. Заранее неясно, какой объем данных необходим для достижения надежных результатов. Воспроизводимость экспериментов и сравнение различных подходов может предполагать обучение модели с нуля при увеличении выборки. В результате необходимо заново проводить обучение модели. В-третьих, при фиксированной выборке могут возникать «перекосы» в распределении данных. Если выборка генерируется один раз, она может закрепить случайные артефак-

ты, что приводит к искажениям в обучении модели. В-четвертых, обновление генератора данных становится сложной задачей. При улучшении генератора требуется заново создавать большие объемы данных, иначе выборка устаревает. Некоторые из этих проблем можно преодолеть, но для этого потребуются значительные изменения в способах обработки и хранения данных, обучение модели, а также последующее профилирование и тестирование.

В данной работе сравниваются два метода обучения. Первый из них – это обучение на выборке фиксированного размера. Второй – обучение с использованием циклического буфера. Он часто применяется в задачах обучения с подкреплением при использовании онлайн-подхода [25]. В таких задачах он используется как буфер опыта (experience buffer) или буфер повторений (replay buffer), куда сохраняются результаты предыдущих взаимодействий агента с окружающей средой. Схожая идея применяется и в данной работе.

Описание метода использования циклического буфера

Процесс обучения и обновление синтетических данных в циклическом буфере происходят асинхронно. Обучение представляет собой классическую процедуру, выполняемую на процессе-мастере. В пакетном режиме обучающие примеры случайным образом, без повторений, выбираются из набора данных. Эта часть выполняется в критической секции. Далее происходит прямой проход по нейронной сети, а затем обратный проход для обновления весов. Буфер в начальный момент хранит заранее собранную выборку. Ее размер может быть равен размеру буфера. Такой подход направлен на борьбу с эффектом холодного старта, при котором модель может переобучаться на небольшой выборке, что замедляет сходимость. После начала обучения запускается множество дополнительных процессов для обновления набора синтетических данных. В каждом из них производится генерация случайных коэффициентов полиномов Цернике, рассчитывается электрическое поле, а затем выполняется численное моделирование. В данной работе для выполнения этих задач использовалось десять процессов.

Для уменьшения накладных расходов, связанных с синхронизацией, в каждом процессе сначала собирается 100 синтетических примеров. Как только пачка данных будет сгенерирована, процессы встают в очередь с процессом мастера. Далее, в порядке очереди, данные добавляются в массивы с данными. Часть с добавлением данных также находится в критической секции. В среднем, за одну эпоху генерировалось около 25 000 объектов.

Эксперименты проводились на суперкомпьютере «Лобачевский». В качестве вычислительного оборудования использовались процессоры AMD EPYC 7742 64-Core, при запуске выделялось 16 ядер графические процессоры A100 40 Гб. Обучение нейронной сети проводилось с использованием фреймворка PyTorch. Создание процессов осуществлялось с помощью библиотеки multiprocessing. Хранение данных осуществлялось в разделяемой памяти, доступной всем процессам.

Описание архитектуры и гиперпараметров

Для решения поставленной задачи использовалась архитектура U-Net [26]. В качестве входных данных использовались двухканальные изображения, где первый канал представлял собой изображение в фокусе $f f_1$, а второй – изображение в окрестности фокуса $f f_2$. Модель обучалась для восстановления изображения искажений волнового фронта. Разрешение всех изображений, как входных, так и выходных, составляло 128×128 пикселей. На последнем слое нейронной сети применялась круглая маска, в которой значения вне круга были равны нулю, а внутри и на границе – единице. Для обучения использовалась средняя квадратичная ошибка. В качестве оптимизатора применялся Adam с скоростью обучения 0.0005. Размер пакета (batchsize) составлял 500.

Для сравнительного анализа использовались три выборки, размеры которых составляли 100 000, 200 000 и 400 000 примеров. Обучение проводилось с использованием буфера,

размер которого был равен 100 000 примеров. В качестве исходной выборки для инициализации использовалась выборка размером 100 000 примеров. Каждая конфигурация обучалась в течение 40 000 итераций для обеспечения единообразия. Для валидации и тестирования использовались отдельные выборки, содержащие 5 000 и 2 000 примеров соответственно.

Результаты

Было проведено сравнение точности нейронных сетей, обученных на различных выборках. Результаты этого сравнения приведены в табл. 1. На тренировочных данных наилучшая точность достигается при использовании наименьшей по размеру выборки. Это связано с тем, что при уменьшении размера выборки модель в большей степени подвержена переобучению. На тестовых данных наилучшая точность демонстрирует нейронная сеть, обученная с использованием циклического буфера. Среди выборок фиксированного размера наилучший результат, как и ожидалось, был достигнут при использовании самой большой выборки, включающей 400 000 примеров. Важно отметить, что точность на тренировочных данных совпадает как для выборки размером 400 000, так и для метода с циклическим буфером. Но на тестовых данных разница между этими двумя подходами значительна. Дальнейшее увеличение размера фиксированной выборки может способствовать повышению точности. Однако это сопряжено с рядом технических сложностей, включая проблемы хранения и обработки данных. Так, для выборки, состоящей из 400 000 примеров, требуется уже около 80 ГБ памяти в одинарной точности.

Таблица 1.
Средняя абсолютная ошибка восстановления искажений волнового фронта с помощью моделей нейронной сети, обученных на разных наборах данных

Table 1.
Mean absolute error of wavefront distortion reconstruction using neural network models trained on different datasets

	Обучение на наборе данных из 100 тысяч примеров	Обучение на наборе данных из 200 тысяч примеров	Обучение на наборе данных из 400 тысяч примеров	Обучение с использованием циклического буфера
Ошибка на тренировочных данных	0.012	0.018	0.022	0.021
Ошибка на тестовых данных	0.046	0.035	0.028	0.021

На рис. 4 представлены графики зависимости ошибки от числа итераций обучения для различных выборок. Для выборок размером 100 000 и 200 000 примеров ошибка модели достаточно быстро выходит на плато. Для выборки размером 400 000 примеров, начиная с середины процесса обучения, наблюдается небольшая разница между ошибками на тренировочных и валидационных данных. Однако модель продолжает обучаться и обобщать. Ошибка на тренировочных и валидационных данных совпадает на всем протяжении обучения для нейронной сети, обученной с помощью циклического буфера. Это связано с постоянным обновлением, что предотвращает переобучение и является хорошим результатом.

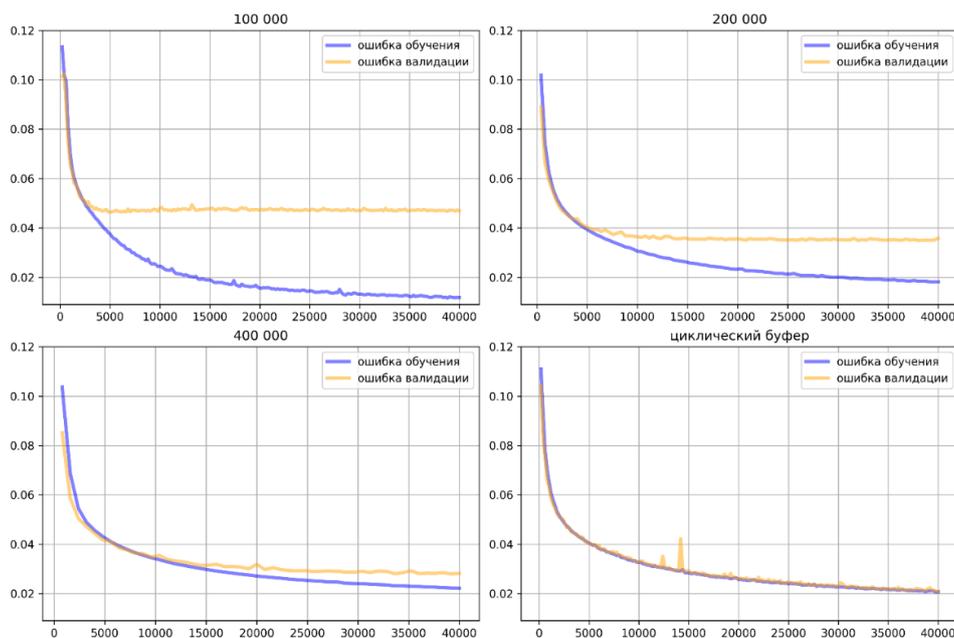


Рис. 4. Графики средней абсолютной ошибки обучения нейронной сети для различных выборок
Fig. 4. Graphs of the mean absolute error of neural network training for different samples

Заключение

Предложен метод обновления синтетических данных в процессе обучения с использованием циклического буфера. Целью данного подхода является предотвращение переобучения в задаче восстановления искажений волнового фронта и повышение точности калибровки адаптивной оптической системы. Такой подход более эффективен по сравнению с классическим вариантом, при котором выборка синтетических данных формируется один раз. По сравнению с выборкой аналогичного размера точность модели возросла в два раза. Кроме того, точность метода улучшилась примерно на 30 % по сравнению с выборкой, размер которой в четыре раза превышал размер циклического буфера.

Метод упрощает борьбу с переобучением при работе с синтетическими данными, особенно в случаях, когда возможно быстро генерировать новые синтетические примеры. Он может представлять интерес в условиях, когда ограничены ресурсы хранения данных, необходимо использовать выборки большого размера или разные выборки для различных конфигураций эксперимента. Предложенный подход демонстрирует значительное улучшение качества обучения за счет динамического обновления данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект FSWR-2026-0007.

Автор выражает благодарность за использование вычислительных ресурсов, предоставленных ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Библиографический список

1. **Danson, C.N.** Petawatt and exawatt class lasers worldwide / C.N. Danson [et al]. // High Power Laser Science and Engineering. – 2019. – Т. 7. – С. 54.
2. **Соловьев, А.А.** Исследования в области физики плазмы и ускорения частиц на петаваттном лазере PEARL / А.А. Соловьев [и др.] // Успехи физических наук. – 2024. – Т. 194. – № 3. – С. 313-335.

3. **Sauvage, J.F.** Calibration and precompensation of noncommon path aberrations for extreme adaptive optics / J.F. Sauvage [et al]. // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2007. – Т. 24. – № 8. – С. 2334-2346.
4. **Zhang, Q.** Adaptive optics for optical microscopy / Q. Zhang [et al] // *Biomedical Optics Express*. – 2023. – Т. 14. – №. 4. – С. 1732-1756.
5. **Radhakrishnan, V.M.** Estimating non-common path aberrations with an adaptive coronagraph / V.M. Radhakrishnan [et al] // *Astronomy & Astrophysics*. – 2023. – Т. 670. – С. A137.
6. **Соловьев, А.А.** Адаптивная система коррекции волнового фронта лазерного комплекса PEARL / А.А. Соловьев [и др.] // *Квантовая электроника*. – 2020. – Т. 50. – № 12. – С. 1115-1122.
7. **Yang, P.** 19-element sensorless adaptive optical system based on modified hill-climbing and genetic algorithms / P. Yang [et al]. // *3rd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment*. – SPIE, 2007. – Т. 6723. – С. 36-42.
8. **Sheldakova, J.V.** Genetic and hill-climbing algorithms for laser beam correction / J.V. Sheldakova, A.L. Rukosuev, A.V. Kudryashov // *Laser Resonators and Beam Control VII*. – SPIE, 2004. – Т. 5333. – С. 106-111.
9. **Poland, S.P.** Evaluation of fitness parameters used in an iterative approach to aberration correction in optical sectioning microscopy / S.P. Poland, A. J. Wright, J.M. Girkin // *Applied optics*. – 2008. – Т. 47. – №. 6. – С. 731-736.
10. **Planchon, T.A.** Adaptive correction of a tightly focused, high-intensity laser beam by use of a third-harmonic signal generated at an interface / T.A. Planchon [et al]. // *Optics letters*. – 2006. – Т. 31. – № 14. – С. 2214-2216.
11. **Ma, H.** Full-field unsymmetrical beam shaping for decreasing and homogenizing the thermal deformation of optical element in a beam control system / H. Ma [et al]. // *Optics Express*. – 2011. – Т. 19. – №. S5. – С. A1037-A1050.
12. **Piatrou, P.** Beaconless stochastic parallel gradient descent laser beam control: numerical experiments / P. Piatrou, M. Roggemann // *Applied optics*. – 2007. – Т. 46. – №. 27. – С. 6831-6842.
13. **Котов, А.В.** Адаптивная система коррекции оптических aberrаций излучения мощных лазеров с динамическим определением эталонной формы волнового фронта / А.В. Котов [и др.] // *Квантовая электроника*. – 2021. – Т. 51. – №. 7. – С. 593-596.
14. **Zommer, S.** Simulated annealing in ocular adaptive optics / S. Zommer [et al] // *Optics letters*. – 2006. – Т. 31. – №. 7. – С. 939-941.
15. **El-Agmy, R.** Adaptive beam profile control using a simulated annealing algorithm / R. El-Agmy [et al] // *Optics Express*. – 2005. – Т. 13. – №. 16. – С. 6085-6091.
16. **Котов, А.В.** Восстановление волнового фронта лазерного пучка на основе анализа распределения интенсивности в фокусе и вне фокуса с использованием сверточной нейронной сети / А.В. Котов, [и др.] // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2024. – Т. 67. – №. 11-12. – С. 1013-1019.
17. **He, Y.** Deep learning wavefront sensing method for Shack-Hartmann sensors with sparse sub-apertures / Y. He [et al]. // *Optics Express*. – 2021. – Т. 29. – №. 11. – С. 17669-17682.
18. **Ju, G.** Feature-based phase retrieval wavefront sensing approach using machine learning / G. Ju [et al] // *Optics express*. – 2018. – Т. 26. – №. 24. – С. 31767-31783.
19. **Guo, Y.** Adaptive optics based on machine learning: a review / Y. Guo [et al] // *Opto-Electronic Advances*. – 2022. – Т. 5. – №. 7. – С. 200082-1-200082-20.
20. **Guo, H.** Improved machine learning approach for wavefront sensing / H. Guo [et al] // *Sensors*. – 2019. – Т. 19. – №. 16. – С. 3533.
21. **Gonsalves, R.A.** Phase retrieval and diversity in adaptive optics / R.A. Gonsalves // *Optical Engineering*. – 1982. – Т. 21. – №. 5. – С. 829-832.
22. **Zernike, F.** Diffraction theory of the knife-edge test and its improved form, the phase-contrast method / F. Zernike // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 94, p. 377-384. – 1934. – Т. 94. – С. 377-384.
23. **Wyant, J.C.** Basic wavefront aberration theory for optical metrology / J.C. Wyant, K. Creath // *Applied optics and optical engineering*. – 1992. – Т. 11. – №. part 2. – С. 28-39.
24. **Liu, Y.** Hill-climbing algorithm based on Zernike modes for wavefront sensorless adaptive optics / Y. Liu, [et al] // *Optical Engineering*. – 2013. – Т. 52. – №. 1. – С. 016601-016601.
25. **Lapan, M.** Deep reinforcement learning hands-on. – Birmingham: Packt Publishing, 2018. – Т. 6.

26. **Ronneberger, O.** U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention. – Cham: Springer international publishing, 2015. – С. 234-241.

References

1. Danson C.N., et al. Petawatt and exawatt class lasers worldwide. *High Power Laser Sci Eng.* 2019; 7: e54.
2. Solov'ev A.A., et al. Issledovaniya v oblasti fiziki plazmy i uskoreniya chastits na petavattnom lazere PEARL [Research in the field of plasma physics and particle acceleration at the PEARL petawatt laser]. *Uspekhi fizicheskikh nauk [Physics-Uspekhi]*. 2024;194(3):313-335 (in Russian)/
3. Sauvage J.F., et al. Calibration and precompensation of noncommon path aberrations for extreme adaptive optics. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis.* 2007;24(8):2334-2346.
4. Zhang Q., et al. Adaptive optics for optical microscopy. *Biomed Opt Express.* 2023;14(4):1732-1756.
5. Radhakrishnan V.M., et al. Estimating non-common path aberrations with an adaptive coronagraph. *Astron Astrophys.* 2023;670:A137.
6. Solov'ev A.A., et al. Adaptivnaya sistema korrektsii volnovogo fronta lazernogo kompleksa PEARL [Adaptive wavefront correction system of the PEARL laser facility]. *Kvantovaya elektronika [Quantum Electronics]*. 2020;50(12):1115-1122 (in Russian).
7. Yang P., et al. 19-element sensorless adaptive optical system based on modified hill-climbing and genetic algorithms. In: 3rd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment. Vol. 6723. Bellingham: SPIE; 2007. p. 36-42.
8. Sheldakova J.V., Rukosuev A.L., Kudryashov AV. Genetic and hill-climbing algorithms for laser beam correction. In: *Laser Resonators and Beam Control VII*. Vol. 5333. Bellingham: SPIE; 2004. p. 106-11.
9. Poland SP, Wright AJ, Girkin JM. Evaluation of fitness parameters used in an iterative approach to aberration correction in optical sectioning microscopy. *Appl Opt.* 2008;47(6):731-736.
10. Planchon TA, et al. Adaptive correction of a tightly focused, high-intensity laser beam by use of a third-harmonic signal generated at an interface. *Opt Lett.* 2006;31(14):2214-2216.
11. Ma H., et al. Full-field unsymmetrical beam shaping for decreasing and homogenizing the thermal deformation of optical element in a beam control system. *Opt Express.* 2011;19(S5): A1037-A1050.
12. Piatrou P., Roggemann M. Beaconless stochastic parallel gradient descent laser beam control: numerical experiments. *Appl Opt.* 2007;46(27):6831-6842.
13. Kotov A.V., et al. Adaptivnaya sistema korrektsii opticheskikh aberratsii izlucheniya moshchnykh lazerov s dinamicheskim opredeleniem etalonnnoy formy volnovogo fronta [Adaptive system for correcting optical aberrations of high-power laser radiation with dynamic determination of the reference wavefront shape]. *Kvantovaya elektronika [Quantum Electronics]*. 2021;51(7):593-596 (in Russian).
14. Zommer S., et al. Simulated annealing in ocular adaptive optics. *Opt Lett.* 2006;31(7):939-41.
15. El-Agmy R., et al. Adaptive beam profile control using a simulated annealing algorithm. *Opt Express.* 2005;13(16):6085-6091.
16. Kotov A.V., et al. Vostanovlenie volnovogo fronta lazernogo puchka na osnove analiza raspredeleniya intensivnosti v fokuse i vne fokusa s ispol'zovaniem svertochnoi neironnoi seti [Laser beam wavefront reconstruction based on in-focus and out-of-focus intensity distribution analysis using a convolutional neural network]. *Izvestiya vuzov. Radiofizika [Radiophysics and Quantum Electronics]*. 2024;67(11-12):1013-1019 (in Russian).
17. He Y., et al. Deep learning wavefront sensing method for Shack-Hartmann sensors with sparse sub-apertures. *Opt Express.* 2021;29(11): 17669-17682.
18. Ju G., et al. Feature-based phase retrieval wavefront sensing approach using machine learning. *Opt Express.* 2018;26(24):31767-31783.
19. Guo Y., et al. Adaptive optics based on machine learning: a review. *Opto-Electron Adv.* 2022;5(7):200082.
20. Guo H., et al. Improved machine learning approach for wavefront sensing. *Sensors.* 2019;19(16):3533.
21. Gonsalves R.A. Phase retrieval and diversity in adaptive optics. *Opt Eng.* 1982;21(5):829-32.
22. Zernike F. Diffraction theory of the knife-edge test and its improved form, the phase-contrast method. *Mon Not R Astron Soc.* 1934; 94: 377-384.

23. Wyant J.C., Creath K. Basic wavefront aberration theory for optical metrology. In: Applied optics and optical engineering. Vol. 11. 1992. p. 28-39.
24. Liu Y., et al. Hill-climbing algorithm based on Zernike modes for wavefront sensorless adaptive optics. Opt Eng. 2013;52(1):016601.
25. Lapan M. Deep Reinforcement Learning Hands-On. Birmingham: Packt Publishing; 2018.
26. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In: International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Cham: Springer International Publishing; 2015. p. 234-41.

*Дата поступления
в редакцию: 14.11.2025*

*Дата принятия
к публикации: 31.01.2026*

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.039.52.034.3

DOI 10.46960/1816-210X_2026_1_43

EDN BUAPKZ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАСШТАБА
МОДЕЛИ И ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА НА ПРОЦЕССЫ
ГИДРОДИНАМИКИ И НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВЫХОДЕ ИЗ КОЛОННЫ ТВС
ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВТГР****С.М. Дмитриев**ORCID: 0000-0003-0637-7004 e-mail: dmitriev@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.А. Добров**ORCID: 0000-0001-7363-8791 e-mail: dobrov@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***М.А. Легчанов**ORCID: 0000-0002-6195-3804 e-mail: legchanov@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***М.А. Игонин**ORCID: 0000-0002-6706-061X e-mail: igonin_ma@okbm.nnov.ruАО «ОКБМ Африкантов»
Нижний Новгород, Россия

Анализируется проблема неравномерности энерговыделения и нагрева теплоносителя в активной зоне высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР), играющая важную роль при обосновании его теплотехнической надежности. Для исследования влияния масштаба экспериментальной модели на распределение локальных гидродинамических величин и коэффициент гидравлического сопротивления созданы две модели опорной колонны тепловыделяющей сборки (ТВС), выполненные в масштабах 80 и 40 % от натурального размера. Исследования влияния уменьшения числа Рейнольдса на процесс неизотермического смещения потоков проводились на модели двух смежных опорных колонн ТВС масштабом 40 % от натурального размера. Снижение числа Рейнольдса до 35 % от натурального значения не оказывает существенного влияния на распределения локальных относительных скоростей в моделях, а также не приводит к изменению коэффициента гидравлического сопротивления, что может свидетельствовать об области автомодельного течения для рассмотренной конструкции. Для модели двух опорных колонн влияние числа Рейнольдса из диапазона 30 ÷ 55 % от натурального значения на распределение локальной температуры в области смещения оказывается незначительным. Поля относительной температуры остаются подобными, а степень перемешивания практически не меняется.

Работа выполнена в рамках комплексного Инвестиционного проекта АО «Концерн Росэнергоатом».

Ключевые слова: реакторная установка; высокотемпературный газоохлаждаемый реактор; атомная энерготехнологическая станция; атомно-водородная энергетика; гидродинамика; перемешивание; моделирование; подобие; тепловыделяющая сборка.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дмитриев, С.М. Исследование влияния масштаба модели и числа Рейнольдса на процессы гидродинамики и неизотермического перемешивания теплоносителя на выходе из колонны ТВС призма-

тической активной зоны ВТГР / Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Игонин М.А // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 43-51. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_43 EDN: BUAPKZ

STUDY OF MODEL SCALE AND REYNOLDS NUMBER INFLUENCE ON COOLANT HYDRODYNAMICS AND NON-ISOTHERMAL MIXING AT FUEL ASSEMBLY COLUMN OUTLET OF HTGR PRISMATIC CORE

S.M. Dmitriev

ORCID: **0000-0002-4037-861X** e-mail: **dmitriev@nntu.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Dobrov

ORCID: **0000-0001-7363-8791** e-mail: **dobrov@nntu.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.A. Legchanov

ORCID: **0000-0002-6195-3804** e-mail: **legchanov@nntu.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.A. Igonin

ORCID: **0000-0002-6706-061X** e-mail: **igonin_ma@okbm.nnov.ru**
JSC «OKBM Afrikantov»
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article considers the problem of uneven energy release and heating of the coolant in the high-temperature gas-cooled reactor (HTGR) core, which plays an important role in substantiating its thermal engineering reliability. Two models of a fuel assembly (FA) support column were created to study the effect of experimental model scale on the distribution of local hydrodynamic quantities and the hydraulic resistance coefficient. The models were constructed at scales of 80 % and 40 % of the actual size. Studies of the effect of the decrease in the Reynolds number on the process of non-isothermal mixing of flows were carried out on a model of two adjacent FA support columns at a scale of 40 % of the actual size. Reducing the Reynolds number to 35 % of the natural value does not have a significant effect on the distribution of local relative velocities in the models, and does not lead to a change in the hydraulic resistance coefficient, which may indicate a region of self-similar flow for the considered design. The influence of the Reynolds number from the range of 30 ÷ 55% of the natural value has a weak effect on the distribution of local temperature in the mixing region for the model of two support columns. The fields of relative temperature remain similar and the mixing degree remains virtually unchanged.

This study is done in the frames of the complex Investment project of Rosenergoatom JSC.

Keywords: reactor; high-temperature gas-cooled reactor; nuclear power plant; atomic-hydrogen energy; hydrodynamics, mixing; modeling; similarity; fuel assembly.

FOR CITATION: S.M. Dmitriev, A.A. Dobrov, M.A. Legchanov and M.A. Igonin. Study of model scale and Reynolds number influence on coolant hydrodynamics and non-isothermal mixing at fuel assembly column outlet of HTGR prismatic core. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 43-51.
DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_43 EDN: BUAPKZ

Введение

В качестве источника высокопотенциального тепла для атомной энерготехнологической станции (АЭТС), создаваемой в рамках комплексного Инвестиционного проекта АО «Концерн Росэнергоатом», рассматривается высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (ВТГР) [1]. При его разработке одним из ключевых вопросов является обоснование теплотехнической надежности реактора в целом и его элементов в частности [2]. Центральной

проблемой является неравномерность энерговыделения и нагрева теплоносителя в активной зоне реактора, в результате чего в нижний собирающий коллектор из отдельных тепловыделяющих сборок (ТВС) поступают потоки с различной температурой. Для обоснования и обеспечения требуемого ресурса теплообменного оборудования первого контура необходимо исследование уровня температурной неравномерности потоков теплоносителя на выходе из активной зоны в собирающем коллекторе ВТГР и горячем газоходе. Для решения этой задачи в НГТУ создан исследовательский стенд ФТ-А1 с атмосферным воздухом в качестве рабочей среды. В работе [3] проведен обзор мирового опыта по экспериментальному решению подобной задачи и выполнен анализ подобия с определением критериев подобия, важных для исследуемого процесса. На основе проведенного анализа сформулированы основные требования к исследовательской установке.

Однако из-за технических и физических ограничений невозможно воспроизвести исследуемый процесс неизотермического перемешивания с одновременным соблюдением всех определяющих критериев подобия. Эти ограничения приводят к необходимости уменьшения масштаба экспериментальной модели и снижению расхода рабочей среды относительно требуемого для точного соблюдения критерия Рейнольдса. Отличия от натурного режима течения потребовали проведения дополнительных экспериментальных исследований по обоснованию масштаба экспериментальной модели и значения критерия Рейнольдса.

Исследование локальных гидродинамических характеристик в моделях одиночной опорной колонны

Для исследования влияния масштаба экспериментальной модели на распределение локальных гидродинамических величин и коэффициент гидравлического сопротивления был создан аэродинамический экспериментальный стенд (рис. 1а).

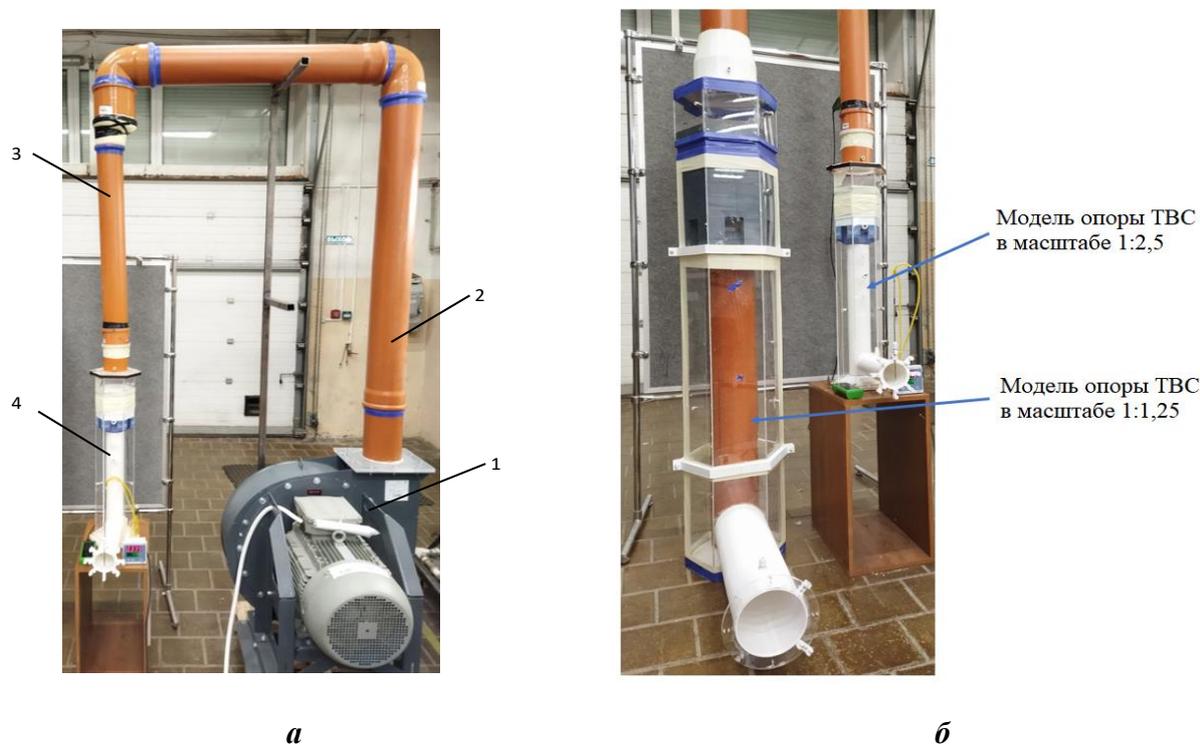


Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда и моделей опорной колонны ТВС:

а – общий вид аэродинамического стенда;

б – общий вид разномасштабных экспериментальных моделей опорной колонны ТВС

Fig. 1. General view of the experimental bench and models of the fuel assembly support column:

a – aerodynamic bench; б – multi-scale experimental models of the fuel assembly support column

Он состоит из разомкнутого контура с вентилятором высокого давления, преобразователя частоты, соединительного трубопровода, разномасштабных экспериментальных моделей (ЭМ) одиночной опорной колонны ТВС, заключенной в шестигранный чехол и имеющей выходной патрубок с диаметром, равным диаметру колонны.

Модели отличались геометрическим масштабом. Модель № 1 имела масштаб 1:1,25 (80 % от натурального размера), модель № 2 – 1:2,5 (40 % от натурального размера). Общий вид масштабных моделей представлен на рис. 1б, их схема – на рис. 2. Каждая модель состояла из входного патрубка 1, камеры 2, служащей переходом с круглого сечения входного патрубка на шестигранное, имитатора нижнего блока ТВС 3, имитатора опорной колонны 4, шестигранного чехла 5 с внутренним размером, равным размеру под ключ ТВС (с учетом масштаба модели), нижнего шестигранного элемента опоры 6, выходного патрубка 7.

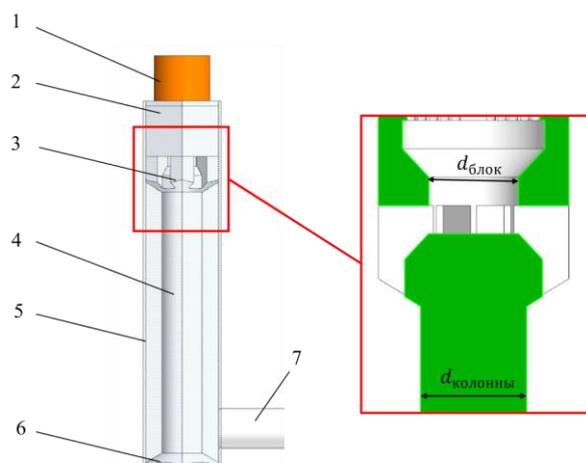


Рис. 2. Схема экспериментальной модели

Fig. 2. Scheme of the experimental model

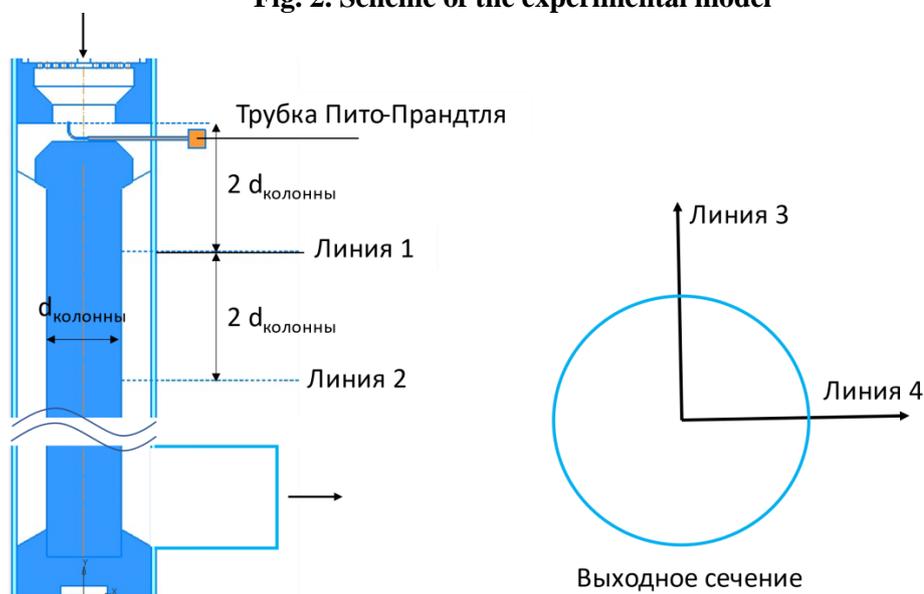


Рис. 3. Схема линий измерения локальной скорости

Fig. 3. Scheme of local velocity measurement line

Методика проведения исследований заключалась в определении локальных значений скорости воздушного потока в характерных сходственных точках экспериментальных моделей, приведении полученных значений к безразмерному виду и их сравнении для двух моделей. Схема расположения четырех линий, вдоль которых производилось измерение скорости,

показана на рис. 3. Результаты измерений сравнивались для нескольких режимов течения, характеризуемых числом Рейнольдса Re , которое определялось по формуле:

$$Re = \frac{W \cdot d_{\text{колонны}}}{\nu} \quad (1)$$

где W – среднерасходная скорость воздуха в выходном отверстии собирающего блока, м/с; $d_{\text{колонны}}$ – диаметр опорной колонны, м; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с.

Среднерасходная скорость рабочей среды W определялась как отношение измеряемого на стенде объемного расхода Q к площади круглого отверстия собирающего блока по формуле:

$$W = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_{\text{блок}}^2}, \quad (2)$$

где $d_{\text{блок}}$ – диаметр выходного отверстия собирающего блока, м.

В номинальном режиме работы натурного реактора ВТГР, по данным теплогидравлического расчета, определенное по вышеописанным формулам число Рейнольдса на выходе из колонн ТВС составит 280000–350000 в зависимости от типа ТВС (под рабочий орган СУЗ или стандартной) и расхода через нее. В экспериментальном исследовании распределения безразмерной скорости диапазон чисел Рейнольдса снизу был ограничен возможностями измерения малых значений локальной скорости пневмометрической трубкой Пито-Прандтля, а сверху – производительностью вентилятора для модели 1:1,25 или максимальной скоростью на выходе из отверстий собирающего блока 50 м/с для модели 1:2,5. Такое ограничение скорости в наименьшем по площади сечении связано с обеспечением малого числа Маха в модели, чтобы воздух можно было считать несжимаемой средой.

В ходе исследования были проведены три серии экспериментов: на модели 1:1,25 при числе Рейнольдса 258700, на модели 1:2,5 при числах Рейнольдса 117700 и 228700. Результаты измерения локальных значений скорости приводились к безразмерному виду:

$$W^* = \frac{W_{\text{лок}}}{W}, \quad (3)$$

где $W_{\text{лок}}$ – локально измеренная скорость потока в модели, м/с.

Результаты распределения локальных значений безразмерной скорости вдоль характерных линий представлены на рис. 4. Полученные данные свидетельствуют о весьма малой зависимости распределения безразмерной скорости от выбранного масштаба. Кроме того, снижение числа Рейнольдса до 40 % от номинального также практически не сказывается на распределении безразмерной скорости на разных участках модели, что может свидетельствовать об автомодельности течения по отношению к критерию Рейнольдса в рассмотренном диапазоне его значений. В ходе эксперимента определялась величина коэффициента гидравлического сопротивления ξ (КГС) в зависимости от числа Рейнольдса в обеих моделях:

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta P_{\text{полн}}}{\rho \cdot W^2}, \quad (4)$$

где $\Delta P_{\text{полн}}$ – перепад полного давления между входным и выходным сечениями, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³.

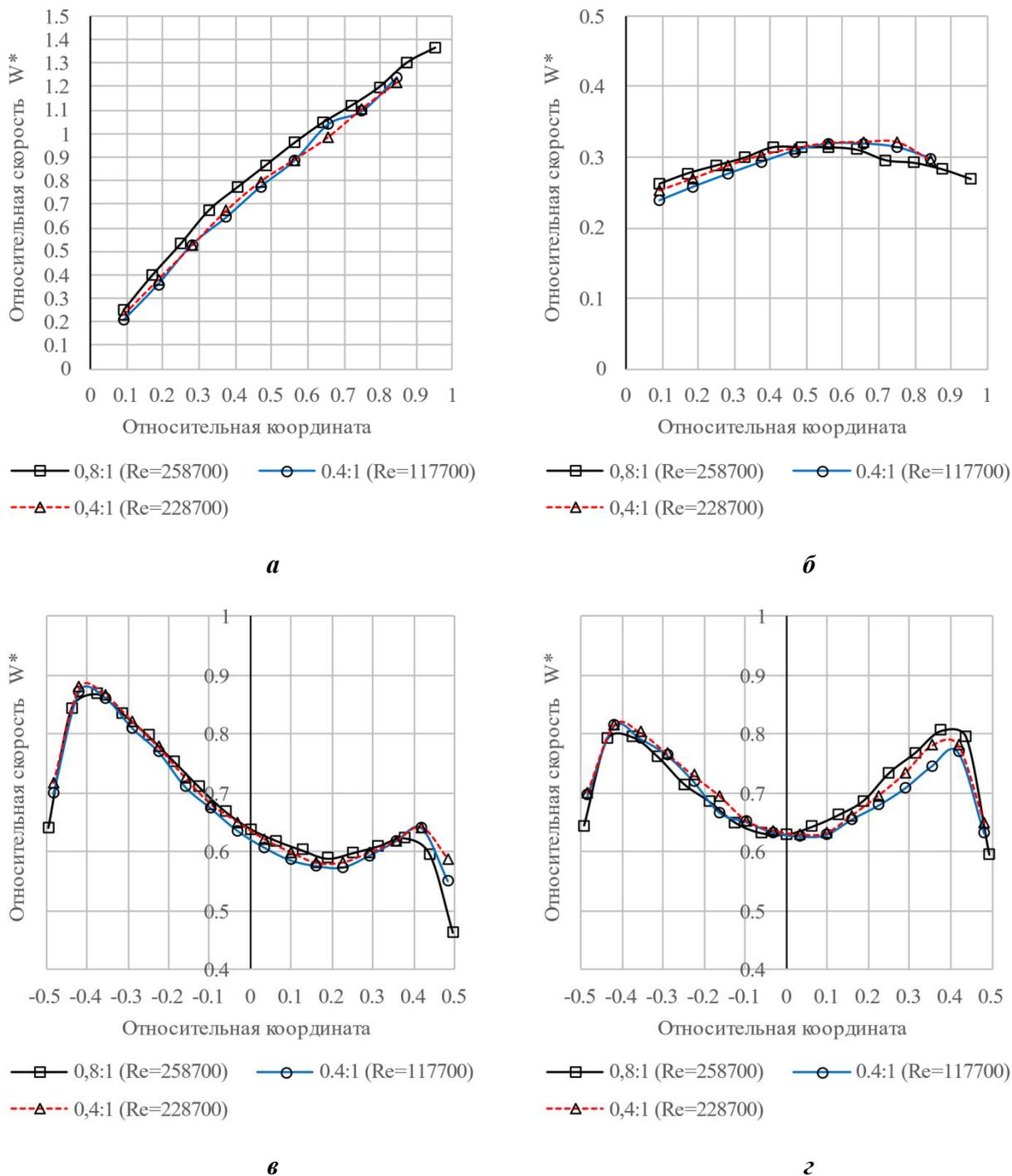


Рис. 4. Распределение относительной скорости в выходном сечении экспериментальной модели:
a – линия 1; *б* – линия 2; *в* – линия 3; *г* – линия 4

Fig. 4. Distribution of relative velocity in the outlet section of the experimental model:
a – line 1; *б* – line 2; *в* – line 3; *г* – line 4

На рис. 5 представлены результаты определения КГС для двух ЭМ, отличающихся масштабом. В рассмотренном диапазоне чисел Рейнольдса КГС остается практически постоянным, что также может свидетельствовать об области автомодельного течения для данной геометрии относительно числа Рейнольдса.

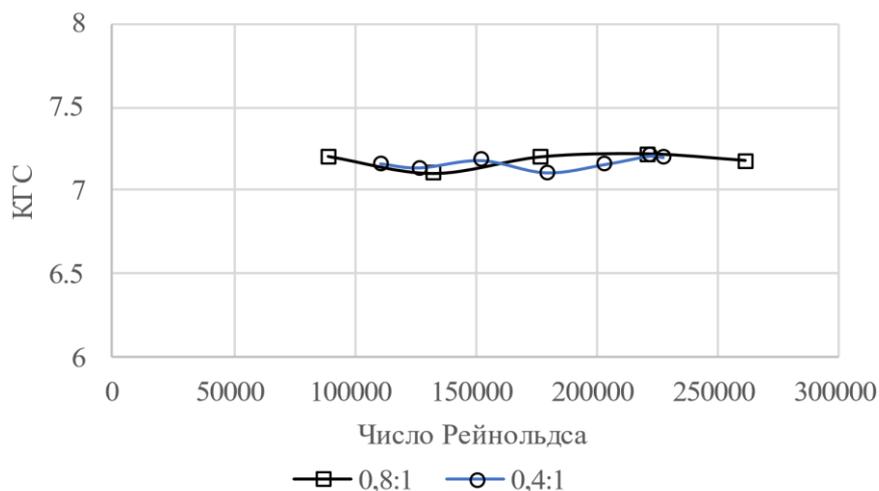


Рис. 5. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса для двух ЭМ

Fig. 5. Dependence of the hydraulic resistance coefficient on the Reynolds number for two experimental models

Исследование неизотермического перемешивания теплоносителя в модели двух опорных колонн

Для исследования влияния уменьшения числа Рейнольдса на процесс неизотермического смешения потоков была изготовлена модель двух смежных опорных колонн ТВС. Масштаб модели составил 40 % от натурального размера опорных колонн. В один имитатор выходного блока ТВС подавался холодный воздух с массовым расходом $G_{\text{хол}}$ и температурой $T_{\text{хол}}$, в другой горячий с расходом $G_{\text{гор}}$ и температурой $T_{\text{гор}}$. Модель в нижней части была снабжена выходным патрубком, расположенным перпендикулярно опорным колоннам по плоскости симметрии. Схема модели показана на рис. 6.

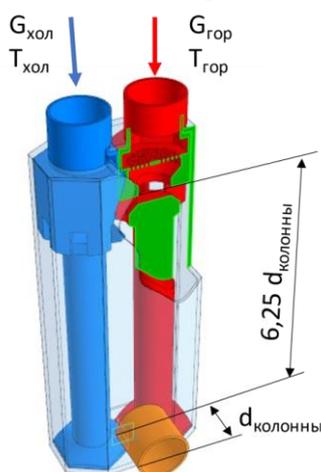


Рис. 6. Схема экспериментальной модели двух смежных опорных колонн

Fig. 6. Scheme of the experimental model of two adjacent support columns

В ходе исследований были рассмотрены три режима, отличающиеся числами Рейнольдса, определенными по диаметру колонны и скорости во входном сечении (аналогично экспериментам с одиночной колонной). Массовые расходы воздуха по обоим каналам модели выставлялись одинаковыми. Были рассмотрены режимы, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Параметры экспериментальных режимов

Table 1.
Parameters of experimental modes

№ режима	Температура на входе в холодный канал модели, °С	Температура на входе в горячий канал модели, °С	Число Рейнольдса в холодном канале	Число Рейнольдса в горячем канале
1	27,11	60,96	70416	59450
2	28,78	50,08	111600	99500
3	30,81	44,11	174280	162150

Для всех режимов производилась запись значений температуры в 33 точках выходного сечения. Для каждой из них были записаны по 1000 значений температуры с частотой 3 измерения в секунду, после чего данные усреднялись. Безразмерным параметром, к которому приводились результаты измерений, была безразмерная температура T^* :

$$T^* = \frac{T - T_{\text{хол}}}{T_{\text{гор}} - T_{\text{хол}}}, \quad (5)$$

T – локальное значение температуры теплоносителя, °С.

Также определялся интегральный параметр – степень перемешивания φ , которая характеризует интенсивность перемешивания неизотермических потоков и зависит от максимальной разности температуры потока в выходном сечении модели ΔT и исходной (входной) неравномерности температуры теплоносителя:

$$\varphi = \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{\text{гор}} - T_{\text{хол}}}\right) \cdot 100\% \quad (6)$$

По результатам измерений были построены картограммы распределения безразмерной температуры в выходном сечении модели для трех режимов (рис. 7).

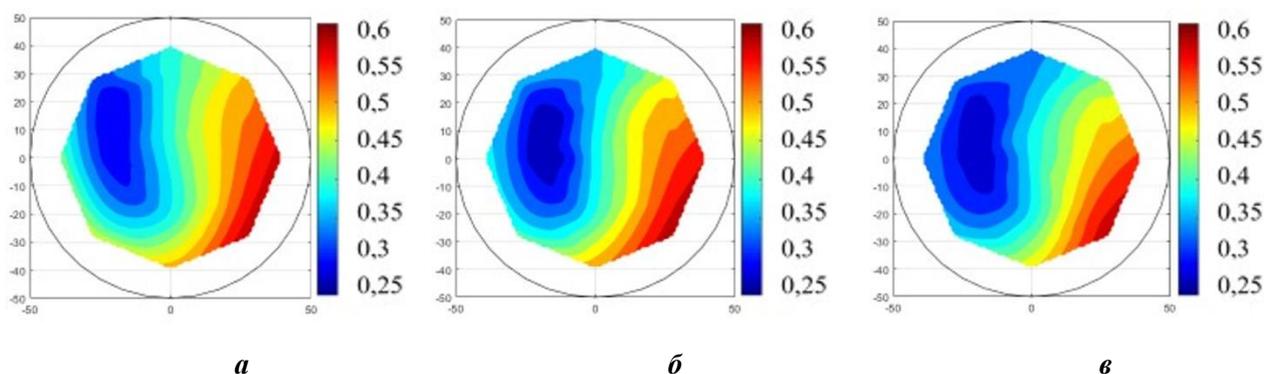


Рис. 7. Распределение безразмерной температуры в выходном сечении модели:
а – режим № 1; б – режим № 2; в – режим № 3

Fig. 7. Distribution of dimensionless temperature in the outlet section of the model:
а – mode № 1; б – mode № 2; в – mode № 3

Анализ картограмм показал, что полного перемешивания в области опорных колонн не происходит ни в одном из трех режимов. Картограммы практически не отличаются ни качественно, ни количественно, что говорит об относительно малом влиянии числа Рейнольдса на исследуемый процесс в рассмотренном диапазоне значений. Значения степени перемешивания составили 66,5, 65,9 и 65,8 % соответственно для трех экспериментальных режимов.

Выводы

По результатам проведенных исследований было получено три результата.

1. Влияние масштаба модели на результаты распределения локальных гидродинамических характеристик потока рабочей среды оказалось пренебрежимо малым (в пределах погрешности измерения и позиционирования пневмометрического зонда).

2. Снижение числа Рейнольдса до 35 % от натурального значения не оказывает существенного влияния на распределения локальных относительных скоростей в моделях, а также не приводит к изменению коэффициента гидравлического сопротивления, что может свидетельствовать об области автомодельного течения для рассмотренной конструкции.

3. При исследовании модели двух опорных колонн влияние числа Рейнольдса из диапазона 30 ÷ 55 % от натурального значения на распределение локальной температуры в области смешения оказывается незначительным, при этом полного перемешивания в области опорных колонн не происходит во всех рассмотренных режимах, а поля относительной температуры остаются подобными.

Оптимальным для исследования процесса неизотермического смешения теплоносителя в модели всего нижнего собирающего коллектора ВТГР выбран масштаб 40 % от натурального. Уменьшение числа Рейнольдса допустимо до значений 30 ÷ 35 % без влияния на распределение локальных значений безразмерных скоростей и температуры, что снижает требования к оборудованию для прокачки рабочей среды через экспериментальную модель и позволяет уменьшить число Маха в аэродинамической модели до 0,15 во всех характерных сечениях, рассматривая воздух как несжимаемую среду.

Библиографический список

1. **Фатеев, С.А.**, Развитие технологий атомно-водородной энергетики в Госкорпорации «Росатом» / С.А. Фатеев, В.В. Петрунин [и др.] // Атомная энергия. – 2022. – Т. 133. № 5-6. – С. 243-250.
2. **Диденко, Д.В.** Расчетное моделирование теплофизических процессов в высокотемпературном газоохлаждаемом реакторе / Д. В. Диденко, Д. Е. Балуюев, И. В. Маров [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. – 2023. – Т. 15. № 4. – С. 895-906.
3. **Добров, А.А.** Обоснование на основе чисел подобия и методов вычислительной гидродинамики аэродинамической модели для исследования перемешивания теплоносителя в нижнем собирающем коллекторе ВТГР / А.А. Добров, С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков [и др.] // Атомная энергия. – 2024. – Т. 137. Вып. 5-6. – С. 247-253.

References

1. Fateev S.A., Petrunin V.V., et al. Razvitie tekhnologiy atomno-vodorodnoy energetiki v Goskorporatsii «Rosatom» [Development of atomic-hydrogen energy technologies at the State Atomic Energy Corporation Rosatom]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. 2022;133(5-6):243-250 (in Russian).
2. Didenko D.V., Baluev D.E., Marov I.V., et al. Raschetnoe modelirovanie teplofizicheskikh protsessov v vysokotemperaturnom gazookhlazhdaemom reaktore [Computational modeling of thermophysical processes in a high-temperature gas-cooled reactor]. Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie [Computer Research and Modeling]. 2023;15(4):895-906 (in Russian).
3. Dobrov A.A., Dmitriev S.M., Doronkov D.V., et al. Obosnovanie na osnove chisel podobiya i metodov vychislitel'noy gidrodinamiki aerodinamicheskoy modeli dlya issledovaniya peremeshivaniya teplonositelya v nizhnem sobirayushchem kollektore VTGR [Justification based on similarity numbers and computational fluid dynamics methods for an aerodynamic model to study coolant mixing in the lower plenum of a HTGR]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. 2024;137(5-6):247-253 (in Russian).

*Дата поступления
в редакцию: 10.09.2025*

*Дата принятия
к публикации: 22.01.2026*

**РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ОСАЖДЕНИЯ ДЕБРИСА
ПРИ ЕГО ТРАНСПОРТИРОВКЕ К ФИЛЬТРАМ САОЗ
ДЛЯ АЭС С РЕАКТОРАМИ ТИПА ВВЭР**

Л.А. Матюшев

ORCID: 0009-0009-0030-9490 e-mail: LAMatyushev@spbaep.ru

АО «Атомэнергопроект»
Санкт-Петербург, Россия

А.А. Игнатьев

ORCID: 0009-0000-9963-7754 e-mail: aaignatev@spbaep.ru

АО «Атомэнергопроект»
Санкт-Петербург, Россия

А.Г. Митрюхин

ORCID: 0009-0001-6904-420X e-mail: AGMitryukhin@spbaep.ru

АО «Атомэнергопроект»
Санкт-Петербург, Россия

А.А. Фиськов

ORCID: 0000-0003-0160-954X e-mail: aafiskov@spbaep.ru

АО «Атомэнергопроект»
Санкт-Петербург, Россия

Е.Л. Шамрай

ORCID: 0009-0008-3382-319X e-mail: elshamray@spbaep.ru

АО «Атомэнергопроект»
Санкт-Петербург, Россия

К.Ю. Коробейников

ORCID: 0009-0009-6518-7666 e-mail: kyukorobeynikov@spbaep.ru

АО «Атомэнергопроект»
Санкт-Петербург, Россия

Н.А. Осмаков

ORCID: 0009-0006-3806-1636 e-mail: naosmakov@spbaep.ru

АО «Атомэнергопроект»
Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена возможность применения CFD-пакета STAR-CCM+ для расчета процессов движения жидкости с твердыми частицами и процесса осаждения последних. Расчеты проводятся применительно к условиям аварии с потерей теплоносителя для реакторной установки с реактором типа ВВЭР. Показано, что на процесс осаждения твердых частиц дебриса на дно бака-приямка хранения запаса раствора борной кислоты при транспортировке от входного устройства к фильтру оказывает существенное влияние вертикальная составляющая амплитуды турбулентных пульсаций. Проведена валидация CFD-пакета STAR-CCM+ по результатам, полученным на экспериментальном стенде, показано, что предложенная последовательность проведения расчетов обеспечивает приемлемую сходимость результатов расчета с экспериментом. Это позволяет провести расчеты для бака-

приямка и определить эффективность осаждения частиц дебриса и, соответственно, долю дебриса, приходящего на фильтр. Прделанная работа показала возможность применения CFD-пакета STAR-CCM+ для задач, связанных с процессами, возникающими в баках-приямках при аварии с потерей теплоносителя.

Ключевые слова: CFD-пакет STAR-CCM+; авария с потерей теплоносителя; ВВЭР; дебрис; бак-приямок; входное устройство; фильтр; САОЗ; активная зона.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Матюшев, Л.А. Расчетный анализ осаждения дебриса при его транспортировке к фильтрам САОЗ для АЭС с реакторами типа ВВЭР / Л.А. Матюшев, А.А. Игнатьев, А.Г. Митрюхин, А.А. Фиськов, Е.Л. Шамрай, К.Ю. Коробейников, Н.А. Осмаков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 52-66. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_52 EDN: XROJEB

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF DEBRIS DEPOSITION DURING ITS TRANSPORTATION TO ECCS FILTERS FOR WWER NUCLEAR POWER PLANTS

L.A. Matyushev

ORCID: **0009-0009-0030-9490** e-mail: **LAMatyushev@spbaep.ru**

JSC «Atomenergoproekt»
Sankt-Petersburg, Russia

A.A. Ignatyev

ORCID: **0009-0000-9963-7754** e-mail: **aaignatev@spbaep.ru**

JSC «Atomenergoproekt»
Sankt-Petersburg, Russia

A.G. Mitryukhin

ORCID: **0009-0001-6904-420X** e-mail: **AGMitryukhin@spbaep.ru**

JSC «Atomenergoproekt»
Sankt-Petersburg, Russia

A.A. Fis'kov

ORCID: **0000-0003-0160-954X** e-mail: **aafiskov@spbaep.ru**

JSC «Atomenergoproekt»
Sankt-Petersburg, Russia

E.L. Shamray

ORCID: **0009-0008-3382-319X** e-mail: **elshamray@spbaep.ru**

JSC «Atomenergoproekt»
Sankt-Petersburg, Russia

K.Yu. Korobeynikov

ORCID: **0009-0009-6518-7666** e-mail: **kyukorobeynikov@spbaep.ru**

JSC «Atomenergoproekt»
Sankt-Petersburg, Russia

N.A. Osmakov

ORCID: **0009-0006-3806-1636** e-mail: **naosmakov@spbaep.ru**

JSC «Atomenergoproekt»
Sankt-Petersburg, Russia

Abstract. The article considers the possibility of using the STAR-CCM+ CFD package for calculating the processes of fluid motion with solid particles and the process of their deposition. The calculations are performed in relation to the conditions of a loss-of-coolant accident for a WWER type reactor plant. It is shown, that the process of deposition of solid debris particles on the bottom of the sump tank for the reserve of boric acid solution storage during transportation from the inlet device to the filter is significantly influenced by the vertical component of the amplitude of turbulent pulsations. The STAR-CCM+ CFD package was validated using the results obtained on the experimental bench. It is

shown that the proposed sequence of calculations provides acceptable convergence of the calculation results with the experiment. This allows to perform calculations for the sump tank and to determine the efficiency of debris particle deposition and, consequently, the proportion of debris that reaches the filter. The performed work demonstrated the possibility of using the STAR-CCM+ CFD package for a wide range of tasks related to the processes occurring during a loss-of-coolant accident.

Key words: STAR-CCM+ CFD package; loss-of-coolant accident; WWER; debris; sump tank; inlet device; filter; ECCS; reactor core.

FOR CITATION: L.A. Matyushev, A.A. Ignatyev, A.G. Mitryukhin, A.A. Fis'kov, E.L. Shamray, K.Yu. Korobeynikov, N.A. Osmakov. Computational analysis of debris deposition during its transportation to ECCS filters for WWER nuclear power plants. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 52-66.
DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_52 EDN: XROJEB

Введение

В процессе аварий, связанных с потерей теплоносителя первого контура, в объеме герметичного ограждения атомных электростанций (ГО АЭС) формируется значительное количество дебриса от разрушения конструкций и сооружений [1, 2]. Образовавшийся дебрис смешивается с теплоносителем, истекающим из разрыва, и раствором борной кислоты, который используется системой аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) для длительного охлаждения реакторной установки. Его составляющие могут привести к ухудшению условий работы оборудования САОЗ и снижению эффективности охлаждения активной зоны ядерного реактора. Попадание частиц дебриса в трущиеся части насосов и арматуры приводит к их эрозионному износу, возможны осаждение в теплообменниках САОЗ, забивание сопел спринклера, а также блокировка расхода теплоносителя через тепловыделяющие сборки и формирование отложений на поверхности ТВЭЛОВ.

Для исключения отрицательного влияния дебриса на работу оборудования САОЗ, спринклерной системы и теплоотвода от активной зоны используется система фильтрации, состоящая из двух основных узлов: входного устройства (ВУ) и устройства защиты приемков (УЗП) забора раствора теплоносителя в САОЗ и спринклерную систему. ВУ и УЗП расположены в баках-приямках таким образом, чтобы между ними было как можно большее расстояние для формирования между ними зоны гравитационного осаждения дебриса. Кроме того, выход из ВУ направлен в сторону, противоположную УЗП, за счет этого образуется зона смешения, в которой происходит гашение кинетической энергии падающей струи и направление струи раствора в баке по оптимальной траектории для увеличения осаждения частиц на дно. Зона смешения характеризуется также как зона торможения и разворота потока в баке-приямке, включающая возникновение стратификации. Таким образом, образуется система фильтрации, состоящая из трех зон: зоны смешения, зоны гравитационного осаждения и зоны фильтрации на УЗП, представляющем собой механический фильтр.

На рис. 1 упрощенно показаны здание реактора (ГО) с реакторной установкой и здание безопасности с оборудованием САОЗ и спринклерной системы. В нижней части ГО расположен бак-приямок запаса раствора борной кислоты. В полу отметки, расположенной над баком-приямком, имеется отверстие, через которое в бак-приямок сливается раствор теплоносителя из разрыва трубопровода первого контура. Отверстие снабжено входным устройством, в противоположной стороне от ВУ расположено отверстие (приямок) для забора очищенного теплоносителя, над которым расположены УЗП. Очищенный раствор теплоносителя подается через теплообменник в САОЗ и спринклерную систему. Оборудование системы фильтрации и его компоновка в баке-приямке описаны более подробно в [3-6]. Как показали исследования [7], в экспериментальном стенде на пути от ВУ до УЗП оседает до 75 % частиц дебриса, что позволяет значительно уменьшить величину фильтрующей поверхности УЗП. Однако реальный бак-приямок отличается намного большими размерами и, следовательно, масштабом турбулентных пульсаций, которые влияют на процесс осаждения частиц дебриса.

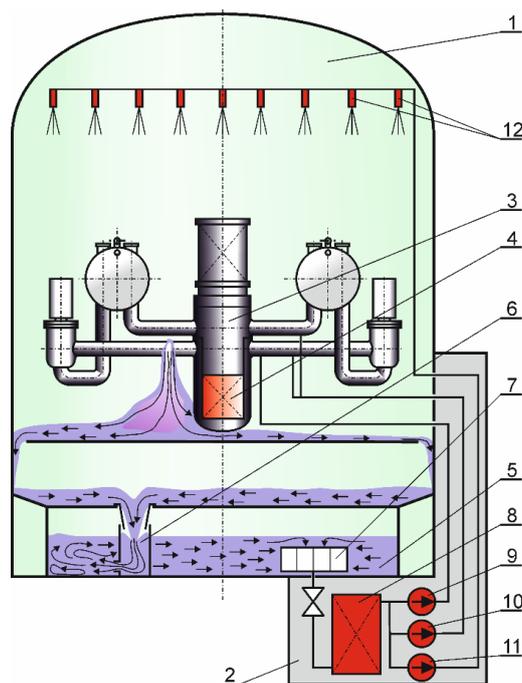


Рис. 1. Авария с потерей теплоносителя:

1 – здание реактора (ГО); 2 – здание безопасности; 3 – реакторная установка (реактор, парогенераторы, главные циркуляционные насосы, трубопроводы главного циркуляционного контура); 4 – активная зона ядерного реактора; 5 – бак-приямок; 6 – входное устройство; 7 – устройство защиты приямков; 8 – теплообменник САОЗ; 9 – насос САОЗ высокого давления; 10 – насос САОЗ низкого давления; 11 – спринклерный насос; 12 – форсунки спринклерной системы (красным обозначены оборудование и устройства, на функционирование которых оказывает влияние дебрис)

Fig. 1. Loss-of-coolant accident:

1 – reactor building (containment building); 2 – safety building; 3 – reactor assembly (reactor, steam generators, main circulation pumps, main circulation circuit pipelines); 4 – nuclear reactor core; 5 – sump tank; 6 – inlet device; 7 – sump protection device; 8 – ECCS heat exchanger; 9 – high-pressure ECCS pump; 10 – low-pressure ECCS pump; 11 – sprinkler pump; 12 – sprinkler system nozzles. (equipment and devices whose functioning is affected by debris are highlighted in red)

Задачами данной работы являются:

- исследования влияния турбулентных пульсаций на процесс осаждения частиц дебриса;
- валидация расчетной модели на основе данных, полученных на экспериментальном стенде;
- расчет осаждения частиц дебриса в реальном баке-приямке.

Исследование влияния турбулентных пульсаций на осаждение частиц

Процесс фильтрации происходит в два последовательных этапа: 1) гравитационное осаждение частиц в зонах смешения и осаждения; 2) фильтрация на фильтрующей поверхности УЗП. Первый этап представляет особый интерес, так как турбулентные пульсации оказывают существенное влияние на процесс осаждения частиц и должны быть учтены при проектировании. Покажем это на модельной задаче осаждения частиц в турбулентном потоке воды, текущей в прямоугольном канале с параметрами, близкими к реальным условиям. На свободную поверхность потока равномерно по поверхности вносится некоторое число частиц (N_0), которые осаждаются под действием силы тяжести и силы сопротивления в турбулентном потоке.

В процессе расчета контролируется число частиц, которые достигли дна в определенный момент времени. Параметры модельной задачи следующие. Размеры канала: глубина 3.5 м, ширина 6.8 м и длина 30 м; расход воды 0.81 м³/с; число Рейнольдса 300 000.

Расчет проводился с помощью CFD-пакета STAR-CCM+. Физика расчета: нестационарное течение несжимаемой вязкой жидкости с привлечением турбулентной LES-модели, позволяющей явно моделировать крупномасштабные турбулентные пульсации. На входной и выходной границах канала ставились периодические граничные условия. Постоянный расход поддерживался за счет постоянного продольного градиента давления как источника в уравнении импульсов. Частицы моделировались в лагранжевом приближении как материальные точки, на которые действовала сила тяжести и сила сопротивления, рассчитываемая на основе корреляции Шиллера-Неймана [8]. Для частиц на дне канала ставились условия прилипания, на периодических границах, соответственно, периодические условия, на остальных границах – условия отскока. Расчетная сетка содержала 12.2 млн ячеек, шаг по времени 0.6 с. В центре канала была расположена точка мониторинга вертикальной (U_y) и продольной (U_z) канала скорости. В начальный момент поток ламинарный. По мере движения воды в канале в потоке нарастают гидродинамические неустойчивости, которые переходят в реальные турбулентные пульсации. На рис. 2 и 3 показаны графики скоростей U_y и U_z в точке мониторинга.

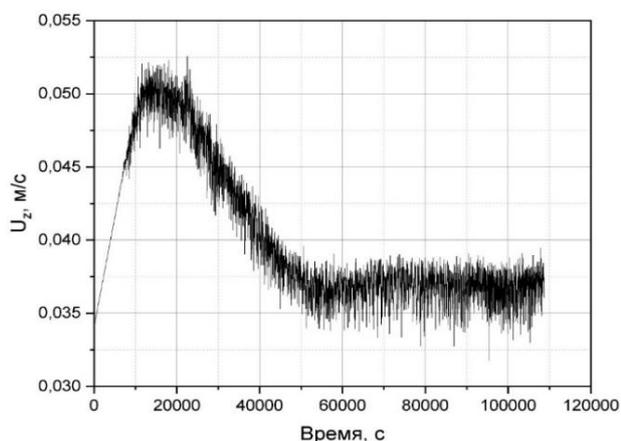


Рис. 2. Продольная скорость в центре канала

Fig. 2. Longitudinal velocity at the center of the channel

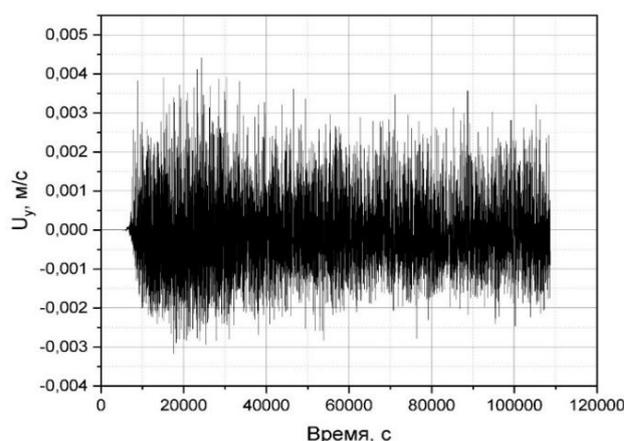


Рис. 3. Вертикальная скорость в центре канала

Fig. 3. Vertical velocity at the center of the channel

После установления турбулентного течения вводились частицы, которые под воздействием силы тяжести постепенно опускались на дно и прилипали к нему. В процессе расчета контролировалось число осевших частиц. На рис. 4 показана доля осевших частиц N/N_0 , где N – число осевших частиц, N_0 – число введенных частиц. Дополнительно показан график осаждения частиц в спокойной воде, который представляет собой ступеньку в момент времени, когда все частицы достигают дна, так как все частицы в спокойной воде двигаются с одинаковой скоростью – скоростью осаждения. Осаждение всех частиц в турбулентном потоке происходит не одновременно (как в спокойной воде), а постепенно (рис. 4). Те частицы, которые большую часть своего пути подвергаются воздействию пульсаций, направленных вниз, осаждаются раньше, и наоборот, частицы, подвергающиеся большую часть своего пути воздействию пульсаций, направленных вверх, осаждаются позже. Это приводит к тому, что график N/N_0 становится гладким и монотонно возрастающим. Данный эффект, очевидно, зависит от диаметра частиц и от величины турбулентных пульсаций. Для нашей модельной задачи частицы с диаметром больше 0.108 мм практически не испытывают заметного влияния турбулентных пульсаций величиной 0.002 м/с (рис. 3). Заметим, что при другой геометрии установки турбулентные пульсации могут иметь заметно большую величину.

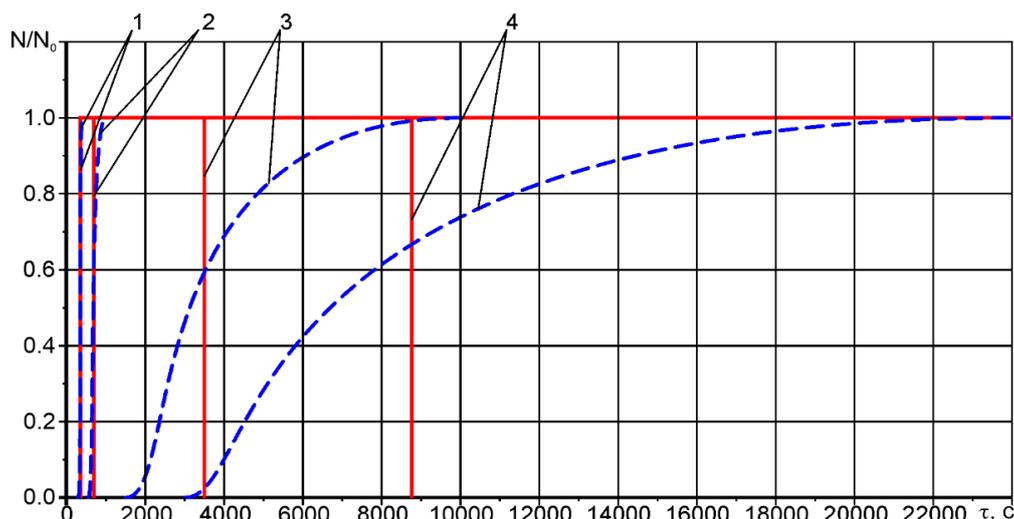


Рис. 4. Доля осевших частиц в условно спокойной воде (красная сплошная линия) и в турбулентном потоке (синяя пунктирная линия) в зависимости от времени:

- 1 – диаметр частицы $d=0.108$ мм, скорость осаждения 10 мм/с;
- 2 – диаметр частицы $d=0.073$ мм, скорость осаждения 5.0 мм/с;
- 3 – диаметр частицы $d=0.031$ мм, скорость осаждения 1.0 мм/с;
- 4 – диаметр частицы $d=0.02$ мм, скорость осаждения 0.4 мм/с

Fig. 4. The proportion of settled particles in relatively calm water (red solid line) and in a turbulent flow (blue dotted line) depending on time:

- 1 – particle diameter $d = 0.108$ mm, deposition rate 10 mm/s;
- 2 – particle diameter $d = 0.073$ mm, deposition rate 5.0 mm/s;
- 3 – particle diameter $d = 0.031$ mm, deposition rate 1.0 mm/s;
- 4 – particle diameter $d = 0.02$ mm, deposition rate 0.4 mm/s

Выводы по разделу. При движении частиц в канале с параметрами, идентичными каналу в баке-приямке, турбулентные пульсации оказывают существенное влияние на время осаждения. При этом степень влияния зависит от скорости осаждения частиц в условно спокойной воде. Крупные частицы практически не реагируют на турбулентные пульсации.

Валидация расчетной модели на основе эксперимента

Валидация описанной выше расчетной модели осаждения частиц в турбулентном потоке жидкости выполнялась на основе ранее полученных результатов испытаний фильтра САОЗ на экспериментальном стенде. Технологическая схема экспериментального стенда для испытаний системы фильтрации САОЗ, методика проведения испытаний и состав вводимого дебриса подробно освещены в [7]. Температура раствора при испытаниях равнялась 33 °С, расход раствора через стенд – 9,7 м³/ч, масса вводимых компонентов дебриса и его общее количество приведены в табл. 1 (столбец 8). Масса дебриса, достигшая фильтрующей поверхности в эксперименте, составила 2060 г.

Фракционный состав частиц вводимого в стенд дебриса для волокон был выполнен с использованием седиментационного метода, для сферических частиц в основном были использованы паспортные данные на поставку. Состав и свойства дебриса для экспериментальной установки приведены в табл. 1 (столбцы 1-6).

Как видно из табл. 1, дебрис состоит из разнородных частиц отличающиеся по форме и плотности. Для однозначной оценки осаждения частиц при расчете, все частицы были приведены к эквивалентным частицам сферической формы с плотностью 2650 кг/м³, со скоростью осаждения равной скорости осаждения реальной частицы. Для частиц реальной плотности 2650 кг/м³ – диаметр эквивалентной частицы равен диаметру реальной частицы. Определение эквивалентного диаметра частицы с фактической плотностью, отличной от 2650 кг/м³, производится в следующей последовательности.

Таблица 1.
Состав и свойства дегриза для экспериментальной установки, результаты расчетов

Table 1.
Composition and properties of debris for the experimental bench, calculation results

Компонент дегриза	Форма	Плотность материала кг/м ³	Доля фракции	Диаметр частицы, мм	Скорость осаждения при 20 °С (измеренная), мм/с	Диаметр эквивалентной частицы, мм	Масса вводимых компонентов дегриза, кг	Масса фракции, кг (столб. 4 x столб. 8)	Доля массы фракции достигнутой фильтрующей поверхностью (рис. 8)	Масса фракции достигнутой фильтрующей поверхностью, кг (столб. 9 x столб. 10)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Глина	Сферическая	2650	0.8	0.005	-	0.005	0.073	0.0584	0.86	0.050
			0.2	0.025	-	0.025		0.0146	0.47	0.007
Песок	Сферическая	2650	0.2	0.025	-	0.025	0.111	0.0222	0.47	0.010
			0.7	0.1	-	0.1		0.0777	0.755	0.059
			0.1	0.3	-	0.3		0.0111	0	0.000
Порошок цинка	Сферическая	7140	0.5	0.03	-	0.058	3.722	1.861	0.025	0.047
			0.4	0.1	-	0.2		1.4888	0	0.000
			0.1	0.2	-	0.45		0.3722	0	0.000
Порошковая краска	Сферическая	1750	0.1	0.005	-	0.0037	2.036	0.2036	0.21	0.043
			0.45	0.032	-	0.022		0.9162	0.48	0.440
			0.45	0.07	-	0.047		0.9162	0.08	0.073
Гидроксид алюминия	Сферическая	2400	1	0.016	-	0.019	0.307	0.307	0.445	0.137
Волокно	Вытянутая в одном измерении	2650	0.10	-	0.14	0.013	4.742	0.4742	0.69	0.327
			0.14	-	0.28	0.018		0.66388	0.565	0.375
			0.06	-	0.56	0.025		0.28452	0.41	0.117
			0.40	-	1.00	0.034		1.8968	0.25	0.474
			0.30	-	20.00	0.175		1.4226	0	0.000
Всего масса дегриза							10.991	10.991		2.158

Задаются:

- фактическая плотность ρ_{ϕ} , кг/м³;
- фактический диаметр d_{ϕ} , м.

2. Рассчитывается фактическая скорость осаждения частицы V_{ϕ} по известному диаметру частицы d_{ϕ} и фактической плотности ρ_{ϕ} , кг/м³. Расчеты проводятся на основе корреляции Шиллера-Неймана для коэффициента сопротивления [8], используемой в Star-CCM+:

$$V_{\phi} = \sqrt{\frac{4 \cdot d_{\phi} \cdot g \cdot (\rho_{\phi} - \rho_w)}{3 \cdot C_d \cdot \rho_w}};$$

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re} (1 + 0,15 \cdot Re^{0,687}), & Re \leq 1000; \\ 0,4383, & Re > 1000; \end{cases}$$

$$Re = \frac{\rho_w \cdot d_{\phi} \cdot V_{\phi}}{\mu_w},$$

где: $\rho_w = 998.3$ кг/м³ – плотность жидкости (в данном случае – воды);
 $\mu_w = 0.001003$ Па·с – динамическая вязкость воды.

Рассчитывается диаметр эквивалентной частицы d_3 по известной фактической скорости осаждения частицы V_{ϕ} и эквивалентной плотности $\rho_3 = 2650 \text{ кг/м}^3$.

$$d_3 = \frac{V_{\phi}^2 \cdot 3 \cdot C_d \cdot \rho_w}{4 \cdot g \cdot (\rho_3 - \rho_w)}$$

Расчет диаметра эквивалентной сферической частицы для фактической волокнистой проводится аналогично. Результаты расчета диаметров эквивалентных частиц приведены в табл. 1 (столбец 7).

Для расчетов на Star-CCM+ была использована трехмерная модель экспериментального стенда (рис. 5). Стенд имеет размеры в плане 5000x1000 мм, уровень раствора теплоносителя от дна бака 1700 мм, в качестве механического фильтра использован фрагмент фильтрующего модуля из 11 фильтрующих элементов идентичных применяемым в натуре. В расчетной области была построена сетка, содержащая 9.5 млн ячеек.

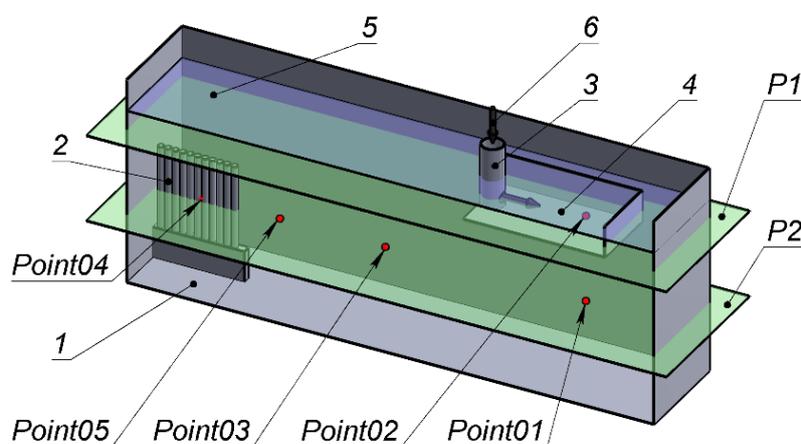


Рис. 5. Модель экспериментального стенда (передние стенки бака и лотка условно не показаны):

1 – дно бака; 2 – фильтрующие элементы; 3 – входное устройство; 4 – лоток;
5 – свободная поверхность раствора теплоносителя; 6 – ввод раствора теплоносителя с дебрисом;
Point01 – Point05 – точки мониторинга пульсации вертикальной составляющей скорости потока в стенде; P1, P2 – сечения, в которых рассматривались поля скоростей в расчете

Fig. 5. Model of the experimental bench (the front walls of the tank and tray are not shown):

1 – tank bottom; 2 – filter elements; 3 – inlet device; 4 – tray;
5 – free surface of the coolant solution;
6 – input of the coolant solution with debris; P01 – P05 – points for pulsation monitoring of the vertical component of the flow velocity in the bench;
P1, P2 – sections in which the velocity fields were considered in the calculation

На первом этапе был проведен расчет течения воды в установке без частиц с привлечением турбулентной LES-модели до квазистационарного состояния. На свободной поверхности ставились условия стенки без прилипания, а на границе втекания (вход ВУ) задавалось давление. В расчете контролировались пульсации вертикальной составляющей скорости потока воды в стенде в пяти точках мониторинга Point01 – Point05 (рис. 5). Графики расчетных пульсации вертикальной составляющей скорости потока воды в стенде в точках мониторинга приведены на рис. 6.

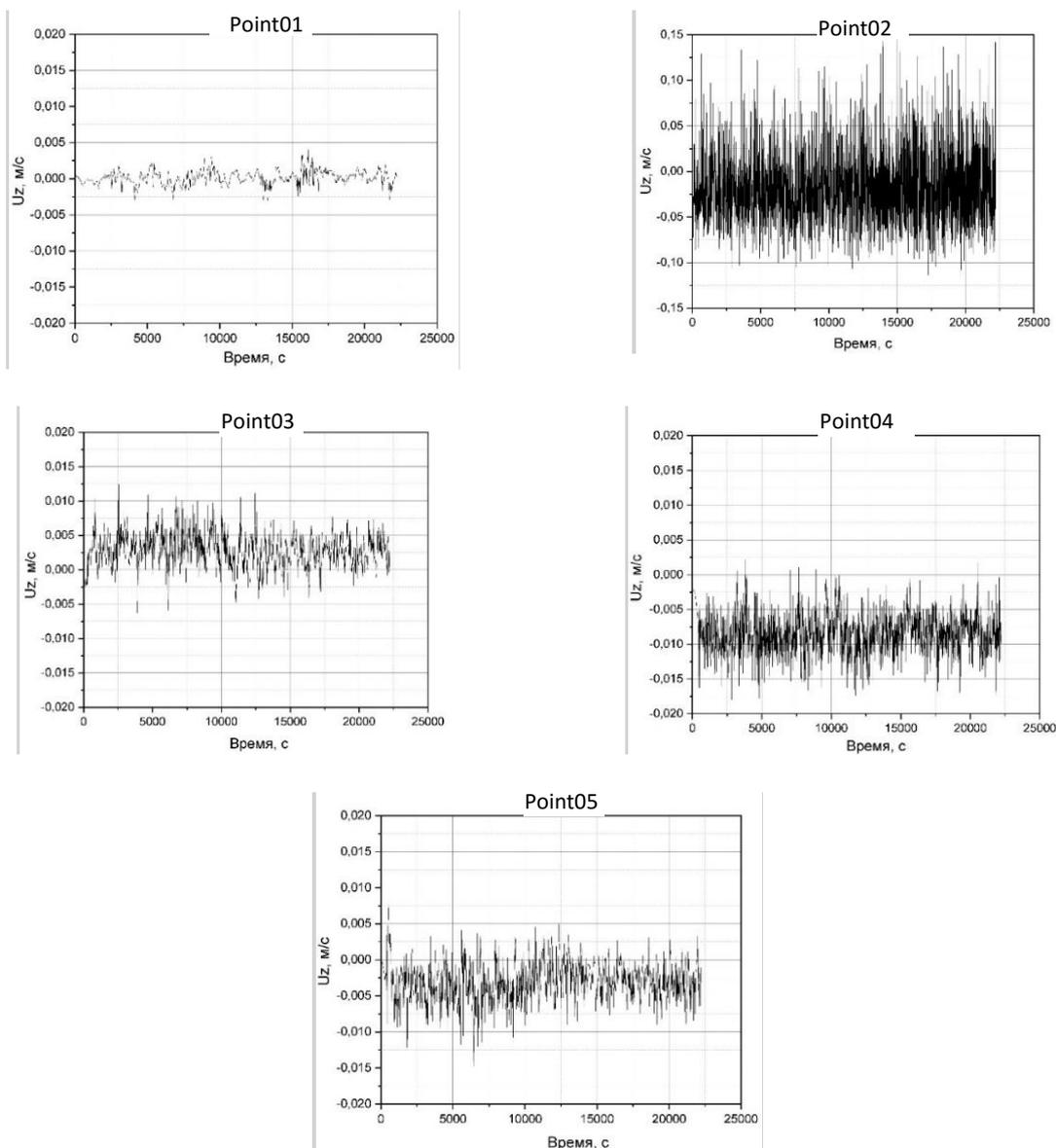


Рис. 6. График пульсации вертикальной составляющей скорости потока в стенде в точках мониторинга

Fig. 6. Graph of the pulsation of the vertical component of the flow velocity in the bench at monitoring points

На рис. 7 представлены поля скорости в двух горизонтальных сечениях P1 и P2 (рис. 5). Сечение P1 соответствует середине выходного окна ВУ, сечение P2 примерно соответствует середине фильтрующего элемента. Видно, что максимальная скорость в сечении P1 (порядка 0.5 м/с) имеет место на выходе из ВУ, в лотке происходит интенсивное перемешивание среды, далее по длине экспериментального стенда скорость менее 0,1 м/с. В сечении P2 максимальные скорости возникают у торцевой стенки бака, в районе фрагмента фильтрующего модуля, где поток разворачивается к нему. Скорости в сечении P2 в целом невысоки, максимальное значение порядка 0.02 м/с.

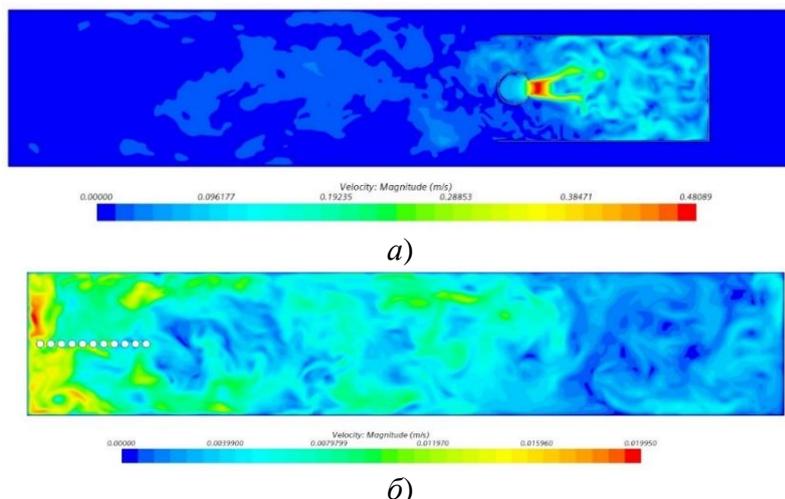


Рис. 7. Поля скорости в двух горизонтальных сечениях стенда:

a) поле скоростей течения воды в сечении P1;

б) поле скоростей течения воды в сечении P2

Fig. 7. Velocity fields in two horizontal sections of the bench:

a) water flow velocity field in section P1; b) water flow velocity field in section P2

На втором этапе выполнялись расчеты с введением частиц во входное устройство. В пределах одного расчета рассматривались частицы с равной скоростью осаждения. Расчеты повторялись для каждой фракции компонентов дебриса. Количество одновременно вводимых частиц составляло $N_0=2286$ штук. На всех стенках и свободной поверхности, кроме дна резервуара и лотка, ставятся условия отскока для частиц. На дне резервуара и дне лотка ставятся условия прилипания частиц. В процессе расчета подсчитывалось число частиц, попадающих на дно бака и дно лотка (N) и фильтра (N_0-N), до момента, когда взвешенных частиц в потоке более не оставалось. После этого подсчитывалась доля всех частиц, достигших фильтрующих поверхностей, для каждой фракции компонентов дебриса. Результаты расчета приведены на рис. 8.

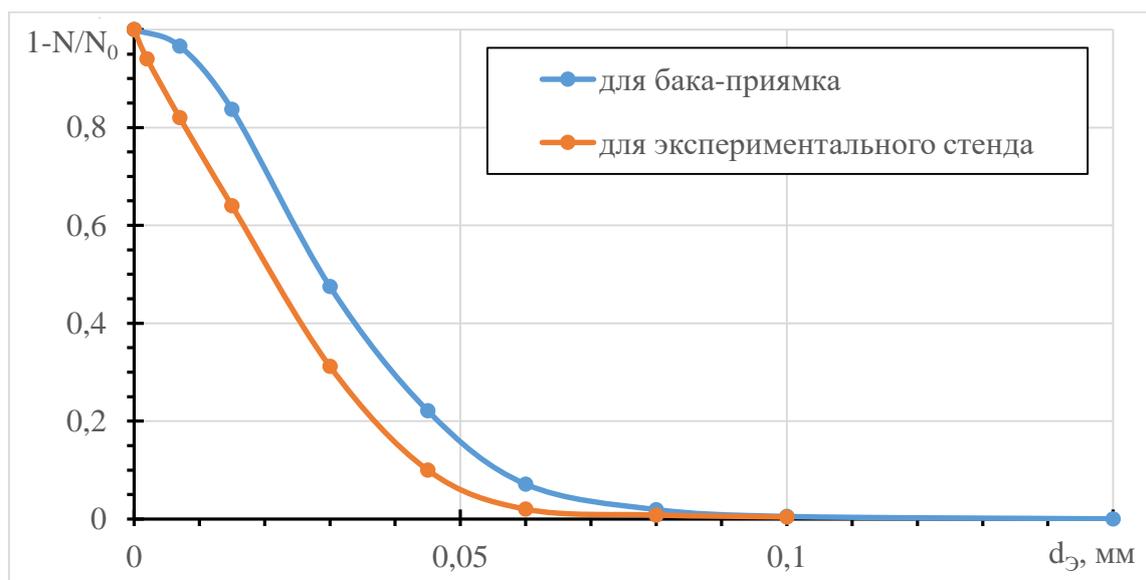


Рис. 8. Результаты расчета доли частиц, достигших фильтрующих поверхностей, для каждой фракции компонентов дебриса

Fig. 8. Results of calculating the proportion of particles that reached the filter surfaces for each fraction of debris components

Используя исходные данные по составу дебриса и расчетные данные по доле частиц, достигших фильтрующих поверхностей, можно определить массу дебриса, достигающего фильтрующей поверхности пофракционно и в сумме. Полученные данные приведены в табл. 1 (столбцы 9, 10 и 11). При введении 10.991 кг дебриса в экспериментальный стенд, фильтрующей поверхности достигло 2.158 кг. В реальном эксперименте при введении в стенд того же количества дебриса фильтрующей поверхности достигло 2.060 кг. Доля дебриса, достигающего фильтрующей поверхности, для расчета составила 19,6 %, для эксперимента – 18,7 %. Погрешность расчета составила, таким образом, $|2.060-2.158|/2.060 \cdot 100 = 5 \%$

Выводы по разделу. Валидация Star-CCM+ для анализа осаждения частиц в потоке жидкости показала, что данный метод можно использовать для расчетов транспортировки частиц к фильтрующей поверхности. Погрешность расчета составляет около 5 %, что вполне достаточно при конструировании фильтра и определении величины его фильтрующей поверхности.

Расчет осаждения дебриса в реальном баке-приямке

Учитывая идентичность и симметричность конструкции бака-приямка, будем анализировать процессы только для полубака, расположенного в углах $180^\circ \dots 270^\circ \dots 360^\circ$. Бак-приямок имеет внутренний радиус 11800 мм, наружный – 18350 мм, более подробно размеры бака-приямка, компоновка оборудования системы фильтрации в нем, размеры оборудования приведены в [3]. Уровень раствора теплоносителя в баке составляет 3.5 м. В соответствии с результатами расчетов параметров защитной оболочки в условиях аварии с потерей теплоносителя температура воды в баке-приямке 85°C . Расход раствора теплоносителя через бак-приямок равен $0.81 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для проведения расчетов была разработана 3D-модель бака-приямка, представленная на рис. 9 в масштабе 1:1. Для расчета, как и в случае экспериментального стенда, используется LES-модель, способная разрешать на сетке крупномасштабные нестационарные турбулентные пульсации скорости. Сетка содержала 15 млн ячеек, шаг по времени 0.25 с. LES-модель позволяет учитывать влияние поля турбулентных пульсаций на движение частиц. Частицы моделируются как лагранжевы, на которые действуют силы сопротивления, силы плавучести и силы тяжести. Запуская на вход N_0 частиц, можно затем определить число попавших на фильтр. На дне и боковых стенках ставились условия с прилипанием. На свободной поверхности ставились условия стенки без прилипания, а на границе вытекания (поверхность фильтров) ставились условия заданного расхода (минус $0.81 \text{ м}^3/\text{с}$).

На первом этапе был проведен расчет течения воды в установке без частиц с привлечением турбулентной LES-модели до квазистационарного состояния. Квазистационарное состояние оценивалось по полю вертикальной составляющей скорости в точках мониторинга (рис. 10). Вертикальная составляющая скорости определена по показаниям в точках мониторинга Point 01 – Point 06, расположение которых показано на рис. 9. Вертикальные пульсации скорости имеют величину до 0.3 м/с (что вдвое больше, чем в экспериментальном стенде) и, следовательно, могут оказывать значительное влияние на движение частиц.

Расчетные поля скорости в горизонтальном (на уровне 0.95 м от пола бака, посередине выходного окна ВУ) и вертикальном сечении по оси бака-приямка (рис. 9) приведены на рис. 10. При сравнении рис. 7 и 10 видно, что поля скорости в экспериментальном стенде и в баке-приямке подобны, максимальные скорости наблюдаются в районе выхода из ВУ и далее в зоне смешения, на участке зоны осаждения скорости значительно ниже, что свидетельствует о создании благоприятных условий для осаждения частиц на этом участке. Турбулентные пульсации (вертикальная составляющая скорости) также в зоне осаждения и для экспериментального стенда и бака-приямка меньше, чем в зоне смешения (рис. 6 и 11).

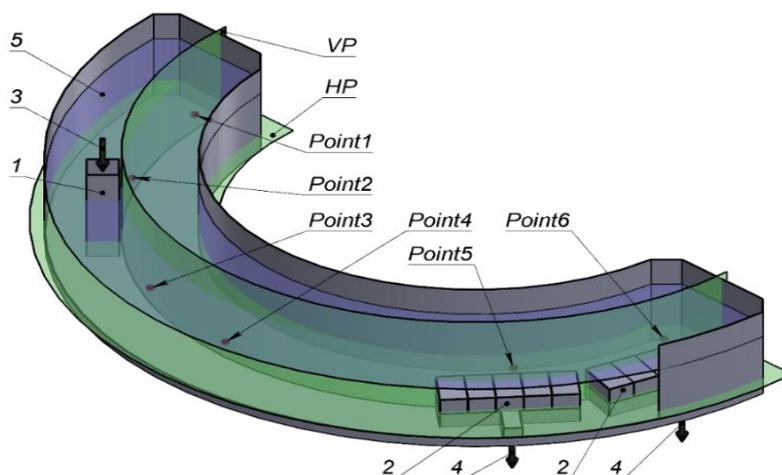


Рис. 9. Модель бака-приямка (железобетонные конструкции условно не показаны, только облицовка, в передней стенке сделан вырез):

1 – входное устройство; 2 – устройство защиты приямков; 3 – вход раствора теплоносителя с дебрисом; 4 – выход раствора теплоносителя из бака-приямка; Point1-Point6 – точки мониторинга пульсации вертикальной составляющей скорости потока в баке-приямке; VP, HP – сечения, в которых рассматривались поля скоростей в расчете

Fig. 9. Model of the sump tank (reinforced concrete structures are not shown, only the lining, a cutout is made in the front wall):

1 – inlet device; 2 – sump protection device; 3 – inlet of the coolant solution with debris; 4 – outlet of the coolant solution from the sump tank; Point1 – Point6 – points for pulsation monitoring of the vertical component of the flow velocity in the sump tank; VP, HP – sections in which the velocity fields were considered in the calculation

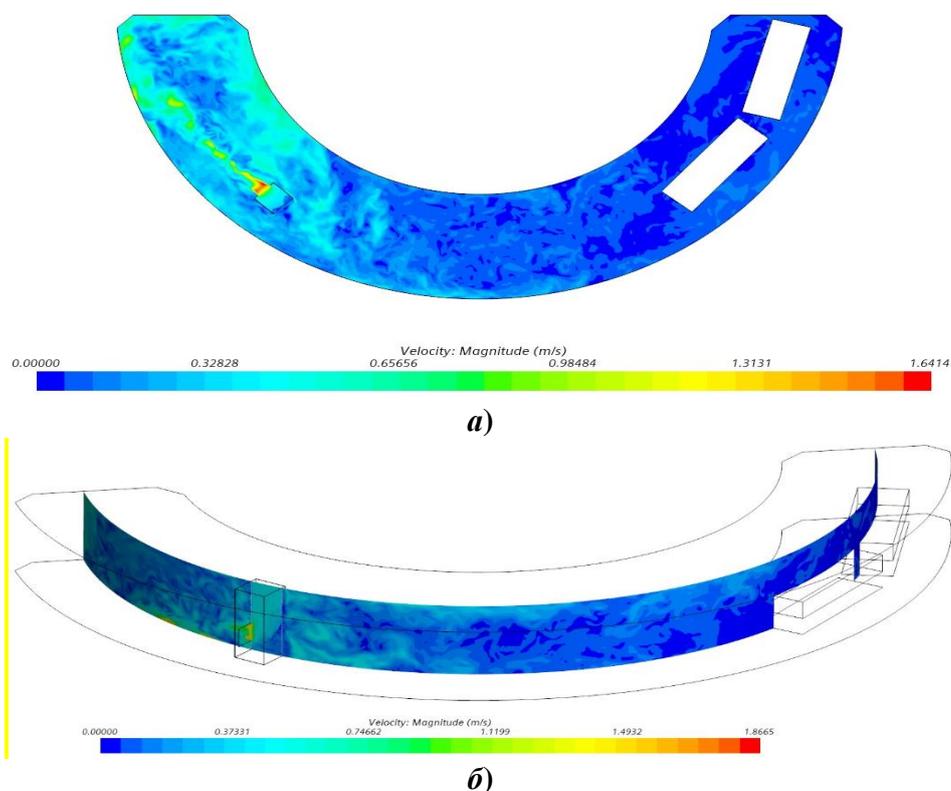


Рис. 10. Поле скоростей:

а) в горизонтальном сечении бака-приямка; б) в вертикальном сечении бака-приямка

Fig. 10. Velocity field:

a) in the horizontal section of the sump tank; b) in the vertical section of the sump tank

На втором этапе расчета на вход бака-приямка через входное устройство подавалось одновременно $N_0=2286$ частиц. На всех стенках и свободной поверхности, кроме дна бака-приямка, ставятся условия отскока для частиц. На дне бака-приямка ставятся условия прилипания частиц. В процессе расчета подсчитывалось число частиц, попадающих на фильтр, дно бака-приямка до момента, когда взвешенных частиц в потоке более не оставалось. После этого подсчитывалась доля всех частиц, достигших фильтрующих поверхностей, для каждой фракции компонентов дебриса. Результаты расчета доли частиц, достигающих фильтрующих поверхностей в баке-приямке, приведены на рис. 8. Сравнивая кривые для экспериментального стенда и для бака-приямка, можно видеть, что кривая для бака-приямка находится правее кривой для стенда. Это связано с большими линейными размерами бака-приямка и, соответственно, с большей амплитудой турбулентных пульсаций.

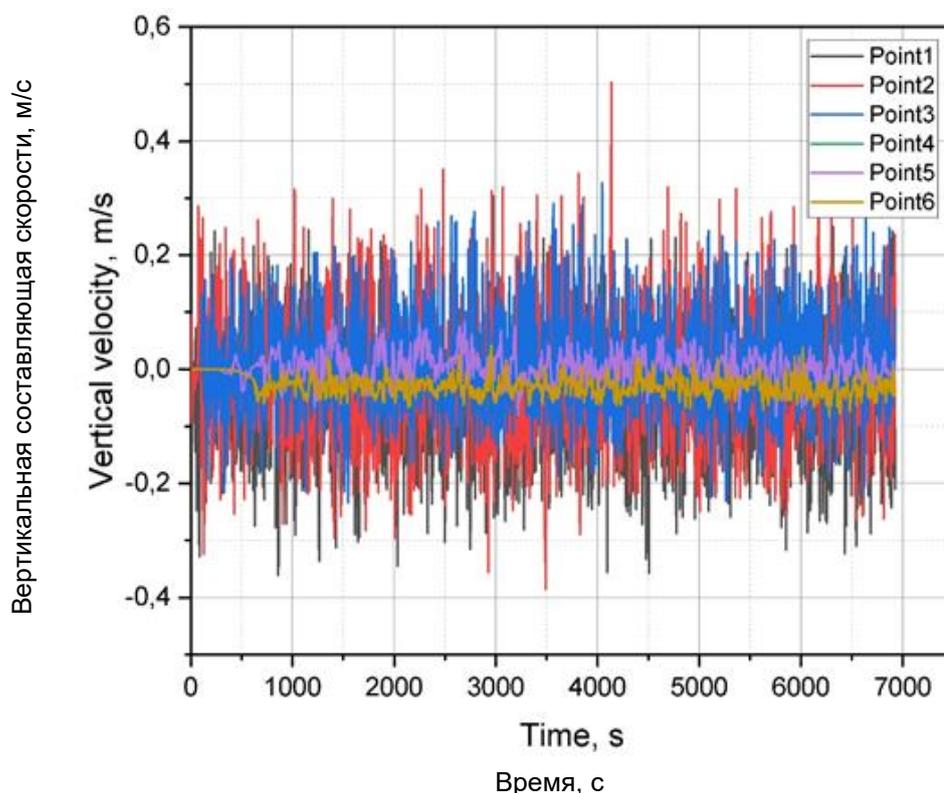


Рис. 11. Зависимость вертикальной составляющей скорости от времени в точках мониторинга

Fig. 11. Dependence of the vertical component of velocity on time at monitoring points

Используя данные по реальному образованию дебриса в защитной оболочке при аварии с потерей теплоносителя при фракционном составе отдельных составляющих в соответствии с табл. 1 (столбец 4) и результаты расчета доли частиц, достигающих фильтрующих поверхностей в баке-приямке, можно определить массу дебриса, достигающего фильтрующих поверхностей в баке-приямке. Результаты расчета показали, что при массе дебриса, формируемого в защитной оболочке под воздействием высокоэнергетической струи из разрыва, равной 2042 кг, фильтрующих поверхностей УЗП достигает 603.2 кг дебриса, т.е. 29,5 %.

Выводы по разделу. Расчеты кодом Star-ССМ+ процессов осаждения частиц дебриса в баке-приямке, валидированные по экспериментальным данным показали, что доля осевшего и, вследствие этого, не достигшая фильтрующих поверхностей УЗП, дебриса составляет около 70 % от количества дебриса, поступившего в бак-приямок при аварии с потерей теплоносителя.

Выводы

Код Star-ССМ+ может применяться в расчетах транспортировки частиц к фильтрующей поверхности. Погрешность расчета составляет около 5 %, что достаточно для анализа поведения частиц дебриса в баке-приямке. При их движении в канале с параметрами, идентичными каналу в баке-приямке, влияние турбулентных пульсаций оказывает существенное влияние на время осаждения. Степень влияния зависит от скорости осаждения частиц в условно спокойной воде. Крупные частицы практически не реагируют на турбулентные пульсации. Расчеты показали, что компоновка бака-приямка ЛАЭС (энергоблок 3 и 4) позволяет сократить количество дебриса, достигающего УЗП, на 70 % от образующегося при аварии с потерей теплоносителя в сравнении с энергоблоками 1 и 2 ЛАЭС-2.

В настоящей работе код Star-ССМ+ успешно использован для расчета осаждения частиц дебриса в баке-приямке защитной оболочки. Валидированный по экспериментальным данным, он может быть применен для решения ряда других задач: определения влияния скорости (расхода) раствора теплоносителя на осаждение частиц дебриса, т.е. на эффективность улавливания дебриса в зоне гравитационного осаждения; влияния температуры раствора теплоносителя на тот же процесс; влияния состава (волокно/частицы) дебриса и др.

С помощью кода Star-ССМ+ возможно решение важной задачи корректировки исходных данных (количества и состава дебриса) при подготовке экспериментального обоснования фильтров баков-приямков, требуемого при проведении прямо-сдаточных работ.

Библиографический список

1. **Магола, И.А.** Источники и виды дебриса, образующегося при аварии с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР / И.А. Магола, В.О. Кухтевич, Н.А. Осмаков [и др.] // Атомная энергия. – 2022. – Т. 133, вып. 3. – С. 156-164.
2. **Магола, И.А.** Влияние выбора типа и конструкции теплоизоляции на количество дебриса, формирующегося в ходе аварии с потечей теплоносителя на АЭС с ВВЭР / И.А. Магола, Л.А. Матюшев, Е.Л. Шамрай [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2023. – № 2 (32). – С. 74-84.
3. **Магола, И.А.** Моделирование системы фильтрации раствора теплоносителя для реакторной установки с ВВЭР-1200 / И.А. Магола, Л.А. Матюшев, Е.Л. Шамрай [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2025. – Вып. 2(128). – С. 144-154.
4. **Матюшев, Л.А.** Проектирование фильтров, устанавливаемых перед системой аварийного охлаждения активной зоны ядерного реактора / Л.А. Матюшев, Е.Л. Шамрай [и др.] // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2022. – № 3 (29). – С. 74-84.
5. **Пат. 2686684 С1 Российская Федерация.** Устройство защиты приямков в аварийной системе охлаждения водо-водяного ядерного реактора, фильтрующий модуль устройства защиты приямков / В.В. Безлепкин, А.И. Курчевский, В.О. Кухтевич, Л.А. Матюшев, А.Г. Митрюхин; патентообладатель АО «Атомэнергопроект». – Оpubл. 30.04.2019, Бюл. № 13. – 16 с.
6. **Пат. 2778712 С1 Российская Федерация.** Бак для фильтрации и сбора мусора / Л. А. Матюшев, А.Г. Митрюхин, Е.Л. Шамрай, К.Ю. Коробейников ; патентообладатель АО «Атомэнергопроект». – опубл. 23.08.2022, Бюл. № 24. – [б. с.].
7. **Магола, И.А.** Экспериментальное обоснование фильтров баков-приямков проекта АЭС-2006 / И.А. Магола, Л.А. Матюшев // Атомная энергия. – 2022. – Т. 133, вып. 3. – С. 164-170.
8. **Kelbaliyev, G. I.** Drag coefficients of variously shaped solid particles, drops and bubbles / G.I. Kelbaliyev // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2011. – Т. 45, № 3. – С. 248-266.

References

1. Magola I.A., Kukhtevich V.O., Osmakov N.A., et al. Istochniki i vidy debrisa, obrazuyushchegosya pri avarii s poterey teplonositelya na AES s VVER [Sources and Types of Debris Generated During a Loss-of-Coolant Accident at a Nuclear Power Plant with VVER]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. 2022;133(3):156-164 (in Russian).

2. Magola I.A., Matyushev L.A., Shamray E.L., et al. Vliyanie vybora tipa i konstruktsii teploizolyatsii na kolichestvo debrisa, formiruyushchegosya v khode avarii s potechey teplonosatelya na AES s VVER [Influence of the choice of insulation type and design on the amount of debris generated during a loss-of-coolant accident at a NPP with VVER]. Tekhnologii obespecheniya zhiznennogo tsikla yadernykh energeticheskikh ustanovok [Technologies for ensuring the life cycle of nuclear power plants]. 2023;(2(32)):74-84 (in Russian).
3. Magola I.A., Matyushev L.A., Shamray E.L., et al. Modelirovanie sistemy fil'tratsii rastvora teplonosatelya dlya reaktornoy ustanovki s VVER-1200 [Modeling of the coolant solution filtration system for a reactor plant with VVER-1200]. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Materialovedenie i novye materialy [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Materials Science and New Materials]. 2025;(2(128)):144-154 (in Russian).
4. Matyushev L.A., Shamray E.L., Mitryukhin A.G., et al. Proektirovanie fil'trov, ustanavlivaemykh pered sistemoy avariynogo okhlazhdeniya aktivnoy zony yadernogo reaktora [Design of filters installed before the emergency core cooling system of a nuclear reactor]. Tekhnologii obespecheniya zhiznennogo tsikla yadernykh energeticheskikh ustanovok [Technologies for ensuring the life cycle of nuclear power plants]. 2022;(3(29)):74-84 (in Russian).
5. Bezlepkin V.V., Kurchevsky A.I., Kukhtevich V.O., Matyushev L.A., Mitryukhin A.G. Ustroystvo zashchity priyamkov v avariynoy sisteme okhlazhdeniya vodo-vodyanogo yadernogo reaktora, fil'truyushchiy modul' ustroystva zashchity priyamkov [Protection device for sumps in the emergency cooling system of a water-cooled water-moderated nuclear reactor, filtering module of the sump protection device]. Russian Federation Patent RU 2686684 C1. 2019 Apr 30. 16 p. (In Russian).
6. Matyushev L.A., Mitryukhin A.G., Shamray E.L., Korobeynikov K.Yu. Bak dlya fil'tratsii i sbora musora [Tank for filtration and debris collection]. Russian Federation Patent RU 2778712 C1. 2022 Aug 23. (In Russian).
7. Magola I.A., Matyushev L.A., Shamray E.L., et al. Eksperimental'noe obosnovanie fil'trov bakov-priyamkov proekta AES-2006 [Experimental validation of sump tank filters for the AES-2006 project]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. 2022;133(3):164-170 (in Russian).
8. Kelbaliyev G.I. Drag coefficients of variously shaped solid particles, drops and bubbles. Theor Found Chem Eng. 2011;45(3):248-266.

**Дата поступления
в редакцию: 30.09.2025**

**Дата принятия
к публикации: 03.02.2026**

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.3.017:629.3.018+629.3.027.3

DOI 10.46960/1816-210X_2026_1_67

EDN FRAEDB

СБОР ДАННЫХ О ДОРОЖНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОТОТИПА ОТЕЧЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ ДЛЯ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ УСКОРЕННЫХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ В ЗАДАННОМ ЭКВИВАLENTE ПОВРЕЖДЕННОСТИ

В.А. Дианов

ORCID: 0009-0003-2460-0617 e-mail: vadianov@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*Москва, Россия***А.И. Бокарев**

ORCID: 0000-0003-3617-2747 e-mail: bokarev@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*Москва, Россия***И.В. Нескин**

ORCID: 0009-0006-9839-4854 e-mail: neskin@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*Москва, Россия***Ф.К. Дьяков**

ORCID: 0009-0003-3041-9363 e-mail: f.dyakov@madi.ru

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

*Москва, Россия***Е.П. Мазур**

ORCID: 0009-0005-0436-7744 e-mail: egor.mazur@atom.team

АО «КАМА»

Москва, Россия

Представлен метод сбора и валидации экспериментальных данных о нагрузках, действующих на прототип отечественного электромобиля при его повседневной эксплуатации по дорогам общего пользования и в условиях форсированных испытаний на автополигоне. Описан процесс подготовки объекта исследований, включающий его инструментирование комплексом измерительного оборудования с соблюдением единой системы координат. Рассмотрена процедура одобрения записанных данных с использованием оригинального алгоритма, реализованного в виде скрипта, который выполняет автоматическую синхронизацию сигналов, визуализацию и проверку корректности данных по ряду заданных критериев. Разработанный программный инструмент позволил минимизировать время обработки результатов и снизить риск допущения ошибок при анализе. Полученные массивы данных о нагруженности несущей системы и подвески предназначены для последующего формирования циклов ускоренных ресурсных испытаний на полигоне с заданным эквивалентом поврежденности.

Ключевые слова: автомобиль; ресурсные испытания; дороги общего пользования; испытательный полигон; правила движения.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дианов, В.А. Сбор данных о дорожной эксплуатации прототипа отечественного электромобиля для возможности проведения ускоренных ресурсных испытаний в заданном эквиваленте поврежденности / В.А. Дианов, А.И. Бокарев, И.В. Нескин, Ф.К. Дьяков, Е.П. Мазур // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 67-84. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_67 EDN: FRAEDB

COLLECTING ROAD OPERATION DATA OF DOMESTIC ELECTRIC VEHICLE PROTOTYPE FOR POSSIBILITY OF CONDUCTING ACCELERATED RESOURCE TESTS WITH GIVEN DAMAGE EQUIVALENT

V.A. Dianov

ORCID: **0009-0003-2460-0617** e-mail: **vadianov@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

A.I. Bokarev

ORCID: **0000-0003-3617-2747** e-mail: **bokarev@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

I.V. Neskin

ORCID: **0009-0006-9839-4854** e-mail: **neskin@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

F.K. Dyakov

ORCID: **0009-0003-3041-9363** e-mail: **f.dyakov@madi.ru**

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

Moscow, Russia

E.P. Mazur

ORCID: **0009-0005-0436-7744** e-mail: **egor.mazur@atom.team**

JSC «KAMA»

Moscow, Russia

Abstract. This article presents a method for collecting and validating experimental data on loads acting on a prototype domestic electric vehicle during its daily operation on public roads and under accelerated test conditions on a proving ground. The process of preparing the test object is described, including its instrumentation with a set of measurement equipment while adhering to a unified coordinate system. A procedure for approving the recorded data using an original algorithm implemented as a script is considered. The script performs automatic signal synchronization, visualization, and correctness checks against a set of specified criteria. The developed software tool minimized data processing time and reduced the risk of errors in analysis. The obtained data arrays on the load of the vehicle's body and suspension systems are intended for the subsequent development of accelerated durability test cycles on the proving ground with a specified damage equivalent.

Key words: car; resource testing; public roads; proving ground; traffic rules.

FOR CITATION: V.A. Dianov, A.I. Bokarev, I.V. Neskin, P.K. Dyakov, E.P. Mazur. Collecting road operation data of domestic electric vehicle prototype for possibility of conducting accelerated resource tests with given damage equivalent. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 67-84. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_67 EDN: FRAEDB

Введение

Обязательным этапом проектирования нового автомобиля являются натурные испытания, в процессе которых важно оценить работу конструкции в широком спектре режимов движения. Одним из оцениваемых свойств является надежность автомобиля: проверяется фактический ресурс конструкции на основе экспериментально полученного цикла нагружения. Изучением ресурсных испытаний занимались как отечественные ученые (Н.Н. Яценко, С.Ф. Безверхний, Б.А. Куров, С.А. Лаптев, И.В. Балабин [1-4]), так и зарубежные: П. Йоханессон, М. Шпекерт [5]. Данная научная работа опирается на их опыт и является продолжением исследования [6]. Ее задачей является демонстрация практической реализации полуэмпирического метода оценки нагруженности.

Применение и анализ современных методов для разработки программ форсированных испытаний автомобиля, направленных на исследования долговечности отдельных групп деталей автомобиля, имеют особое значение для формирования баз данных, что в дальнейшем может позволить выстроить процесс проектирования и валидации шасси автомобилей еще более эффективно. Таким образом, раскрытие особенностей процесса сбора данных о дорожной эксплуатации автомобиля имеет практическую ценность и является актуальной темой для исследования.

Объект исследования

Объектом исследования в рамках данной работы является прототип отечественного электромобиля АТОМ (рис. 1). Параметры объекта исследования кратко приведены в табл. 1.



Рис. 1. Прототип отечественного электромобиля «АТОМ»

Fig. 1. Prototype of the domestic electric vehicle «ATOM»

Таблица 1.
Параметры испытываемого электромобиля

Table 1.
Tested electric vehicle parameters

Основные параметры автомобиля	Ед. изм.	Передняя подвеска	Задняя подвеска
Масса автомобиля	[кг]	1930	
Распределение массы	[кг]	909	1021
Высота центра масс	[мм]	587	
Колея	[мм]	1550	1530
Колесная база	[мм]	2635	
Статический продольный угол наклона оси поворота	[°]	5,54	–
Статический поперечный угол наклона оси поворота	[°]	14,67	–
Статический угол развала	[°]	-0,211	-1,478
Статический угол схождения	[°]	0,029	0,187
Статический радиус колеса	[мм]	311	307

Подготовка к испытаниям

Процесс подготовки к испытаниям представлен в формате блок-схемы на рис. 2. Он определяет основу для получения достоверных и воспроизводимых результатов. Проверка на техническую исправность и соответствие спецификации является базовым, но одним из самых важных этапов. Необходимо убедиться, что испытываемый автомобиль находится в исправном техническом состоянии и идентичен спецификации в части упругих и демпфирующих элементов, элементов несущей системы и подвески, базовых алгоритмов работы систем и актуальности калибровок систем шасси и трансмиссии. Требуется провести контроль и заправку испытываемого автомобиля технологическими жидкостями, а также проконтролировать и выставить углы установки колес (в снаряженном состоянии) в соответствии с требованиями спецификации. Любая неисправность или отклонение от спецификации может сделать все последующие испытания бесполезными, так как их результаты будут некорректными и несопоставимыми, поскольку каждый из исследуемых параметров влияет на поведение автомобиля при эксплуатации.

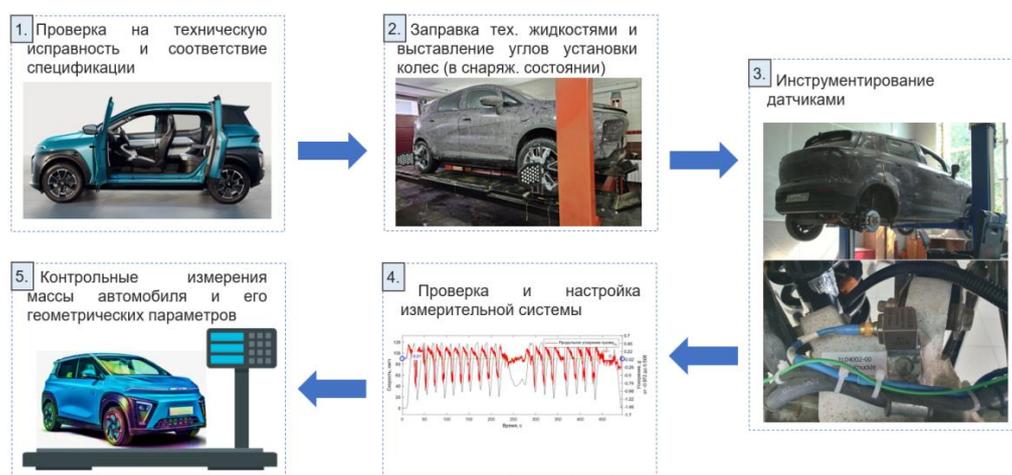


Рис. 2. Блок-схема подготовки объекта исследования к испытаниям

Fig. 2. Flow chart of preparation of the research object for testing

На время испытаний автомобиль оснащается измерительным оборудованием. В предыдущей работе [6] авторы статьи описывали вопрос инструментирования автомобиля необходимым измерительным оборудованием для подготовки к испытаниям, поэтому на базе данной информации в табл. 2 представлен перечень измерительной аппаратуры, которым оснащался объект исследования.

Таблица 2.
Список установленного измерительного оборудования

Table 2.
List of installed measuring equipment

№	Оборудование	Характеристика	Место установки	Количество аналоговых каналов	Частота сбора данных, Гц	Примечания
1. Система сбора данных						
1.1	Кронос Флекс	Базовый блок сбора данных	Салон автомобиля	16	200	
1.2	Модуль Т-10	Модуль расширения на 10 термопар	Салон автомобиля	10	200	

Продолжение табл. 2.
Список установленного измерительного оборудования

Table 2 continued.
List of installed measuring equipment

№	Оборудование	Характеристика	Место установки	Количество аналоговых каналов	Частота сбора данных, Гц	Примечания
1.3	Модуль УТИ-6	Модуль расширения на 6 аналоговых каналов	Салон автомобиля	6	200	
2. Левое переднее колесо						
2.1	Датчик ускорения трехосевой	Kistler Type 8396A ± 50 G	Кулак левого переднего колеса	3	200	3 оси - X Y Z
2.2	Тензодатчики на пружину	2 датчика QFCT-2-350-11	Пружина левое переднее колесо	1	200	Значение в [кН]
2.3	Датчик перемещения	LVDT RL50-G-KR-X0fc9	Левое переднее колесо	1	200	Значение в [мм]
3. Правое заднее колесо						
3.1	Датчик ускорения трехосевой	Kistler Type 8396A ± 50 G	Кулак правого заднего колеса	3	200	3 оси - X Y Z
3.2	Тензодатчики на пружину	2 датчика QFCT-2-350-11	Пружина правое заднее колесо	1	200	Значение в [кН]
3.3	Датчик перемещения	LVDT RL50-G-KR-X0fc9	Правое заднее колесо	1	200	Значение в [мм]
4. Подвеска автомобиля						
4.1	Термопары	Термопары тип К	Амортизаторы автомобиля+ наружная температура	5	10	Значение в °С
5. Кузов автомобиля						
5.1	Датчик ускорения трехосевой	Kistler Type 8396A ± 50 G	Левая передняя часть кузова	3	200	3 оси - X Y Z
5.2	Датчик ускорения трехосевой	Kistler Type 8396A ± 50 G	Правая передняя часть кузова	3	200	3 оси - X Y Z
5.3	Датчик ускорения трехосевой	Kistler Type 8396A ± 50 G	Левая задняя часть кузова	3	200	3 оси - X Y Z
5.4	Датчик ускорения трехосевой	Kistler Type 8396A ± 50 G	Правая задняя часть кузова	3	200	3 оси - X Y Z
5.5	Иннерциальный модуль	Сенсорика, данные по шине CAN	Центральная консоль автомобиля, место указывает заказчик	0	50	3 оси ускорения и 3 оси вращения

Окончание табл. 2.

Список установленного измерительного оборудования

Table 2 terminated.

List of installed measuring equipment

№	Оборудование	Характеристика	Место установки	Количество аналоговых каналов	Частота сбора данных, Гц	Примечания
6. Цифровые шины автомобиля						
6.1	Каналы сбора данных с шины CAN автомобиля	EPT Can, Chassis Can	Разъем OBD 1, Шины CAN3 и CAN4	0	50	
6.2	Угол поворота рулевого колеса	CAN шина		1	50	
6.3	Скорость	CAN шина		1	100	
6.4	Путь	CAN шина		1	50	
6.5	Момент крутящий двигателя	CAN шина		1	100	
6.6	Частота вращения двигателя	CAN шина		1	50	
6.7	Положение педали акселератора	CAN шина		1	50	
6.8	Положение педали тормоза	CAN шина		1	50	
6.9	GPS	Garmin, штатный датчик системы сбора данных	Крыша автомобиля	0	5	Широта, долгота, скорость, путь

Процесс оснащения испытываемого автомобиля датчиками показан на рис. 3.



Рис. 3. Иллюстрация процесса инструментирования объекта исследования

Fig. 3. Illustration of the process of instrumentation of the research object

В соответствии с отечественными [7-11] и зарубежными [12-15] работами, оценку нагруженности возможно проводить с помощью трехосевых датчиков ускорений, установленных на подрессоренных и неподресоренных массах в наиболее нагруженных местах их соединений. Данные, собранные измерительным оборудованием во время испытаний, впоследствии могут быть использованы для оценки не только нагруженности, но и, например, плавности хода объекта исследования. Также они могут быть применимы для последующих стендовых испытаний – например, испытания кузова в составе автомобиля на четырехопорном гидравлическом стенде. При использовании записываемых данных в математическом моделировании спектр применимости является неограниченным, поскольку область применения значительно расширяется в совокупности с инструментарием и функционалом математических моделей. Для удобства обработки результатов испытаний специальные требования предъявляются к системе координат измерительных датчиков. Датчики должны быть ориентированы в соответствии с системой координат на рис. 4.

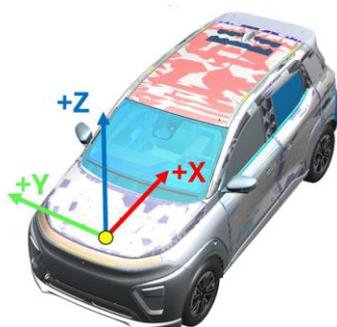


Рис. 4. Требования к системе координат датчиков

Fig. 4. Requirements for the sensor coordinate system

Перед проведением работ проверяется исправное техническое состояние объекта исследования и общая конфигурация автомобиля. На протяжении всего цикла испытаний она должна быть неизменной как на дорогах общего пользования, так и на дорогах полигона. Перечень контролируемых параметров:

- комплект и состояние установленных упругих и демпфирующих элементов;
- комплекты и состояние резинометаллических шарниров;
- комплект и состояние шин;
- давление в шинах;
- статические углы установки колес;
- весовое состояние автомобиля.

Перед испытанием фиксируются массово-геометрические параметры инструментированного автомобиля:

- масса и распределение массы;
- высота центра масс;
- дорожный просвет (положение каждого колеса относительно кузова);
- колея спереди и сзади;
- колесная база слева и справа.

На протяжении всего периода испытаний контролируется исправное техническое состояние объекта исследования, его компонентов, систем и измерительного оборудования. Массовое состояние инструментированного автомобиля, на котором проводятся испытания, является промежуточным между снаряженной и полной загрузкой, что для целей сравнительного анализа нагруженности является консервативным решением. Также одним из допущений по состоянию автомобиля является изменение массы автомобиля во время испытаний в зависимости от расхода технических жидкостей.

Процедура одобрения записанных данных по результатам испытаний

Очень важна гарантия точности и достоверности записываемых данных. В связи с этим, в течение этапа подготовки и предварительного тестирования функционирования измерительного комплекса авторами разработана процедура одобрения результатов испытаний. Блок-схема данной процедуры проиллюстрирована на рис. 5.



Рис. 5. Блок-схема процедуры одобрения записанных данных

Fig. 5. Flow chart of the procedure for approval of recorded data

Основу процедуры одобрения результатов испытаний составляет оригинальная программная реализация обработки данных. Программа представляет собой написанный скрипт в среде «MATLAB», выводящий записанные данные по всем каналам в виде графиков, по которым производилась оценка адекватности результатов, что существенно ускоряет процесс обработки результатов испытаний. Проверка выполнялась по критериям:

- сигнал не пишется;
- ошибка синхронизации;
- некорректная полярность;
- некорректные величины;
- дрейф сигнала;
- некорректная частота записи;
- наличие «выколотых точек»
- и прочие типовые ошибки.

Реализованный скрипт обладает функцией прекращения выполнения программы с определением датчика с некорректно записанными данными. Причина ошибки выявляется и фиксируется программой, а результат одобрения / неодобрения файла записи в качестве информации для принятия дальнейших действий выводится оператору. При неодобрении файла записи программа фиксирует критерий несоответствия, который также сообщается оператору, что служит сигналом необходимости проверки измерительной системы и повторной записи параметров в процессе проведения испытаний.

В данном исследовании были использованы измерительные устройства с различной частотой записи (табл. 2). Из-за разной частоты записи массивы данных имеют различную длину и разбросаны по времени. Таким образом, возникает необходимость синхронизации показателей датчиков для удобства обработки результатов эксперимента.

В основе алгоритма написанного скрипта заложены следующие этапы:

- 1) определение времени записи для датчиков с разной частотой записи;

- 2) синхронизация показаний датчиков во временной области;
 - 3) визуализация записанных показаний для определения корреляционных зависимостей.
- Блок-схема алгоритма работы скрипта в программе «MATLAB» показана на рис. 6.

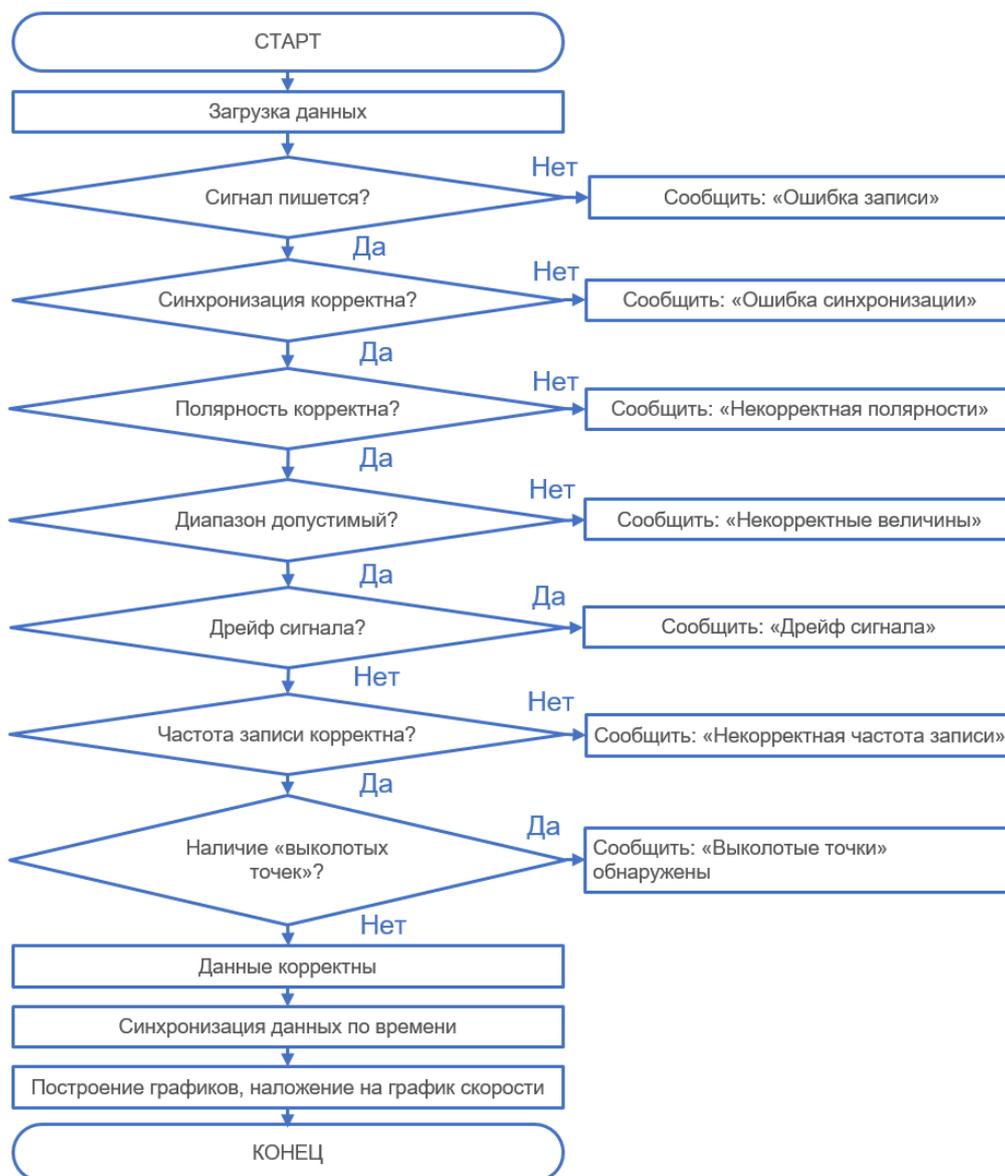


Рис. 6. Блок-схема алгоритма скрипта

Fig. 6. Flow chart of the script algorithm

Фрагменты листинга скрипта в программе «MATLAB» показаны на рис. 7. Представленная программная реализация решает задачу итеративного многоуровневого процесса верификации данных с обратной связью, которая направлена на обеспечение надлежащего качества и достоверности экспериментальных данных.

Проведение испытаний

1. Испытания на дорогах общего пользования

Для исследования режимов движения при повседневной эксплуатации выбирается маршрут, пролегающий по дорогам общего пользования.

При составлении маршрута исходными данными являются заданные производителем соотношения по распределению пробега по разным типам дорог. Также производителем задается целевой ресурс в км пробега (например, 200 тыс. км) или моточасах. Для автомобилей различного назначения соотношение типов дорог может меняться. В табл. 3 приведены данные распределения пробега по разным типам дорог для объекта исследования, заложенные производителем.

Таблица 3.
Распределение пробега по разным типам дорог объекта исследования

Table 3.
Distribution of research object's mileage across different types of roads

Тип дороги	% пробега
Городские дороги	64
Пригородные дороги	20
Трассы	16

Маршруты записываются разными водителями с целью исключить погрешность на стиль вождения конкретного водителя. Каждый маршрут записывается несколько раз и в разное время суток для получения усредненного результата в условиях изменяющегося дорожного трафика. Один водитель проезжает круг в обе стороны, а длина круга может быть любой. Схема для расчета количества испытаний показана на рис. 8.

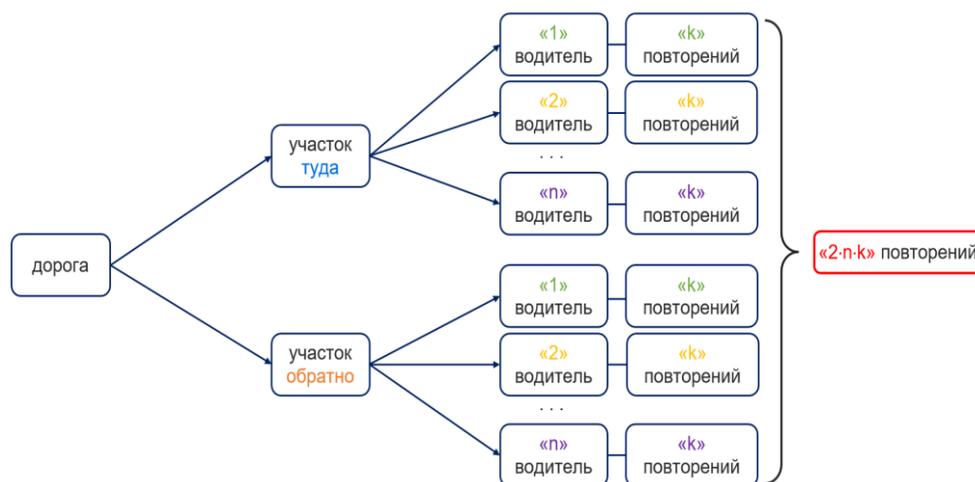


Рис. 8. Схема для расчета количества испытаний

Fig. 8. Scheme for calculating the number of tests

Для объекта исследования ввиду ограничения времени составлен один вариант маршрута, соответствующий распределению пробега по дорогам общего пользования, указанному в табл. 3. Маршрут в обе стороны прошли три водителя. Таким образом, получилось шесть файлов записи прохождения выбранного маршрута, схема которого представлена на рис. 9.

2. Испытание на дорогах полигона

Сбор нагрузок объекта исследования в режиме форсированной эксплуатации проводились на территории полигона НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ». Для испытаний выбраны характерные участки дорог автополигона, показанные на схеме на рис.10. Укрупненно показаны специальные испытательные дороги (3), стрелками обозначено разрешенное направление движения.

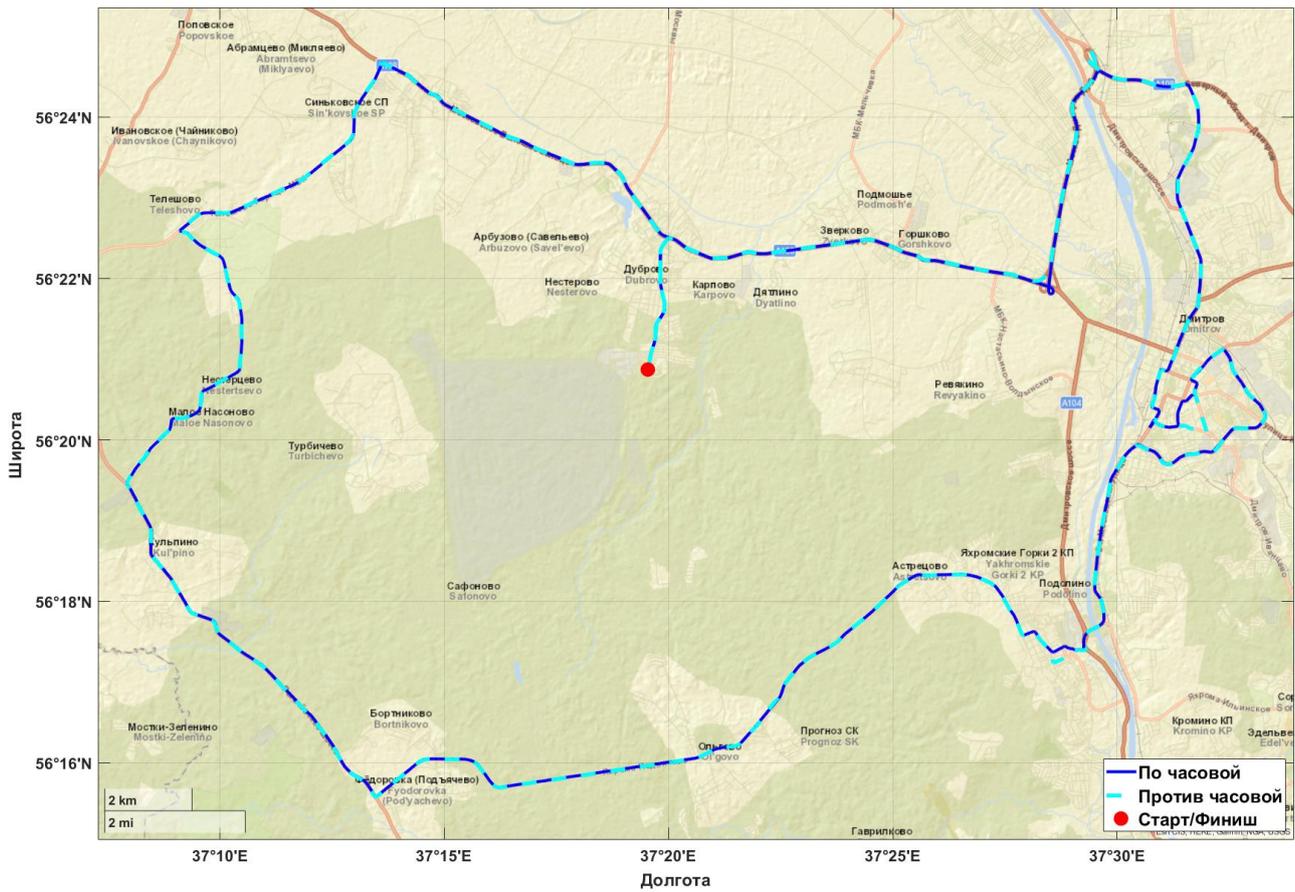


Рис. 9. Схема выбранного маршрута по дорогам общего пользования

Fig. 9. Scheme of the selected route on public roads



Рис. 10. Схема дорог автополигона НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ»

Fig. 10. Road map of the NICIAMT FSUE «NAMI» proving ground

Список режимов движения на различных дорогах приведен в табл. 4.

Таблица 4.
Типы дорог и режимы для проведения испытаний на полигоне

Table 4.
Road types and modes for testing at the proving ground

№	Наименование дороги	Описание режима	Количество повторений
1	Динамометрическая платформа	Циклы режимов движения «максимальный разгон» до 120 км/ч – «максимальное торможение» до 20 км/ч	1
2	Горная дорога	Движение на максимальной скорости (45- 55 км/ч) по часовой стрелке и против часовой стрелки	8 (4+4)
3	Бельгийская мостовая дорога	Движение с максимальной комфортной для водителя скоростью (15-20 км/ч)	4
	Короткая волна	Движение на некомфортной резонансной скорости (15-20 км/ч)	4
	Ровная булыжная дорога	Движение на некомфортной резонансной скорости (20-25 км/ч)	4
4	Круглая восточная испытательная площадка	Маневр «Восьмерка» по часовой стрелке и против часовой стрелки. Маневр начинается со скорости 40 км/ч, скорость в процессе выполнения может снижаться до 25 км/ч	8 (4+4)

Выбор описанных выше дорог и режимов нагружения обусловлен соответствием участка дороги предмету испытаний (ресурсные испытания и нагруженность), классу автомобиля, возможности форсированной эксплуатации на данных участках дорог, а также потенциальной возможности на следующих этапах составить замкнутый цикл форсированной эксплуатации. Типы дорог полигона, не подходящие для испытаний в рамках данной работы, и их особенности кратко указаны в табл. 5.

Таблица 5.
Типы дорог, не подходящие для испытаний разрабатываемого электромобиля

Table 5.
Road types unsuitable for testing the electric vehicle under development

№	Наименование дороги	Особенности
5	Скоростная дорога	Вносят малый вклад в нагруженность несущих элементов ходовой части автомобиля в рамках форсированной эксплуатации
6	Грунтово-равнинная дорога	
7	Мощеная дорога	Предназначены для испытания других классов автомобилей и чрезмерно нагружают исследуемый автомобиль
8	Грунтово-испытательная дорога	
9	Трек со сменными неровностями	Предназначены для испытаний параметров, не являющихся предметом исследования данной работы
10	Щебеночная дорога	

На рис. 11 схематично показано распределение участков дорог относительно нагрузки, которую они передают на исследуемый автомобиль.

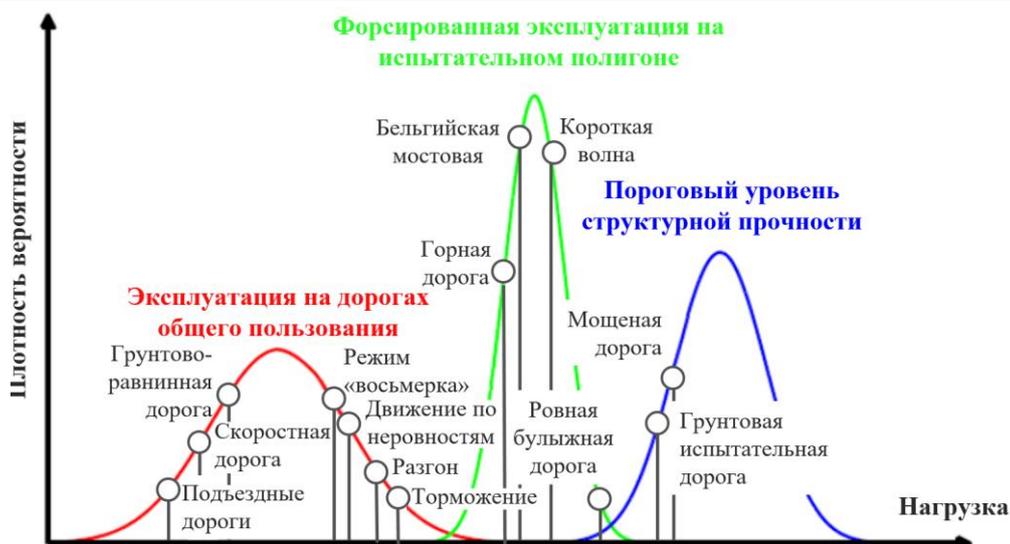


Рис. 11. Распределение участков дорог полигона по критерию нагрузки на автомобиль

Fig. 11. Distribution of test site proving ground road sections according to vehicle load criteria

По результатам работ удалось записать режимы движения, указанные в табл. 4. Данный набор режимов впоследствии планируется в полном или частичном объеме использовать для создания замкнутого форсированного маршрута или маршрутов. Поврежденность несущей системы и реализация режима очень зависят от условий эксплуатации. На дорогах общего пользования запись проводится только в сухую погоду, чтобы наработать консервативную более интенсивную эксплуатацию в сравнении с мокрым асфальтом. В случае с режимами на испытательном полигоне – поскольку ресурсные испытания впоследствии будут проводиться ежедневно на протяжении длительного периода времени – существует риск, что асфальт в какой-то из дней окажется мокрым. В связи с этим предусмотрена запись режимов на дорогах испытательного полигона при мокром асфальте, чтобы впоследствии при обработке данных была возможность учитывать коррекцию коэффициента усиления. В процессе проведения записи режимов на испытательном полигоне также учитывались:

- уровень форсированности режимов оптимальный, чтобы впоследствии водитель-испытатель смог без вреда для здоровья проводить испытания целую смену (оптимальность определяется на основе опыта водителя-испытателя при условиях соблюдения правил дорожного движения на полигоне);
- движение по специальным дорогам (3) из табл. 4 происходило по правилам дорожного движения полигона (разрешено эксплуатировать автомобиль на данных дорогах только в одном направлении движения);
- регистрация подъездных дорог при движении от одного специального участка полигона к другому, а также при движении из бокса к испытательным участкам и обратно (е поврежденности от движения по подъездным дорогам необходим для оценки нагруженности на следующем этапе работ);
- запись режимов движения по горной дороге (2) из табл. 4 проводилась при движении по часовой стрелке и против-часовой стрелки (по правилам полигона в четные дни месяца на горной дороге разрешено движение по часовой стрелке, в нечетные – против часовой, дополнительно учитывались возможности водителя испытателя по повторяемости режима движения по горной дороге – установлено оптимальная повторяемость в количестве 8-11 раз).

В качестве примера работы программы проверки записанных данных на рис. 12 представлены графики показаний датчиков для маршрута на дорогах общего пользования. Представлена часть от общего количества отображаемых результатов в виде графиков зависимостей, а именно:

- маршрут по GPS в координатах плоскости дороги от времени;
- угол поворота рулевого колеса от времени;
- ускорение автомобиля по GPS (продольное) от времени;
- высота по GPS от времени;
- угол поворота рулевого колеса от времени;
- усилия в пружинах от времени;
- хода колес от времени.

В соответствии с процедурой, описанной на рис. 6, вывод графиков означает одобрение файла записи и отсутствие ошибок.

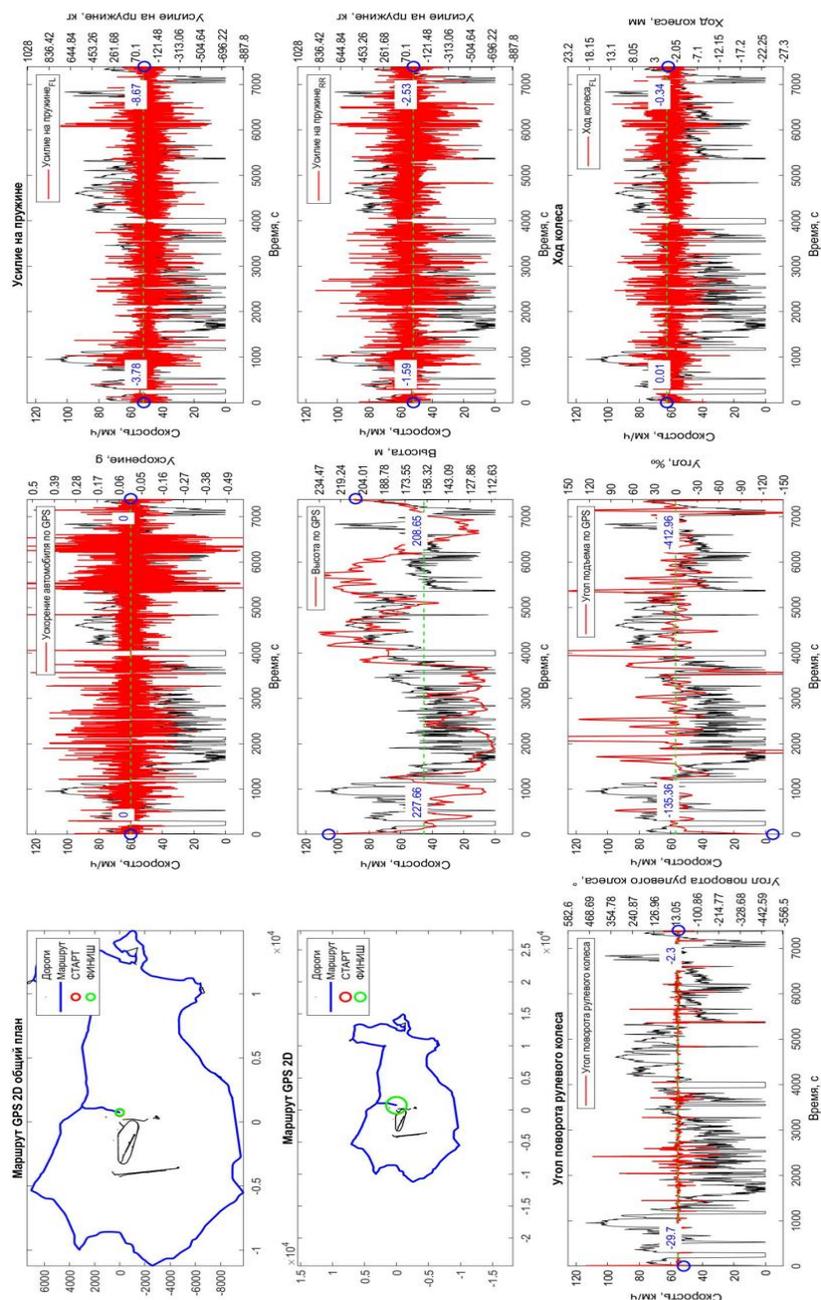


Рис. 12. Иллюстрация результата процедуры одобрения результатов испытаний для файла записи маршрута на дорогах общего пользования (рис. 7)

Fig. 12. Illustration of the result of the test results approval procedure for a route recording file on public roads (fig. 7)

Настоящая работа посвящена сбору и проверке данных испытаний на дорогах общего пользования и дорогах полигона для последующего исследования по критерию нагруженности, что определяет достижимость цели работы. В дальнейшем планируется разработка методики обработки записанных данных для построения закольцованных маршрутов с эквивалентной поврежденностью при сравнении с эксплуатацией на дорогах общего пользования, а также ее применение для представленных данных испытаний. Данная работа является частью большого исследования по созданию технологии формирования маршрутов ускоренной эксплуатации на испытательном полигоне и является наиболее практически значимой его частью, которой отводится главная роль.

Выводы

Проведен сбор данных о дорожной эксплуатации прототипа отечественного электромотоцикла на дорогах общего пользования и дорогах испытательного полигона НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ» для возможности формирования маршрутов ускоренных ресурсных испытаний в заданном эквиваленте поврежденности на следующем этапе работы.

Полученный массив данных прошел процедуру проверки с использованием оригинальной программной реализации обработки данных (написанный скрипт), что позволило:

- сократить время обработки данных результатов испытаний до 100 %;
- обеспечить программную синхронизацию данных из шины данных автомобиля (CAN) и датчиков измерительного оборудования;
- визуализировать записываемые данные в читаемом формате для визуального анализа и определения корреляционных зависимостей параметров;
- в автоматическом режиме определять ошибки записываемых данных за счет построения корреляционных зависимостей.

Проведенное практическое исследование и объяснение основных процессов и этапов сбора эксплуатационных нагрузок полуэмпирическим методом имеет практическую ценность для инженеров и исследователей, занимающихся ускоренными испытаниями автомобилей, автомобильных компонентов и систем.

Библиографический список

1. **Яценко, Н.Н.** Ресурсные испытания грузовых автомобилей на автополигоне. Ч. 1: Развитие, условия и статистическая интерпретация результатов; Ч. 2: Основы форсирования и оптимального планирования испытаний / Н.Н. Яценко, Е.И. Бурдасов, Р.А. Розов [и др.]. – М.: НИИ Автопром, 1974.
2. **Яценко, Н.Н.** Форсированные полигонные испытания грузовых автомобилей. – М.: Машиностроение, 1984. – 328 с.
3. **Безверхий, С.Ф.** Основы технологии полигонных испытаний и сертификация автомобилей / С.Ф. Безверхий, Н.Н. Яценко. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 566 с.
4. **Куров, Б.А.** Испытания автомобилей / Б.А. Куров, С.А. Лаптев, И.В. Балабин. – М.: Машиностроение, 1976. – 208 с.
5. **Johannesson, P.** Guide to Load Analysis for Durability in Vehicle Engineering / P. Johannesson, M. Speckert – Ch.: Wiley, 2014. – 458 p.
6. **Дианов, В.А.** Анализ проблемы разработки методики ускоренных испытаний автомобиля / В.А. Дианов, А.И. Бокарев, Ф.К. Дьяков [и др.]. // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. – 2025. – № 2 (100). Сетевое издание. URL.: <https://kpfu.ru/nomer-4-102-za-2025-god-478246.html> (дата обращения 5.09.2024).
7. **Степанов, Е.В.** Оценка адекватности модели легкого коммерческого автомобиля при исследовании плавности хода / Е.В. Степанов, А.А. Васильев, Д.А. Бутин [и др.]. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2021. – № 4. – С. 110-118. – DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_110.
8. **Степанов, Е.В.** Снижение вибронагруженности коммерческих автомобилей за счет применения упругодемпфирующих устройств подвески на основе эластомерных материалов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2022. – № 1. – С.148-163. – DOI: 10.46960/1816-210X_2022_1_148

9. **Дубровский, А.Ф.** Оценка эффективности пневматической подвески автобуса / А.Ф. Дубровский, Р.А. Закиров, С.В. Косолапов [и др.]. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2024. – Т. 24, № 3. – С. 75-85. – DOI: 10.14529/engin240307
10. **Ерёмина, И.В.** Обеспечение плавности хода при проектировании легкового автомобиля с учетом влияния потерь на трение в подвеске: автореферат дис. ... к-та тех. наук. – Тольятти, 2008. – 27 с.
11. **Яценко, Н.Н.** Плавность хода грузовых автомобилей / Н.Н. Яценко, О.К. Прутчиков. – М.: Машиностроение, 1968 – 220 с.
12. **Prażnowski, K.** Assessment of the Road Surface Condition with Longitudinal Acceleration Signal of the Car Body / Prażnowski, K. [et al]. // Sensors. – 2020. – 20. 10.3390/s20215987.
13. **Burdzik, R.** Impact and Assessment of Suspension Stiffness on Vibration Propagation into Vehicle / R. Burdzik // Sensors. – 2023. – No 23. – 1930. – <https://doi.org/10.3390/s23041930>.
14. **Lu, Yongjie.** Numerical and experimental investigation on stochastic dynamic load of a heavy duty vehicle / Y. Lu, Y. Shaopu, Li, Shaohua [et al]. // Applied Mathematical Modelling. – 2010. – 34. – P. 2698-2710. 10.1016/j.apm.2009.12.006.
15. **Siringoringo, D.** Estimating Bridge Fundamental Frequency from Vibration Response of Instrumented Passing Vehicle / D. Siringoringo, F. Yozo // Analytical and Experimental Study. Advances in Structural Engineering. – 2012. – 15. – P. 417-433. 10.1260/1369-4332.15.3.417.

References

1. Yatsenko N.N., Burdasov E.I., Rozov R.A., et al. Resursnye ispytaniya gruzovykh avtomobiley na avtopoligone. Ch. 1: Razvitie, usloviya i statisticheskaya interpretatsiya rezultatov; Ch. 2: Osnovy forsirovaniya i optimal'nogo planirovaniya ispytaniy [Endurance testing of trucks at the proving ground. P. 1: Development, conditions and statistical interpretation of results; P. 2: Fundamentals of acceleration and optimal test planning]. Moscow: NII Avtoprom; 1974 (in Russian).
2. Yatsenko N.N. Forsirovannye poligonnye ispytaniya gruzovykh avtomobiley [Accelerated proving ground tests of trucks]. 2nd ed., revised and updated. Moscow: Mashinostroenie; 1984. 328 p. (In Russian).
3. Bezverkhy S.F., Yatsenko N.N. Osnovy tekhnologii poligonnykh ispytaniy i sertifikatsiya avtomobiley [Fundamentals of proving ground test technology and certification of automobiles]. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1996. 566 p (in Russian).
4. Kurov B.A., Laptev S.A., Balabin I.V. Ispytaniya avtomobiley [Testing of automobiles]. Moscow: Mashinostroenie; 1976. 208 p. (In Russian).
5. Johannesson P., Speckert M. Guide to Load Analysis for Durability in Vehicle Engineering. Ch.: Wiley; 2014. 458 p.
6. Dianov V.A., Bokarev A.I., Dyakov F.K., et al. Analiz problemy razrabotki metodiki uskorennykh ispytaniy avtomobilya [Analysis of the problem of developing a methodology for accelerated vehicle testing]. Sotsial'no-ekonomicheskie i tekhnicheskie sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizatsiya. 2025;(2): [about 10 p.]. Available from: <https://kpfu.ru/nomer-4-102-za-2025-god-478246.html> [accessed 2024 Sep 5] (in Russian).
7. Stepanov E.V., Vasiliev A.A., Butin D.A., et al. Otsenka adekvatnosti modeli legkogo kommercheskogo avtomobilya pri issledovanii plavnosti khoda [Evaluation of the adequacy of a light commercial vehicle model in ride comfort studies]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2021;(4):110-118. doi: 10.46960/1816-210X_2021_4_110 (in Russian).
8. Stepanov E.V. Snizhenie vibronagruzhennosti kommercheskikh avtomobiley za schet primeneniya uprugodempfiruyushchikh ustroystv podveski na osnove elastomernykh materialov [Reducing vibration loads on commercial vehicles through the use of elastic-damping suspension devices based on elastomeric materials]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2022;(1):148-163. doi: 10.46960/1816-210X_2022_1_148 (in Russian).
9. Dubrovsky A.F., Zakirov R.A., Kosolapov S.V., et al. Otsenka effektivnosti pneumaticheskoy podveski avtobusa [Evaluation of the efficiency of a bus air suspension]. Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroenie» [Bulletin of SUSU. Series «Mechanical Engineering»]. 2024;24(3):75-85. doi: 10.14529/engin24030 (in Russian).
10. Eremina I.V. Obespechenie plavnosti khoda pri proektirovanii legkovogo avtomobilya s uchetom vliyaniya poter' na trenie v podveske [Ensuring ride smoothness in passenger car design considering the influence of friction losses in the suspension] [dissertation abstract]. Togliatti; 2008. 27 p. (in Russian).

11. Yatsenko N.N., Prutchikov O.K. Plavnost' khoda gruzovykh avtomobiley [Ride smoothness of trucks]. Moscow: Mashinostroenie; 1968. 220 p. (In Russian).
12. Praznowski K, et al. Assessment of the Road Surface Condition with Longitudinal Acceleration Signal of the Car Body. Sensors. 2020; 20: 5987. doi: 10.3390/s20215987.
13. Burdzik R. Impact and Assessment of Suspension Stiffness on Vibration Propagation into Vehicle. Sensors. 2023;(23):1930. doi: 10.3390/s23041930.
14. Lu Y., Shaopu Y., Li S., et al. Numerical and experimental investigation on stochastic dynamic load of a heavy duty vehicle. Applied Mathematical Modelling. 2010; 34: 2698-2710. doi: 10.1016/j.apm.2009.12.006.
15. Siringoringo D., Yozo F. Estimating Bridge Fundamental Frequency from Vibration Response of Instrumented Passing Vehicle: Analytical and Experimental Study. Advances in Structural Engineering. 2012; 15: 417-433. doi: 10.1260/1369-4332.15.3.417.

*Дата поступления
в редакцию: 09.11.2025*

*Дата принятия
к публикации: 18.02.2026*

УДК 629.3

DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_85
EDN GLRIVV

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОДВИЖНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В КРУПНОМ ГОРОДЕ ПУТЕМ АНАЛИЗА GPS-ТРЕКОВ МАРШРУТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

М.Е. ЕлисеевORCID: 0000-0002-8522-899X e-mail: eliseevmic@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Л.Н. Ерофеева**ORCID: 0000-0001-6535-1459 e-mail: erofeevaln@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***И.Н. Елисеева**ORCID: 0000-0002-7141-0707 e-mail: eliseevair@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***М.С. Баранова**ORCID: 0000-0001-5419-0223 e-mail: buganvil0805@gmail.comНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Рассматривается подход к определению параметров подвижности транспортных средств в крупном городе. По трекам движения автобусов выбранного маршрута вычисляется время движения каждого из транспортных средств между конечными остановками для всех рейсов. Для аппроксимации полученных точек замеров рассматриваются различные классы функций и выбирается оптимальный из них. В качестве основного метода исследования выбран метод наименьших квадратов. Полученная математическая модель зависимости времени рейса от времени суток для автобусного маршрута используется для определения зависимости скорости движения транспортных средств по магистральным городским дорогам. Разработан алгоритм анализа GPS-трека и компьютерная программа, его реализующая. Представляется перспективным использование данного подхода в интеллектуальной транспортной системе крупного города. Динамическое определение параметров подвижности на магистральных городских дорогах может быть применено для косвенного управления транспортными потоками и при составлении оптимальных расписаний движения маршрутных транспортных средств.

Ключевые слова: подвижность транспортных средств; навигация; автобусный маршрут; анализ GPS-трека; математическое моделирование; моделирование методом наименьших квадратов; интеллектуальная транспортная система.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Елисеев, М.Е. Определение параметров подвижности транспортных средств в крупном городе путем анализа GPS-треков маршрутных транспортных средств / М.Е. Елисеев, Л.Н. Ерофеева, И.Н. Елисеева, М.С. Баранова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 85-94.
DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_85 EDN: GLRIVV

DETERMINING VEHICLE MOBILITY PARAMETERS IN LARGE CITY BY ANALYZING GPS TRACKS OF PUBLIC TRANSPORT VEHICLES

M.E. Eliseev

ORCID: **0000-0002-8522-899X** e-mail: **eliseevmic@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

L.N. Erofeeva

ORCID: **0000-0001-6535-1459** e-mail: **erofeevaln@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

I.N. Eliseeva

ORCID: **0000-0002-7141-0707** e-mail: **eliseevair@mail.ru**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.S. Baranova

ORCID: **0000-0001-5419-0223** e-mail: **buganvil0805@gmail.com**
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article discusses an approach to determining the parameters of vehicle mobility in a large city. The travel time of each bus between the final stops for all trips is calculated based on the bus tracks of the selected route. Different classes of functions are considered to approximate the obtained measurement points and the optimal one is selected. The least squares method is chosen as the main research method. The developed mathematical model of the dependence of the trip time on the time of day for a bus route is used to determine the dependence of vehicles speed on urban arterial road. An algorithm for analyzing GPS tracks and a computer program implementing it have been developed. It seems promising to use this approach in the intelligent transport system of a large city. Dynamic determination of mobility parameters on urban arterial road can be used for indirect control of traffic flows and for creating optimal schedules for public transport vehicles.

Key words: vehicle mobility; navigation; bus route; GPS track analysis; mathematical modeling; least squares modeling; intelligent transport system.

FOR CITATION: M.E. Eliseev, L.N. Erofeeva, I.N. Eliseeva, M.S. Baranova. Determining vehicle mobility parameters in large city by analyzing GPS tracks of public transport vehicles. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 85-94. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_85 EDN: GLRIVV

Введение

Подвижность транспортных средств (ТС) на магистралях крупного города меняется в зависимости от времени суток, месяца, дня недели, погоды и других факторов. Тем не менее, накопленные исторические данные о подвижности ТС на городских магистралях позволяют дать достаточно точный ее прогноз. Ввиду того, что сеть маршрутного транспорта охватывает всю сеть магистральных городских улиц и дорог, одним из методов оценки характеристик подвижности ТС может являться оценка неравномерности времени рейса маршрутного транспортного средства в зависимости от дня недели и времени суток. В ранние утренние и поздние вечерние часы дороги практически свободны, и маршрутные транспортные средства (МТС) могут передвигаться с высокой средней скоростью. В утренний и вечерний час пик загрузка улично-дорожной сети (УДС) резко увеличивается, средняя скорость движения МТС падает, соответственно время рейса возрастает. В межпиковый период (дневное время) загрузка УДС меньше, чем в часы пик, но выше, чем ранним утром и поздним вечером, соответственно, время рейса имеет средние значения.

Прогнозирование времени прибытия автобуса рассматривается в ряде работ [1-10]. Для него используются исторические данные и данные реального времени [2, 3, 7]. Исторические данные (навигационные отметки) – набор геокоординат, данные смарт-карт [10] или фиксация времени на некоторых контрольных точках [7]. Также прогноз может осуществляться на основании скорости движения автобуса [9]. Для составления прогноза часто используются нейросети [3-5]. Авторам представляется перспективным также модельный подход, в частности, т.н. агентное моделирование [11]. Для моделирования сети общественного транспорта и составления реальных расписаний движения автобусов (или др. МТС) необходимо знать время движения автобуса между конечными остановочными пунктами в течение суток [12].

В данной работе рассматривается простейший вариант организации маршрута, когда имеются два конечных остановочных пункта, и маршрут в прямом и обратном направлении одинаков. Далее для краткости конечные остановочные пункты будут именоваться: первая конечная и вторая конечная. Без существенных изменений подход, рассмотренный в данной работе, может быть перенесен на остальные варианты маршрутов (кольцевые, с большим числом конечных и т.п.).

Целью исследования является получение функций $T_{12}(t)$ и $T_{21}(t)$, где $T_{12}(t)$ – функция времени движения от первой конечной до второй в течение суток, $T_{21}(t)$ – функция времени движения от второй конечной до первой в течение суток.

Материалы и методы

В качестве исходных данных используются треки движения автобусов в формате *.csv. Файл представляет собой набор строк, каждая из которых содержит информацию о идентификаторе ТС, геокоординатах ТС (долгота и широта), времени нахождения ТС в данной точке и скорости ТС. Разделителями полей служат знаки «;», что является стандартным для файлов данного формата. Ввиду того, что навигационной системой должно быть оборудовано каждое МТС, имеется фактически полная информация о движении автобусов по маршруту (табл. 1), за исключением редких случаев сбоя работы навигационной системы.

Таблица 1.
Фрагмент таблицы исходных данных – треков движения автобусов исследуемого маршрута (файла формата *.csv)

Table 1.
A fragment of the table with initial data – bus movement tracks for the route under study (*.csv file)

ИД	Время	Широта	Долгота	Скорость
8316002	2020-06-04 20:11:00	56.308599	44.023083	17.0
8316021	2020-06-04 20:11:00	56.28155	44.052617	0.0
8316027	2020-06-04 20:11:00	56.300033	44.032	26.0
8316026	2020-06-04 20:11:00	56.336133	43.94125	15.0
8316011	2020-06-04 20:11:00	56.2816833	44.052517	0.0
8316025	2020-06-04 20:11:00	56.2816	44.052617	0.0
8316019	2020-06-04 20:11:00	56.330667	43.995667	17.0
8316014	2020-06-04 20:11:00	56.335383	43.9080177	0.0

Для обработки данных используются методы работы с базами данных, в частности, динамические SQL-запросы, авторский алгоритм обработки данных, приводимый ниже. Для построения математической модели используется аппарат математической статистики и регрессионный анализ, в частности, метод наименьших квадратов для подбора аппроксимиру-

ющей функции. Последний метод находит широкое применение в моделировании различных технических процессов и систем.

Коротко суть метода такова: имеется набор из k точек (x_i, y_i) , рассматривается класс аппроксимирующих функций $y = f(x)$ и строится функция:

$$F(a_1, a_2, \dots, a_k) = \sum_{i=1}^k (f(x_i) - y_i)^2, \quad (1)$$

где a_i – параметры аппроксимирующей функции.

Далее ищется минимум функции $F(a_1, a_2, \dots, a_k)$, для чего она дифференцируется по каждому из независимых аргументов и составляется система уравнений:

$$\begin{cases} F'_{a_1}(a_1, a_2, \dots, a_k) = 0 \\ F'_{a_2}(a_1, a_2, \dots, a_k) = 0 \\ \dots \\ F'_{a_k}(a_1, a_2, \dots, a_k) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Решая систему (2), находим значения параметров a_i и получаем функцию из данного класса функций, которая наилучшим образом соответствует набору данных точек в соответствии с методом наименьших квадратов. Подробное описание метода наименьших квадратов можно найти в [13], где дан всесторонний обзор исследований, связанных с этим методом.

При получении исходного набора точек, в случае их чрезмерного количества (большого количества МТС на маршруте) могут использоваться не все треки, а определенная их выборка, отвечающая требованию репрезентативности. Функция времени движения для одного маршрута в течение года также могут отличаться, поэтому для получения достаточно точных результатов необходимо использовать репрезентативную выборку анализируемых дней.

Результаты

Как указывалось выше, информацию о движении автобусов получаем в виде треков бортового навигатора в формате *.csv. Фактически это точки вида (x_i, y_i, t_i, V_i) , где x_i – широта, y_i – долгота, t_i – время, V_i – скорость.

Алгоритм получения искомого набора точек (t_i, T_i) следующий:

- 1) определяем геокоординаты конечных остановок (a_1, b_1) и (a_2, b_2) по векторной карте города, например, OpenStreetMap;
- 2) окружаем кругом радиусом 50 м каждую из конечных, далее данные круги будем называть зонами 1 и 2 конечных;
- 3) полагаем, что точка (x_i, y_i, t_i, V_i) находится внутри зоны j -конечной, если выполняется неравенство:

$$\sqrt{(a_j - x_i)^2 + (b_j - y_i)^2} \leq 50, \quad (3)$$

- 4) сортируем строки по id (идентификатору ТС) и по времени;

5) выбираем такие пары соседних строк, чтобы первой отвечала точка внутри круга, второй – вне круга, соответственно, получаем время отправления от каждой из конечных или время прибытия на конечную.

Данный алгоритм реализовывался с помощью программы, работа которой показана на рис. 1.

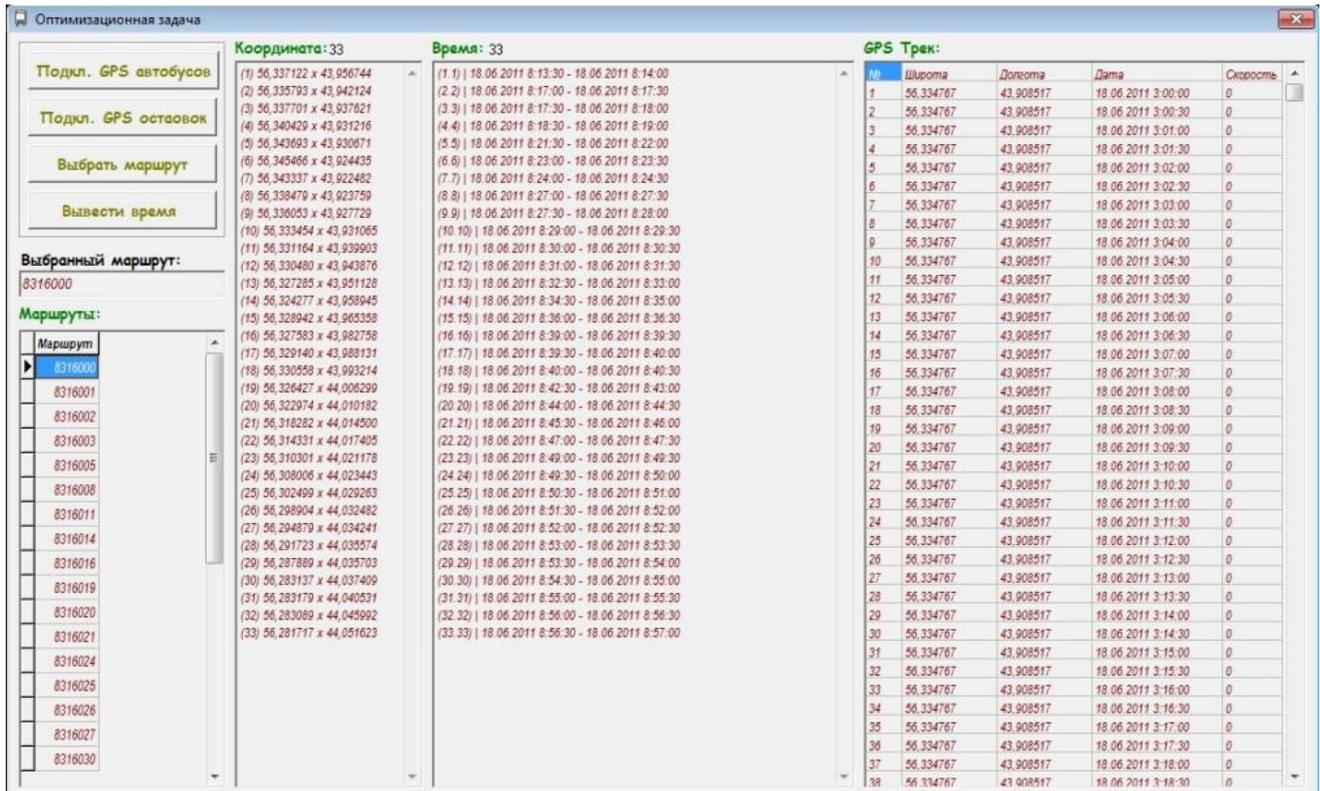


Рис. 1. Фрагмент работы программы анализа GPS-треков движения автобусов

Fig. 1. A fragment of the program for analyzing GPS tracks of bus movements

Рассматривая разности между временами выезда и приезда, получаем данные о времени рейса в прямом и обратном направлениях – два набора точек вида (t_i, T_i) . Аппроксимация данных точек представляет собой нетривиальную задачу. Для определения подходящего класса функций необходимо учитывать следующее:

- 1) результирующая функция должна иметь два максимума (соответствующие утреннему и вечернему часу пик);
- 2) не должны учитываться небольшие флуктуации – функция не должна повторять малые колебания значений слишком подробно;
- 3) желательно наличие горизонтальной асимптоты ввиду того, что минимальное время рейса известно и положительно.

Рассматривались несколько классов аппроксимирующих функций. Функции (4) являющиеся алгебраической суммой многочлена 4-й степени и двух экспоненциальных функций казались перспективными, но наличие 9 параметров и невозможность получения явного решения, возникающих уравнений делают этот класс функций неприемлемым.

$$f(t) = \alpha_4 t^4 + \alpha_3 t^3 + \alpha_2 t^2 + \alpha_1 t + \alpha_0 + \beta_1 e^{-\gamma_1(t-t_1)^2} + \beta_2 e^{-\gamma_2(t-t_2)^2}, \quad (4)$$

Многочлены 5-й степени имеют два максимума, но резкое убывание на левой и правой границе при аппроксимации имеет следствием ошибки двух типов:

- 1) смещение пиков (максимумов);
- 2) сглаживание пиков (максимумов).

Это совершенно неприемлемо, так как приведет к ошибкам при составлении расписаний движения маршрутных транспортных средств.

Пример сравнения аппроксимирующих функций 5-го и 7-го порядков приводится ниже (рис. 2).

$$t_i = \{6,217; 6,492; 7,083; 7,417; 7,608; 8,083; 8,25; 8,483; 9,592; 10,3; 10,483; 11,2; 11,567; 11,725; 12,883; 13,658; 13,808; 14,617; 14,983; 15,167;$$

$$16,375; 17,058; 17,233; 17,85; 18,367; 18,617; 20,333\}$$

$$T_i = \{0,733; 0,725; 0,9; 0,925; 0,875; 0,908; 0,925; 0,967; 0,992; 1,008;$$

$$0,983; 1,025; 0,833; 0,875; 0,958; 0,875; 0,908; 0,925; 0,742; 0,825; 0,958;$$

$$1,042; 1,092; 0,95; 0,95; 0,875; 0,8\}.$$

$$f_7(t) = 0,0000029033t^7 - 0,000260388t^6 + 0,0097511969t^5 - 0,1975742339t^4$$

$$+ 2,3402445973t^3 - 16,2309802458t^2 + 61,2024327703t - 96,2098034764$$

$$f_5(t) = -0,0000115127t^5 + 0,0005184291t^4 - 0,0062831576t^3 - 0,0191563558t^2$$

$$+ 0,7521989956t - 2,3807196372$$

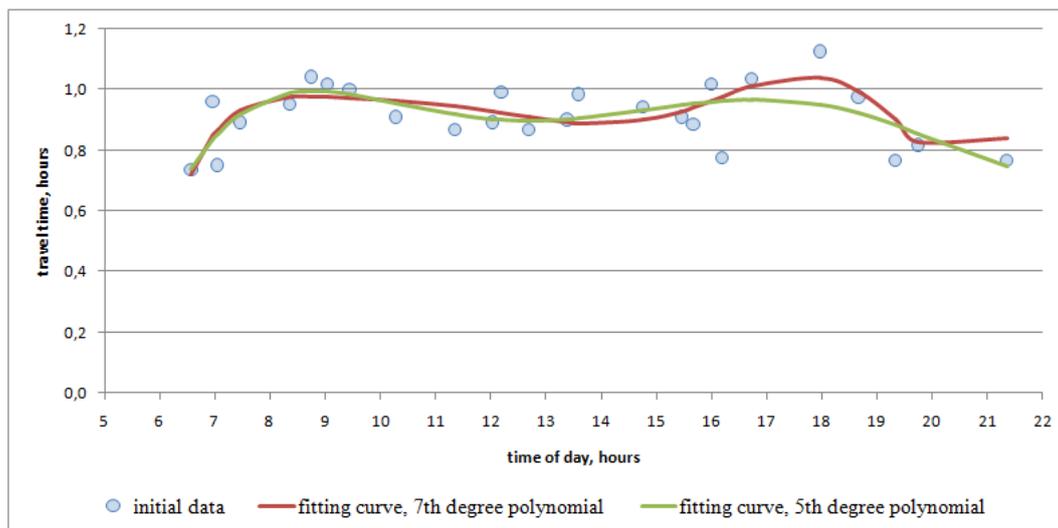


Рис. 2. Пример аппроксимации многочленами 5 и 7 степеней функции $T(t)$ для прямого направления автобусного маршрута Т7 (Нижний Новгород), 6.10.2020, вторник, использованы суточные треки

Fig. 2. An example of approximation by polynomials of 5 and 7 degrees of the function $T(t)$ for the forward direction of bus route T7 (Nizhny Novgorod), 10/6/2020, Tuesday, daily tracks were used

Видно, что вечерний час пик многочлен 5-й степени сглаживает, т.е. дает значительную ошибку. Визуальные соображения подтверждаются статистически: коэффициент корреляции с исходными данными для многочлена 5-й степени равен 0,74, для многочлена 7-й степени 0,81; сумма квадратов разностей для многочлена 5-й степени равна 0,0988, для многочлена 7-й степени – 0,0775. Таким образом, аппроксимация многочленом 7-й степени дает существенное улучшение по сравнению с многочленом 5-й степени.

Важной особенностью вычислений является необходимость высокой точности определения коэффициентов. Так, при использовании многочленов 7-й степени минимальная точность – 10 знаков после запятой, так как при меньшем числе знаков слагаемые соответствующие старшим степеням определяются с большой ошибкой (более одной десятой). С ростом порядка многочлена точность (количество знаков после запятой) приходится значительно увеличивать, кроме того, многочлены, например, 9-й степени начинают отображать «шумы» или флуктуации – малые изменения случайной величины.

Таким образом, оптимальным вариантом является аппроксимация многочленом 7-й степени:

$$f(t) = \alpha_7 t^7 + \alpha_6 t^6 + \alpha_5 t^5 + \alpha_4 t^4 + \alpha_3 t^3 + \alpha_2 t^2 + \alpha_1 t + \alpha_0. \quad (4)$$

где константы α_i определяются из решения системы (2), которая для многочлена 7-й степени принимает вид:

$$\begin{cases} 2 \sum_{i=1}^n ((\alpha_7 t_i^7 + \alpha_6 t_i^6 + \alpha_5 t_i^5 + \alpha_4 t_i^4 + \alpha_3 t_i^3 + \alpha_2 t_i^2 + \alpha_1 t_i + \alpha_0) - y_i)^2 t_i^7 = 0 \\ 2 \sum_{i=1}^n ((\alpha_7 t_i^7 + \alpha_6 t_i^6 + \alpha_5 t_i^5 + \alpha_4 t_i^4 + \alpha_3 t_i^3 + \alpha_2 t_i^2 + \alpha_1 t_i + \alpha_0) - y_i)^2 t_i^6 = 0 \\ \dots \\ 2 \sum_{i=1}^n ((\alpha_7 t_i^7 + \alpha_6 t_i^6 + \alpha_5 t_i^5 + \alpha_4 t_i^4 + \alpha_3 t_i^3 + \alpha_2 t_i^2 + \alpha_1 t_i + \alpha_0) - y_i)^2 t_i = 0 \\ 2 \sum_{i=1}^n ((\alpha_7 t_i^7 + \alpha_6 t_i^6 + \alpha_5 t_i^5 + \alpha_4 t_i^4 + \alpha_3 t_i^3 + \alpha_2 t_i^2 + \alpha_1 t_i + \alpha_0) - y_i)^2 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Преобразуя систему, получаем:

$$\begin{cases} \alpha_7 \sum_{i=1}^n t_i^{14} + \alpha_6 \sum_{i=1}^n t_i^{13} + \dots + \alpha_1 \sum_{i=1}^n t_i^8 + \alpha_0 \sum_{i=1}^n t_i^7 = \sum_{i=1}^n y_i t_i^7 \\ \alpha_7 \sum_{i=1}^n t_i^{13} + \alpha_6 \sum_{i=1}^n t_i^{12} + \dots + \alpha_1 \sum_{i=1}^n t_i^7 + \alpha_0 \sum_{i=1}^n t_i^6 = \sum_{i=1}^n y_i t_i^6 \\ \dots \\ \alpha_7 \sum_{i=1}^n t_i^8 + \alpha_6 \sum_{i=1}^n t_i^7 + \dots + \alpha_1 \sum_{i=1}^n t_i^2 + \alpha_0 \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n y_i t_i \\ \alpha_7 \sum_{i=1}^n t_i^7 + \alpha_6 \sum_{i=1}^n t_i^6 + \dots + \alpha_1 \sum_{i=1}^n t_i + \alpha_0 \sum_{i=1}^n 1 = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases} \quad (6)$$

Это система линейных уравнений относительно неизвестных $\alpha_0, \dots, \alpha_7$. Решая ее по правилу Крамера, получаем значения коэффициентов $\alpha_0, \dots, \alpha_7$. Примеры графиков подобранных функций показаны на рис. 3 и 4. Для прямого направления:

$$T(t) = 0,0000029033t^7 - 0,000260388t^6 + 0,0097511969t^5 - 0,1975742339t^4 + 2,3402445973t^3 - 16,2309802458t^2 + 61,2024327703t - 96,2098034764$$

Для обратного направления:

$$T(t) = 0,0000020052x^7 - 0,0001888831x^6 + 0,0074620604x^5 - 0,1603758850x^4 + 2,0275757109x^3 - 15,1029120090x^2 + 61,4690340879x - 104,6241284378$$

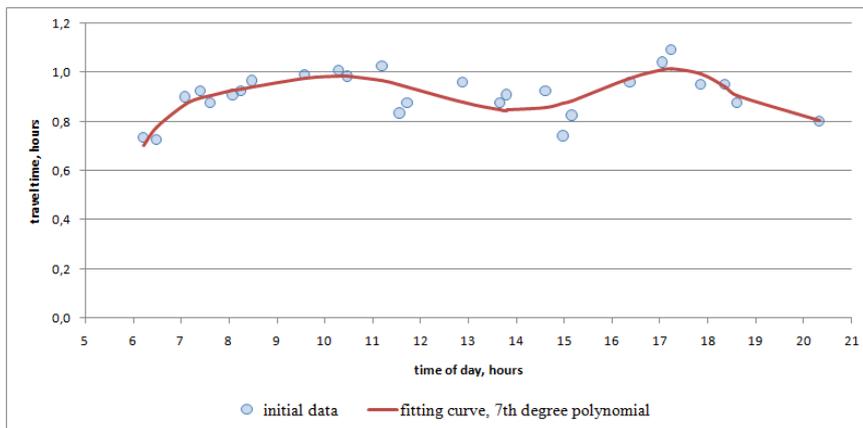


Рис. 3. Пример подбора аппроксимирующей функции $T(t)$ для прямого направления автобусного маршрута Т7 (Нижний Новгород), 6.10.2020, вторник, использованы суточные треки

Fig. 3. An example of selecting an approximating function $T(t)$ for the forward direction of bus route T7 (Nizhny Novgorod), 10/6/2020, Tuesday, daily tracks were used

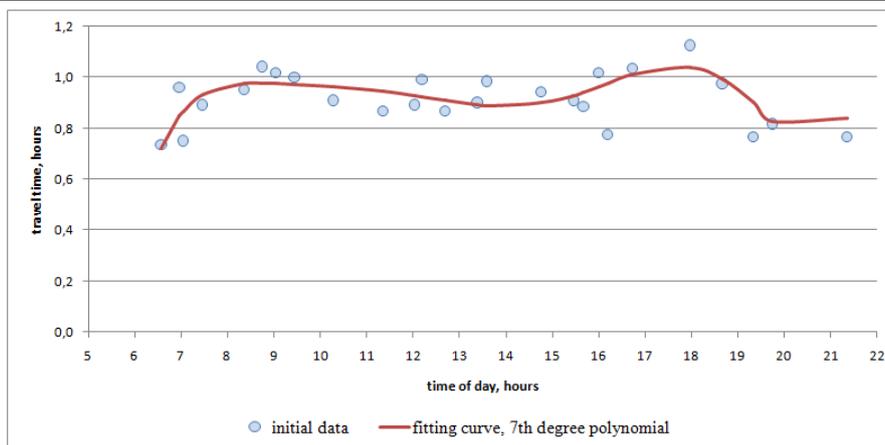


Рис. 4. Пример подбора аппроксимирующей функции $T(t)$ для обратного направления автобусного маршрута Т7 (Нижний Новгород), 6.10.2020, вторник, использованы суточные треки

Fig. 4. An example of selecting an approximating function $T(t)$ for the reverse direction of bus route T7 (Nizhny Novgorod), 10/6/2020, Tuesday, daily tracks were used

Обсуждение

Рассмотренный в работе подход к моделированию времени рейса на автобусном маршруте может применяться как к отдельно взятому дню, так и к временному интервалу любой длины. Авторы использовали данную модель для анализа работы общественного транспорта и анализа транспортных потоков в Нижнем Новгороде с целью последующего моделирования сети общественного транспорта и транспортных потоков. Отметим, что в соответствии с общепринятыми для общественного транспорта стандартами, необходимо отдельно рассматривать срединедельные дни (вторник, среда, четверг), понедельник, пятницу, субботу, воскресенье, праздничные и предпраздничные дни. Моделирование показало, что класс функций (4) дает хорошее приближение для всех дней, только для выходных дней (суббота и воскресенье) график имеет более *сглаженный* вид – максимумы функции меньше отличаются от средних значений, пример аппроксимации для воскресного дня приводится ниже.

Прямое направление:

$$\begin{aligned}
 t_i &= \{6,683; 7,133; 7,383; 8,475; 9,183; 9,858; 10,25; 10,45; 10,825; 11,833; \\
 &12,4; 13,15; 13,492; 13,867; 14,217; 14,8; 15,708; 16,417; 16,6; 17,283; \\
 &17,933; 18,883; 19,092; 19,342; 19,567; 20,208; 21,533; 21,717\} \\
 T_i &= \{0,742; 0,742; 0,767; 0,825; 0,775; 0,767; 0,792; 0,733; \\
 &0,667; 0,775; 0,867; 0,783; 0,9; 0,742; 0,775; 0,825; 0,8; 0,8; 0,783; \\
 &0,725; 0,767; 0,825; 0,717; 0,8; 0,758; 0,733; 0,692; 0,775\}. \\
 f_7(t) &= 0,0000007114t^7 - 0,0000730987t^6 + 0,0031534433t^5 - 0,073882999t^4 \\
 &+ 1,0131092862t^3 - 8,1128681101t^2 + 35,0654423057t - 62,2528280957
 \end{aligned}$$

Полученные результаты не следует рассматривать как обособленные. Модель, анализируемая в данной статье, используется при создании интеллектуальной информационной транспортной системы [14], а также для моделирования автобусных маршрутов и транспортных потоков.

Заключение

В статье рассматривается метод определения параметров подвижности ТС на магистральных улицах крупного города. Строится модель зависимости времени рейса от времени суток для маршрутного ТС. Для получения исходных для моделирования данных (набора точек (t_i, T_i)) используется авторский алгоритм обработки GPS-треков движения МТС, при-

веденный в работе и вспомогательная компьютерная программа, реализующая описанный алгоритм. Основным результатом работы является определение класса функций, подходящих для аппроксимации набора точек (t_i, T_i) , который дается формулой (4) и метод определения коэффициентов аппроксимирующих функций.

Ввиду того, что информация о движении маршрутных транспортных средств поступает в реальном времени, и происходит их автоматизированная обработка, представляется перспективным использование данного подхода в интеллектуальной транспортной системе крупного города. Динамическое определение параметров подвижности на магистральных городских дорогах может быть использовано для косвенного управления транспортными потоками и при разработке моделей транспортной системы крупного города.

Библиографический список

1. **Bin, Y.** Bus arrival time prediction using support vector machines / Y. Bin, Y. Zhongzhen, Y. Baozhen // *Journal of Intelligent Transportation Systems*. – 2006. – Vol. 10, № 4. – P. 151-158.
2. **Cathey, F.W.** A prescription for transit arrival/departure prediction using automatic vehicle location data / F.W. Cathey, D.J. Dailey // *Transportation Research. Part C, Emerging Technologies*. – 2003. – Vol. 11, № 3. – P. 241-264.
3. **Chien, M.** A dynamic bus-arrival time prediction model based on APC data / M. Chen, X. Liu, J. Xia [et al.] // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. – 2004. – Vol. 19, № 5. – P. 364-376.
4. **Chien, S.I.-J.** Dynamic bus arrival time prediction with artificial neural networks / S. I.-J. Chien, Y. Ding, C. Wei // *Journal of Transportation Engineering*. – 2002. – Vol. 128, № 5. – P. 429-438.
5. **Kumar, V.** Comparison of model based and machine learning approaches for bus arrival time prediction / V. Kumar, B.A. Kumar, L. Vanajakshi [et al.] // *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*. – Washington, D.C., 2014. – № 14-2518. – 15 p.
6. **Moreira-Matias, L.** Improving mass transit operations by using AVL-based systems: a survey / L. Moreira-Matias, J. Mendes-Moreira, J.F.D. Sousa [et al.] // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2015. – Vol. 16, № 4. – P. 1636-1653.
7. **Steven, I.** Dynamic travel time prediction with real-time and historic data / I. Steven, J. Chien, C.M. Kuchipudi // *Journal of Transportation Engineering*. – 2003. – Vol. 129, № 6. – P. 608-616.
8. **Yu, B.** Bus arrival time prediction at bus stop with multiple routes / B. Yu, W.H.K. Lam, M.L. Tam // *Transportation Research. Part C, Emerging Technologies*. – 2011. – Vol. 19, № 6. – P. 1157-1170.
9. **Yu, B.** Bus travel-time prediction based on bus speed / B. Yu, Z.Z. Yang, J. Wang // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*. – 2010. – Vol. 163, № 1. – P. 307.
10. **Zhou, Y.** Bus arrival time calculation model based on smart card data / Y. Zhou, L. Yao, Y. Chen [et al.] // *Transportation Research. Part C, Emerging Technologies*. – 2016. – Vol. 74. – P. 1634-1638.
11. **Cats, O.** An agent-based approach for modeling real-time travel information in transit systems / O. Cats // *Procedia Computer Science*. – 2014. – Vol. 32. – P. 744-749.
12. **Hernandez, T.** Flex scheduling for bus arrival time prediction / T. Hernandez // *Transportation Research Record*. – 2014. – № 2418. – P. 110-115.
13. **Wolberg, J.** *Data Analysis Using the Method of Least Squares: Extracting the Most Information from Experiments* / J. Wolberg. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – 250 p. – DOI: <https://doi.org/10.1007/3-540-31720-1>.
14. **Eliseev, M.E.** Virtual reality and navigation subsystems of the interactive system for road safety improving / M.E. Eliseev, T.N. Tomchinskaya, E.D. Galkina [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 386. – Art. 012027. – <https://doi.org/10.1088/1757-899X/386/1/012027>

References

1. Bin Y., Zhongzhen Y., Baozhen Y. Bus arrival time prediction using support vector machines. *J Intell Transp Syst.* 2006;10(4):151-158.
2. Cathey F.W., Dailey DJ. A prescription for transit arrival/departure prediction using automatic vehicle location data. *Transp. Res. Part C. Emerg. Technol.* 2003;11(3):241-264.

3. Chien M., Liu X., Xia J. et al. A dynamic bus-arrival time prediction model based on APC data. *Comput Aided Civ Infrastruct Eng.* 2004;19(5):364-376.
4. Chien S.I.J, Ding Y., Wei C. Dynamic bus arrival time prediction with artificial neural networks. *J Transp Eng.* 2002;128(5):429-438.
5. Kumar V., Kumar B.A., Vanajakshi L. et al. Comparison of model based and machine learning approaches for bus arrival time prediction. Paper presented at: Transportation Research Board 93rd Annual Meeting; 2014 Jan 12-16; Washington, DC. Paper No. 14-2518.
6. Moreira-Matias L., Mendes-Moreira J., Sousa JFD, et al. Improving mass transit operations by using AVL-based systems: a survey. *IEEE Trans Intell Transp Syst.* 2015;16(4):1636-1653.
7. Steven I., Chien J., Kuchipudi C.M. Dynamic travel time prediction with real-time and historic data. *J Transp Eng.* 2003;129(6):608-616.
8. Yu B., Lam W.H.K., Tam M.L. Bus arrival time prediction at bus stop with multiple routes. *Transp Res Part C Emerg Technol.* 2011;19(6):1157-1170.
9. Yu B., Yang Z.Z., Wang J. Bus travel-time prediction based on bus speed. *Proc Inst Civ Eng Transp.* 2010;163(1):3-7.
10. Zhou Y., Yao L., Chen Y. et al. Bus arrival time calculation model based on smart card data. *Transp Res Part C Emerg Technol.* 2016;74:1634-1638.
11. Cats O. An agent-based approach for modeling real-time travel information in transit systems. *Procedia Comput Sci.* 2014;32:744-749.
12. Hernandez T. Flex scheduling for bus arrival time prediction. *Transp Res Rec.* 2014;(2418):110-115.
13. Wolberg J. *Data Analysis Using the Method of Least Squares: Extracting the Most Information from Experiments.* Berlin: Springer-Verlag; 2006. doi: <https://doi.org/10.1007/3-540-31720-1>.
14. Eliseev M.E., Tomchinskaya T.N., Galkina E.D., Dudakov N.Yu., Musarsky R.A. Virtual reality and navigation subsystems of the interactive system for road safety improving. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2018;386:012027. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/386/1/012027>.

***Дата поступления
в редакцию: 31.08.2025***

***Дата принятия
к публикации: 18.12.2025***

УДК 629.35

DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_95
EDN ZWEZJA

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ПОВОРОТА «БОРТОВОЙ ФРИКЦИОН» И «ЗК»

Б.В. Падалкин

ORCID: 0009-0005-2766-6966 e-mail: padalkin@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***А.А. Стадухин**

ORCID: 0000-0003-1414-3435 e-mail: ant.m9@ya.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***Д.С. Сахаров**

ORCID: 0009-0006-0495-5914 e-mail: saharow.danii@yandex.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Проведен сравнительный анализ маневренности гусеничных машин, оснащенной механизмами поворота «Бортовой фрикцион» и «ЗК» (Зайчика-Крейснера). Показано, что механизм поворота ЗК обеспечивает до 5,5 раз меньшую нагрузку на элементы управления, меньшую потребляемую мощность двигателя и меньшие потери мощности в повороте во всех исследуемых режимах. ЗК обладает большими тяговыми свойствами и более высокой маневренностью на любой передаче в сравнении с механизмом поворота «Бортовой фрикцион». Режим работы двигателя на гусеничной машине с ЗК смещается в зону с большими частотами вращения коленчатого вала и меньшими требуемыми крутящими моментами, что позволяет обеспечить лучшую маневренность в случае применения автомобильных бензиновых двигателей, развивающих большие моменты на высоких частотах вращения коленчатого вала.

Ключевые слова: гусеничная машина; маневренность; механизм поворота; бортовой фрикцион; тяговые свойства; фрикционные элементы управления.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Падалкин, Б.В. Сравнительный анализ механизмов поворота «Бортовой фрикцион» и «ЗК» / Б.В. Падалкин, А.А. Стадухин, Д.С. Сахаров // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 95-107. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_95 EDN: ZWEZJA

COMPARATIVE ANALYSIS OF «SIDE FRICTION CLUTCH» AND «ZK» STEERING MECHANISMS

B.V. Padalkin

ORCID: 0009-0005-2766-6966 e-mail: padalkin@bmstu.ru

Moscow State Technical University n.a. N.E. Bauman
*Moscow, Russia***A.A. Stadukhin**

ORCID: 0000-0003-1414-3435 e-mail: ant.m9@ya.ru

Moscow State Technical University n.a. N.E. Bauman
Moscow, Russia

D.S. SakharovORCID: **0009-0006-0495-5914** e-mail: **saharow.danii@yandex.ru**

Moscow State Technical University n.a. N.E. Bauman

Moscow, Russia

Abstract. The article provides a comparative analysis of the maneuverability of tracked vehicle equipped with the «side friction clutch» and «ZK» (Zaichik-Kreisner) steering mechanisms. Analysis of results showed that ZK steering mechanism provides up to 5.5 times less load on the control elements, less required engine power and less power loss when turning in all studied modes. ZK possesses greater traction properties and higher maneuverability on any gear in comparison with «side friction clutch» steering mechanism. The engine operating mode on a tracked vehicle with ZK shifts to a zone with higher crankshaft rotation frequencies and lower required torques, which ensures better maneuverability in the case of using automobile gasoline engines that develop high torques at high crankshaft rotation frequencies.

Key words: tracked vehicle; maneuverability; steering mechanism; side friction clutch; traction properties; friction clutch control elements.

FOR CITATION: B.V. Padalkin, A.A. Stadukhin, D.S. Sakharov. Comparative analysis of «Side friction clutch» and «ZK» steering mechanisms. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 95-107.

DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_95 EDN: ZWEZJA

Введение

Растущая потребность в гусеничных мобильных роботах, а также в легких гражданских гусеничных машинах (ГМ) заставляет искать новые пути по удешевлению их конструкции, например, использование готовых агрегатов из крупносерийного производства автомобилей. Автомобильный бензиновый двигатель внутреннего сгорания (ДВС) обладает высокой мощностью и низкой стоимостью, однако его использование для гусеничной машины затрудняется несколько неподходящими характеристиками. ДВС малолитражного автомобиля адаптирован для длительной и экономичной работы на низких частотах вращения (порядка 2000 об/мин), но в таком режиме двигатель не способен развить высокий крутящий момент и в случае внезапного увеличения сопротивления может заглохнуть. При этом гусеничная машина испытывает значительное (в 3...10 раз) [1, 2] увеличение требуемой силы тяги при каждом входе в поворот. Следовательно, использование наиболее экономичного режима работы ДВС невозможно, и приходится поднимать частоту вращения коленчатого вала до 4000 об/мин, где у большинства отечественных двигателей обеспечивается максимальный крутящий момент (рис. 1).

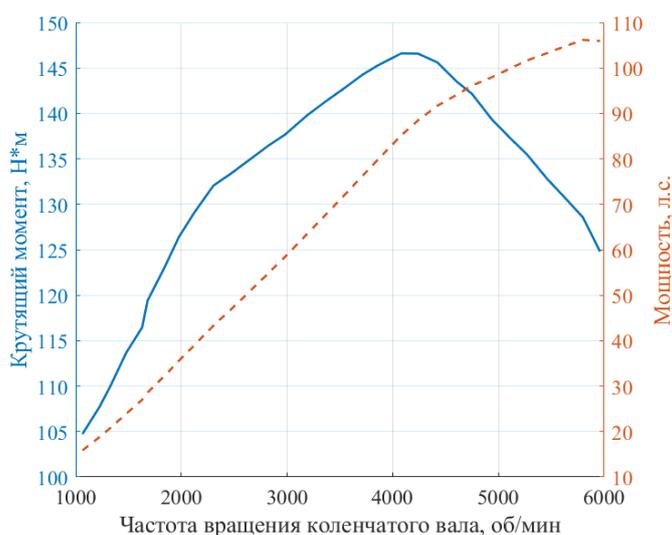


Рис. 1. Внешняя скоростная характеристика двигателя ВАЗ 21127

Fig. 1. External speed characteristics of the VAZ 21127 engine

Такое решение приводит к избыточному расходу топлива, повышенному шуму, сложности управления и невозможности двигаться с малыми скоростями. Указанные недостатки могут быть устранены путем применения в трансмиссии гусеничной машины механизма поворота, обладающего высокими тяговыми качествами в повороте. Начиная с самых первых гусеничных машин, одним из наиболее простых и наиболее часто используемых механизмов поворота (МП) является «Бортовой фрикцион» (БФ). К его недостаткам относят низкую энергоэффективность (в том числе, из-за отсутствия рекуперации мощности в повороте), высокую нагрузку на фрикционы и тормоза, а также сравнительно низкие тяговые качества в повороте [2]. Для обеспечения высоких тяговых качеств в повороте на некоторых гусеничных машинах (например, на советских тяжелых танках ИС-4 и Т-10) применялся МП ЗК (назван в честь своих разработчиков Г.И. Зайчика, М.А. Крейнеса, М.К. Кристи, являвшихся сотрудниками МВТУ им. Н.Э. Баумана). Указанный механизм обеспечивает увеличение силы тяги ГМ за счет снижения скорости перемотки отстающей и забегающей гусениц. Недостатком МП ЗК является то, что в некоторых режимах работы он может обеспечивать непредсказуемый радиус поворота (зависящий от свойств опорного основания). По этой причине механизм не получил широкого применения. Однако современные электронные регуляторы позволяют обеспечить устойчивое движение ГМ с ЗК и сделать этот механизм поворота перспективным.

В данной работе предлагается исследовать возможность применения МП ЗК для легкой гражданской гусеничной машины с автомобильным ДВС, а также сравнить этот вариант с МП БФ, который обычно применяется для такого рода техники.

Описание конструкции и расчетные зависимости для механизма поворота «Бортовой фрикцион»

МП БФ состоит из четырех элементов управления: двух тормозов Т и двух фрикционных муфт Ф (рис. 2).

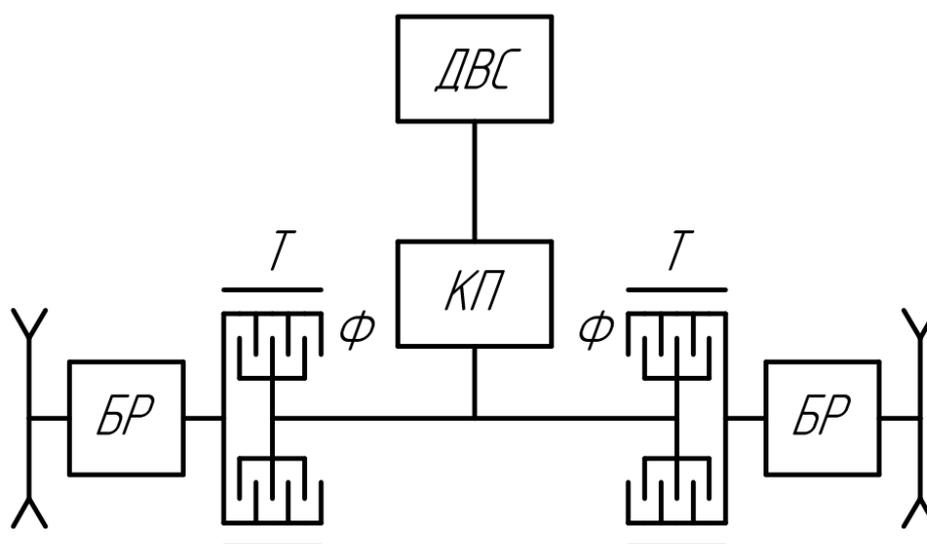


Рис. 2. Схема трансмиссии с бортовым фрикционом:

*ДВС – двигатель внутреннего сгорания; КП – коробка передач;
Ф – фрикцион; Т – тормоз; БР – бортовой редуктор*

Fig. 2. Transmission diagram with a side friction clutch:

*ДВС – internal combustion engine; КП – gearbox; Ф – friction clutch; Т – brake;
БР – side reducer*

Прямолинейное движение гусеничной машины с этим механизмом поворота устойчиво, так как при включении обоих фрикционов обеспечивается жесткая кинематическая связь ведущих колес обоих бортов. Для начала поворота выключается фрикцион отстающего борта. Забегающая гусеница остается кинематически связана с двигателем, т.е. сохраняет скорость прямолинейного движения (такие механизмы поворота относят ко второму типу [2]). Более крутые повороты достигаются путем торможения отстающей гусеницы тормозом Т. В нем утилизируется энергия, приходящая со стороны опорного основания (рис. 3), т.е. данный МП не обеспечивает рекуперацию энергии в повороте.

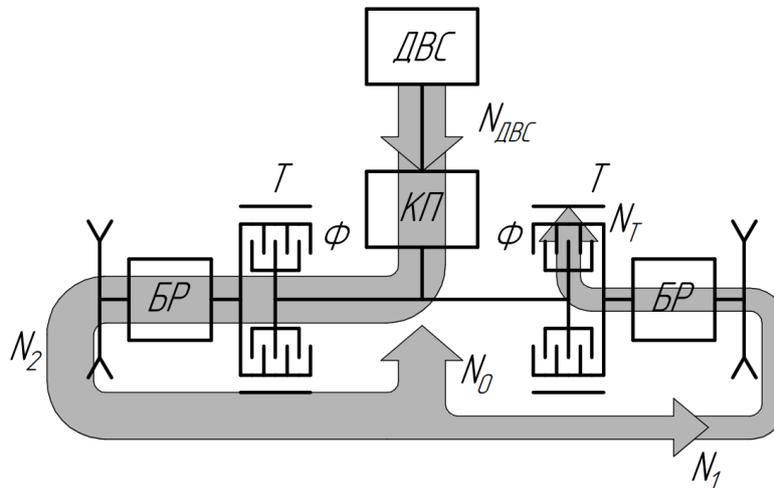


Рис. 3. Поворот гусеничной машины с механизмом поворота «Бортовой фрикцион» путем включения тормоза отстающего борта

Fig. 3. Turning a tracked vehicle with the «side friction clutch» steering mechanism by engaging the brake of the lagging side

Работа МП БФ описывается зависимостями (1-9), требуемые силы тяги на грунте определяются зависимостями (10-12).

$$M_{1МП} = \max\left(0, \frac{P_1 \cdot r_{вк}}{i_{бр}}\right), \quad (1)$$

где $M_{1МП}$ – потребный крутящий момент на выходе МП со стороны отстающего борта, Н·м;
 P_1 – потребная сила тяги на отстающем борту, Н;
 $r_{вк}$ – радиус ведущего колеса, м;
 $i_{бр}$ – передаточное отношение бортового редуктора.

$$M_{2МП} = \frac{P_2 \cdot r_{вк}}{i_{бр}}, \quad (2)$$

где $M_{2МП}$ – потребный крутящий момент на выходе МП со стороны забегающего борта, Н·м;
 P_2 – потребная сила тяги на забегающем борту (формула 11), Н.

$$M_{1фр} = M_{1МП}, \quad (3)$$

где $M_{1фр}$ – потребный крутящий момент на фрикционе отстающего борта МП.

$$M_{2фр} = M_{2МП}, \quad (4)$$

где $M_{2фр}$ – потребный крутящий момент на фрикционе забегающего борта МП.

$$M_{КП} = M_{1фр} + M_{2фр}, \quad (5)$$

где $M_{КП}$ – потребный крутящий момент от коробки передач, Н·м.

$$T_1 = \max\left(0, -\frac{P_1 \cdot r_{вк}}{i_{бр}}\right), \quad (6)$$

где T_1 – тормозной момент тормоза отстающего борта, Н·м.

$$w_{2\text{фр}} = \frac{V_c \cdot (B + 2 \cdot R_t) \cdot i_{\text{бр}}}{2 \cdot R_t \cdot r_{\text{БК}}}, \quad (7)$$

где $w_{2\text{фр}}$ – угловая скорость фрикциона забегающего борта, рад/с;

V_c – скорость центра масс ГМ, м/с;

B – ширина колеи ГМ, м;

R_t – теоретический радиус поворота ГМ, м.

Здесь и далее под радиусом поворота R_t понимается теоретический радиус поворота, т.е. радиус поворота ГМ без учета юза и буксования гусениц.

$$w_{1\text{фр}} = \frac{V_c \cdot (B - 2 \cdot R_t) \cdot i_{\text{бр}}}{2 \cdot R_t \cdot r_{\text{БК}}}, \quad (8)$$

где $w_{1\text{фр}}$ – угловая скорость фрикциона отстающего борта, рад/с.

$$w_{\text{КП}} = w_{2\text{фр}}, \quad (9)$$

где $w_{\text{КП}}$ – угловая скорость выходного вала коробки передач, рад/с.

$$P_2 = \frac{m_{\text{ГМ}} \cdot g \cdot f}{2} + \frac{\mu \cdot m_{\text{ГМ}} \cdot g \cdot L_{\text{ГМ}}}{4 \cdot B_{\text{ГМ}}}, \quad (10)$$

где $m_{\text{ГМ}}$ – масса гусеничной машины, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

f – коэффициент сопротивления прямолинейному движению;

μ – коэффициент сопротивления повороту;

$L_{\text{ГМ}}$ – длина опорной ветви гусеницы, м;

$B_{\text{ГМ}}$ – ширина колеи ГМ, м.

$$P_1 = \frac{m_{\text{ГМ}} \cdot g \cdot f}{2} - \frac{\mu \cdot m_{\text{ГМ}} \cdot g \cdot L_{\text{ГМ}}}{4 \cdot B_{\text{ГМ}}}, \quad (11)$$

$$\mu = \frac{\mu_{\text{max}}}{0,925 + 0,15 \cdot \frac{R_t}{B_{\text{ГМ}}}}, \quad (12)$$

где μ_{max} – максимальный коэффициент сопротивления повороту.

Описание конструкции и расчетные зависимости для механизма поворота ЗК

Принцип работы механизма поворота ЗК основан на свойстве планетарного ряда создавать на центральных звеньях разные по величине и направлению моменты (рис. 4). При ведущем малом центральном колесе и наличии на нем момента $M_{\text{тр}}$, подведенного от трансмиссии, на водило передается момент $M_0 = (1 + k) \cdot M_{\text{тр}}$, где k – конструктивный параметр планетарного ряда. Увеличение моментов на ведомых элементах планетарного ряда по сравнению с моментом, подведенным к ведущему элементу можно использовать для увеличения тяги гусеничной машины в повороте. Для поворота в обе стороны механизм поворота должен иметь два симметрично расположенных планетарных ряда (рис. 5). Управление поворотом осуществляется с помощью двух фрикционов Ф и двух тормозов Т.

При прямолинейном движении включены оба фрикциона, звенья планетарного ряда вращаются как одно целое. Прямолинейное движение устойчиво. Для начала поворота постепенно выключается фрикцион со стороны отстающего борта. Когда требуемая сила тяги на отстающей гусенице становится меньше нуля (т.е. отстающая гусеница перестает потреблять мощность от трансмиссии и начинает отдавать ее), начинается процесс рекуперации мощности. Он заключается в автоматической передаче части мощности со стороны гусеницы отстающего борта на гусеницу забегающего борта.

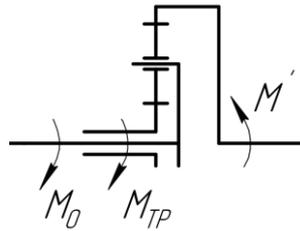


Рис. 4. Схема планетарного ряда с двумя ведомыми элементами:
 M' – крутящий момент на большом центральном колесе планетарного ряда,
 M_{mp} – крутящий момент на малом центральном колесе планетарного ряда,
 M_0 – крутящий момент на водиле планетарного ряда

Fig. 4. Diagram of a planetary gear set with two driven elements:
 M' – torque on the large central wheel of the planetary gear set, M_{mp} – torque on the small central wheel of the planetary gear set, M_0 – torque on the planetary gear set carrier

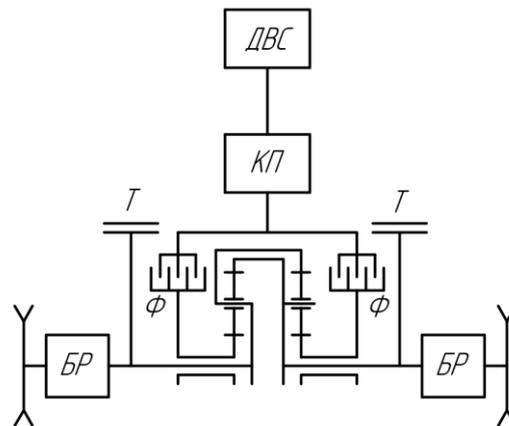


Рис. 5. Схема трансмиссии с механизмом поворота ЗК:
ДВС – двигатель внутреннего сгорания; КП – коробка передач;
Т – тормоз; Ф – фрикцион; БР – бортовой редуктор

Fig. 5. Transmission diagram with a ZK steering mechanism:
ДВС – internal combustion engine; КП – gearbox; Т – brake; Ф – friction clutch; БР – side reducer

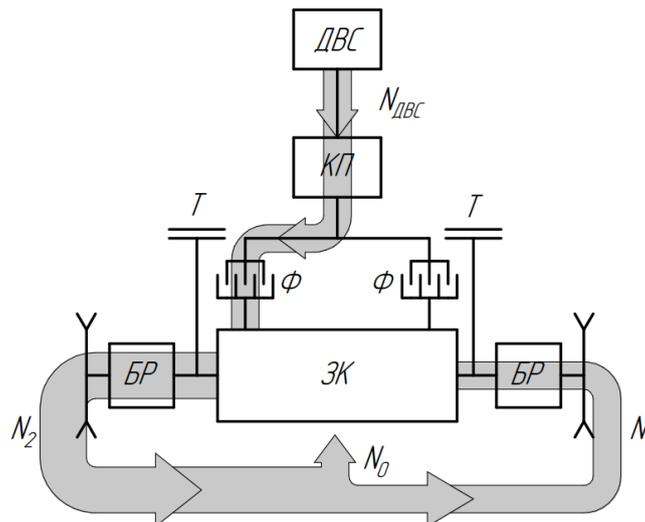


Рис. 6. Поворот гусеничной машины с механизмом поворота ЗК с полностью выключенным фрикционом

Fig. 6. Turning a tracked vehicle with a ZK steering mechanism with the friction clutch fully disengaged

При отключении фрикциона происходит полная рекуперация мощности в повороте, т.е. вся мощность отстающего борта передается на забегающий (рис. 6). В этом режиме момент, передаваемый из МП на забегающий и отстающий борт, больше, чем входящий, однако скорости вращения выходных валов меньше (такие механизмы относят к третьему типу [3]). Частичная рекуперация мощности сохраняется при постепенном включении тормоза со стороны отстающего борта для обеспечения малых радиусов поворота. Если тормоз отстающего борта включен полностью, то происходит поворот вокруг остановленного борта, причем момент на забегающем борту по-прежнему увеличен. Работа МП ЗК описывается зависимостями (13-21), требуемые силы тяги на грунте определяются зависимостями (10-12).

$$M_{1МП} = \frac{P_1 \cdot r_{BK}}{i_{6p}}, \tag{13}$$

$$M_{2МП} = \frac{P_2 \cdot r_{BK}}{i_{6p}}, \tag{14}$$

$$T_1 = \max \left(0, -\frac{M_{1МП} \cdot (1 + k) + M_{2МП} \cdot k}{k + 1} \right), \tag{15}$$

$$M_{2фр} = \frac{1 + k}{1 + 2 \cdot k} \cdot M_{2МП} + \frac{k}{1 + 2 \cdot k} \cdot (M_{1МП} + T_1), \tag{16}$$

$$M_{1фр} = \frac{1 + k}{1 + 2 \cdot k} \cdot (M_{1МП} + T_1) + \frac{k}{1 + 2 \cdot k} \cdot M_{2МП}, \tag{17}$$

$$M_{КП} = M_{1фр} + M_{2фр}, \tag{18}$$

$$w_{1фр} = (1 + k) \cdot \frac{V_c \cdot (B - 2 \cdot R_t) \cdot i_{6p}}{2 \cdot R_t \cdot r_{BK}} - k \cdot \frac{V_c \cdot (B + 2 \cdot R_t) \cdot i_{6p}}{2 \cdot R_t \cdot r_{BK}}, \tag{19}$$

$$w_{2фр} = (1 + k) \cdot \frac{V_c \cdot (B + 2 \cdot R_t) \cdot i_{6p}}{2 \cdot R_t \cdot r_{BK}} - k \cdot \frac{V_c \cdot (B - 2 \cdot R_t) \cdot i_{6p}}{2 \cdot R_t \cdot r_{BK}}, \tag{20}$$

$$w_{КП} = w_{2фр}. \tag{21}$$

Объект исследования

В качестве объекта исследования была принята гусеничная машина со следующими параметрами (табл. 1).

Таблица 1.

Основные характеристики исследуемой ГМ

Table 1.

Main characteristics of the tracked vehicle under study

Параметр	Значение	
Модель КП	ВА3 2182	
Модель ДВС	ВА3 21127	
Передаточное отношение КП $i_{кп}$	Главная пара	3,7
	Первая передача	3,636
	Вторая передача	1,95
	Третья передача	1,357
	Четвертая передача	0,941
Передаточное отношение БР i_{6p}	3,3	
Масса ГМ $m_{ГМ}$, кг	3800	
База ГМ $L_{ГМ}$, м	2,666	
Ширина колеи ГМ $B_{ГМ}$, м	1,655	
Радиус ведущего колеса ГМ r_{BK} , м	0,22	
Конструктивный параметр k (для МП ЗК)	2	

Для указанной гусеничной машины была построена тягово-скоростная характеристика (график динамического фактора, рис. 7). Машина обладает достаточными тяговыми качествами в прямолинейном движении, однако, как будет показано далее, тяговые качества в повороте могут быть неудовлетворительными.

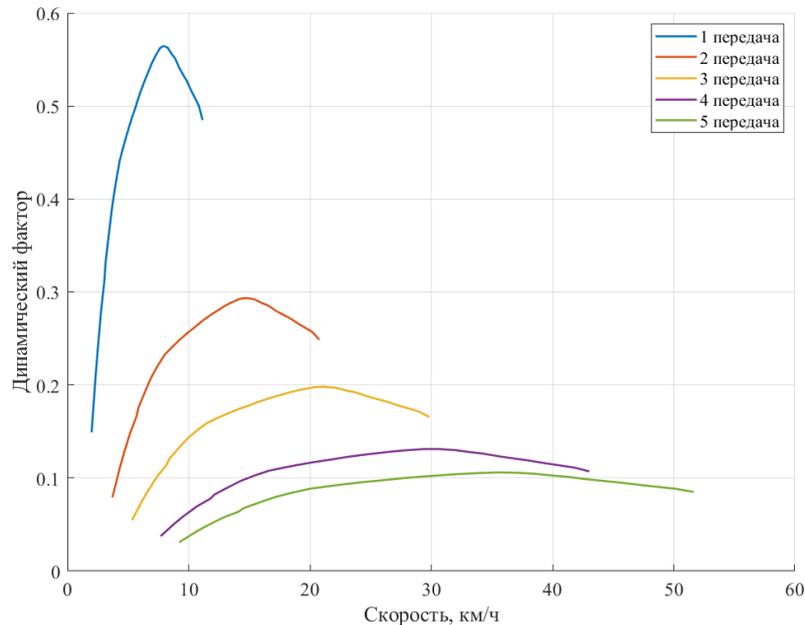


Рис. 7. Динамический фактор гусеничной машины

Fig. 7. Dynamic factor of a tracked vehicle

Для МП БФ была определена зависимость минимального реализуемого радиуса поворота от скорости ГМ (рис. 8).

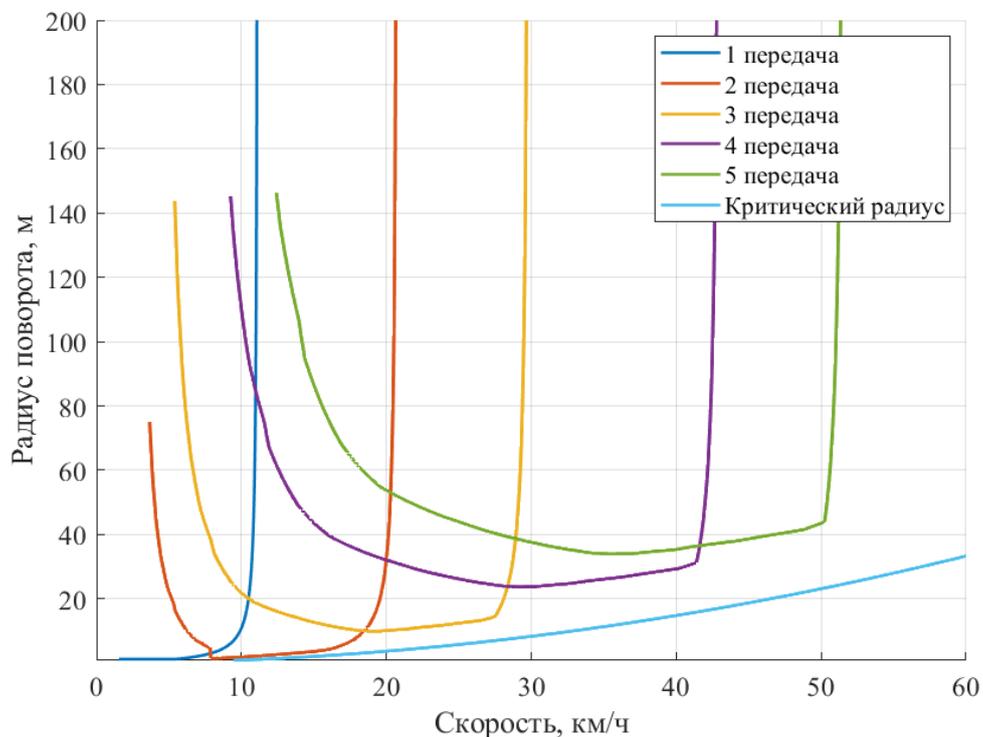


Рис. 8. Минимальный фактический радиус поворота, который способен реализовать двигатель, в зависимости от скорости центра масс для МП «Бортовой фрикцион»

Fig. 8. The minimum actual turning radius that the engine can achieve, depending on the speed of the center of mass for the «side friction clutch» steering mechanism

Зависимость была определена с применением формул (1-12) следующим образом. Задавалась скорость движения V_1 и радиус поворота R_1 при движении на каждой передаче. По приведенным зависимостям определялись угловая скорость и крутящий момент выходного вала коробки передач, требуемые для обеспечения движения. Используя передаточное отношение КП на выбранной передаче, определялась требуемая угловая скорость и момент от двигателя. Если реальный крутящий момент ДВС при потребной частоте вращения меньше требуемого момента, то ГМ не сможет повернуть на заданной скорости с заданным радиусом. В этом случае радиус поворота увеличивали на малую величину ΔR_1 и повторяли расчет. Если величина требуемого крутящего момента меньше или равна величине реализуемого двигателем крутящего момента, то это означает, что ГМ способна повернуть на заданной скорости с заданным радиусом. При таком способе расчета погрешность определения радиуса поворота будет равна ΔR_1 (для данной работы выбран $\Delta R_1 = 0,05$ м). Расчет производился для грунта с коэффициентом сопротивления прямолинейному движению $f = 0,04$ и максимальный коэффициентом сопротивления повороту $\mu_{max} = 0,85$.

На рис. 8 дополнительно показана зависимость критического радиуса от скорости. Критическим называют предельный радиус поворота, меньше которого ГМ уходит в неконтролируемый занос. Он определяется по следующей формуле (22) [4]:

$$R_{кр} = \frac{V_{кр}^2}{\mu_{max} \cdot g}, \quad (22)$$

где $R_{кр}$ – критический радиус, м;

$V_{кр}$ – критическая скорость по заносу, м/с.

Чтобы сравнивать критический радиус с минимально реализуемым радиусом поворота, необходимо перевести теоретический радиус поворота в фактический. Для этого используется формула (23) [4]:

$$R_f = 1,3 \dots 1,8 \cdot R_t, \quad (23)$$

где R_f – фактический радиус поворота, м.

В расчетах примем $R_f = 1,5 \cdot R_t$.

Анализ графика показывает, что МП «Бортовой фрикцион» способен обеспечить поворот гусеничной машины вокруг остановленного борта на первой передаче при низких скоростях движения. На второй передаче в широком диапазоне оборотов двигателя фактический радиус поворота близок к критическому. На других передачах при более высоких скоростях движения фактический радиус поворота в несколько раз больше критического. Следовательно, возможно уменьшение радиусов поворота без вхождения машины в занос. Кроме того, необходимо помнить, что на рисунке изображены радиусы поворота при работе двигателя на внешней скоростной характеристике. На практике это означает, что для достижения таких радиусов поворота при заданных скоростях движения, механику-водителю придется полностью выжимать педаль акселератора, что создает неудобства из-за невозможности тонкого контроля тяги.

Определим фактическую угловую скорость поворота вокруг остановленного борта. Для этого воспользуемся зависимостью (24), если данной скорости соответствует минимальный радиус поворота $R_f = 1,5 \cdot \frac{B}{2}$.

$$\omega_z = \frac{2 \cdot V_c}{B \cdot 1,5}, \quad (24)$$

где ω_z – фактическая угловая скорость поворота корпуса, рад/с.

На рис. 9 представлена зависимость фактической угловой скорости корпуса от угловой скорости вращения коленчатого вала при фактическом радиусе поворота $R_f = 1,5 \cdot \frac{B}{2}$ для механизма поворота «Бортовой фрикцион». Поворот осуществим только на первой передаче. Однако угловая скорость поворота довольно высока: 1,24 рад/с; полный разворот на 360 ° ГМ совершит примерно за 5 сек.

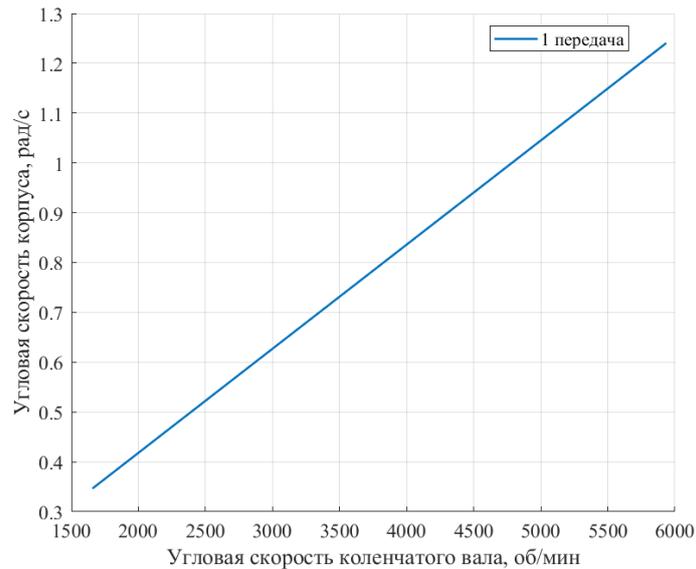


Рис. 9. Зависимость угловой скорости корпуса от угловой скорости коленчатого вала при радиусе поворота $R = B/2$ для механизма поворота «Бортовой фрикцион»

Fig. 9. Dependence of the angular velocity of the frame on the angular velocity of the crankshaft at a turning radius of $R = B/2$ for the «side friction clutch» steering mechanism

Аналогично рис. 8 и 9 были получены зависимости для МП ЗК (рис. 10, 11).

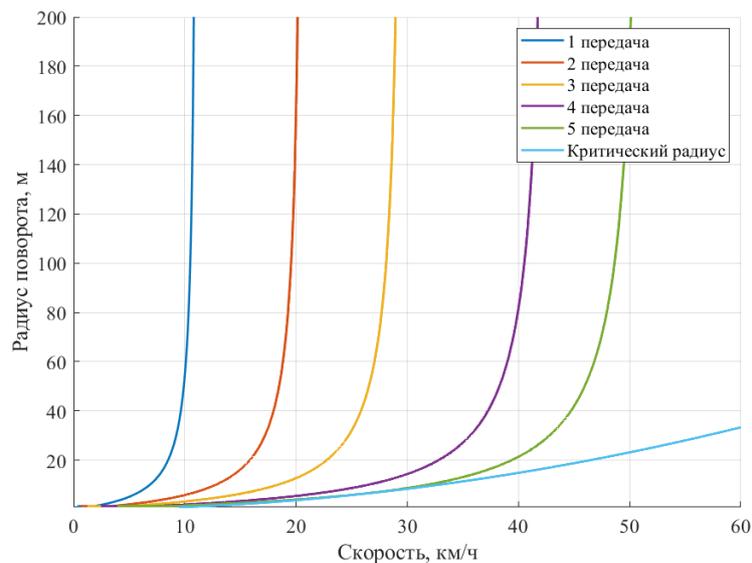


Рис. 10. Минимальный фактический радиус поворота, способный реализовать двигатель, в зависимости от скорости центра масс для механизма поворота ЗК

Fig. 10. Minimum actual turning radius that the engine can achieve, depending on the speed of the center of mass for the ZK steering mechanism

Из графика на рис. 10 видно, что ГМ с МП ЗК способна поворачивать вокруг остановленного борта на любой скорости. Кроме того, в большом диапазоне скоростей МП способен реализовать радиус поворота, близкий к критическому. Это говорит о том, что данный МП достаточно полно исчерпывает несущие возможности грунта, позволяя ГМ двигаться с радиусами, близкими к заносным. Следовательно, чтобы добиться таких же радиусов поворота, как, например, у МП БФ, нет необходимости полностью выжимать педаль акселератора, и появляется возможность более тонкого регулирования тяги по сравнению с МП БФ.

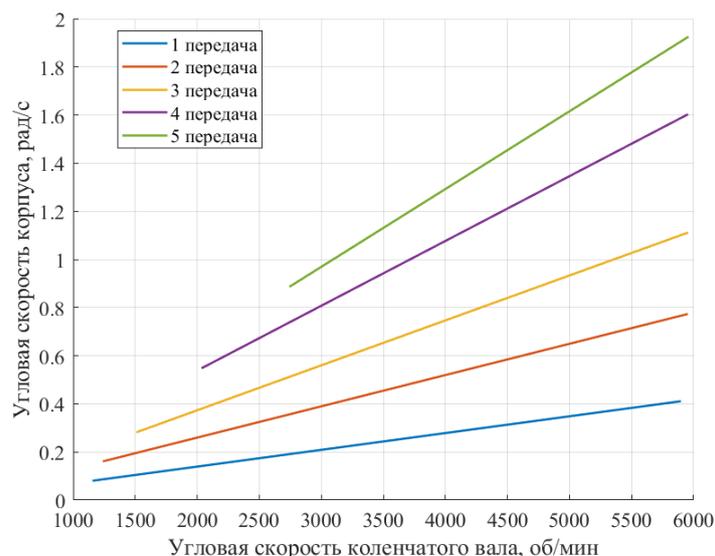


Рис. 11. Зависимость угловой скорости корпуса от угловой скорости коленчатого вала при радиусе поворота $R = B/2$ для механизма поворота ЗК

Fig. 11. Dependence of the angular velocity of the frame on the angular velocity of the crankshaft at a turning radius of $R = B/2$ for the ZK steering mechanism

Анализ зависимости на рис. 11 показывает, что угловая скорость поворота на первой передаче низкая. На второй передаче она приобретает приемлемые значения, на третьей – меньше, но сопоставима с угловой скоростью поворота на МП БФ. На более высоких передачах угловая скорость поворота избыточна для задачи разворота с минимальным радиусом. Результаты показывают, что механизм поворота ЗК обладает более высокими тяговыми характеристиками при повороте, что позволяет выполнять поворот вокруг остановленного на любой передаче. Для наглядного сравнения двух МП в табл. 2 приведен потребный крутящий момент на элементах управления, найденных по зависимостям (3,4,6,15-17) при различных радиусах поворота. Фрикционы МП БФ воспринимают крутящий момент до 3 раз больший, чем крутящий момент на фрикционах МП ЗК при аналогичном радиусе поворота. Тормоза, в свою очередь, у МП БФ воспринимают крутящий момент до 5,5 раз больший, чем крутящий момент на тормозах МП ЗК при аналогичном радиусе поворота.

Таблица 2. Требуемый крутящий момент на элементах управления механизмов поворота

Table 2. Required torque on the control elements of the steering mechanism

R , м	Механизм поворота	T_1 , Н·м	$M_{1фр}$, Н·м	$M_{2фр}$, Н·м
100	БФ	0	1,8	172,2
	ЗК	0	69,9	104
97,7* (БФ)	БФ	0	0	174
	ЗК	0	69,6	104,4
11,3** (ЗК)	БФ	348	0	521,9
	ЗК	0	0	174
5	БФ	530,3	0	704,3
	ЗК	60,8	0	234,8
0,83 (B/2)	БФ	763,7	0	937,7
	ЗК	138,6	0	312,6

* – свободный радиус для МП БФ; ** – радиус поворота, при котором в МП ЗК отсутствует буксование элементов управления и заблокирован фрикцион забегавшего борта

Дополнительно предлагается исследовать маневр входа в поворот ГМ. Он начинается с прямолинейного движения на скорости 20 км/ч с последующим плавным входом в поворот радиусом 4 м при сохранении скорости движения. При этом определяется мощность, реализуемая на грунте, а также мощности, потребные для МП БФ и МП ЗК (рис. 12). Скоростная характеристика свободной мощности двигателя ВАЗ 21127 взята из открытых источников и дана для сравнения [5]. Мощность, реализуемая на грунте, вычисляется по зависимости (25). Мощность, потребная для механизма поворота, вычисляется по зависимости (26).

$$N_{\text{гр}} = P_1 \cdot \frac{V_c \cdot (B - 2 \cdot R_t)}{2 \cdot R_t} + P_2 \cdot \frac{V_c \cdot (B + 2 \cdot R_t)}{2 \cdot R_t}, \quad (25)$$

где $N_{\text{гр}}$ – мощность, реализуемая на грунте, Вт.

$$N_{\text{МП}} = M_{\text{КП}} \cdot \omega_{\text{КП}}, \quad (26)$$

где $N_{\text{МП}}$ – мощность, потребная механизму поворота, Вт.

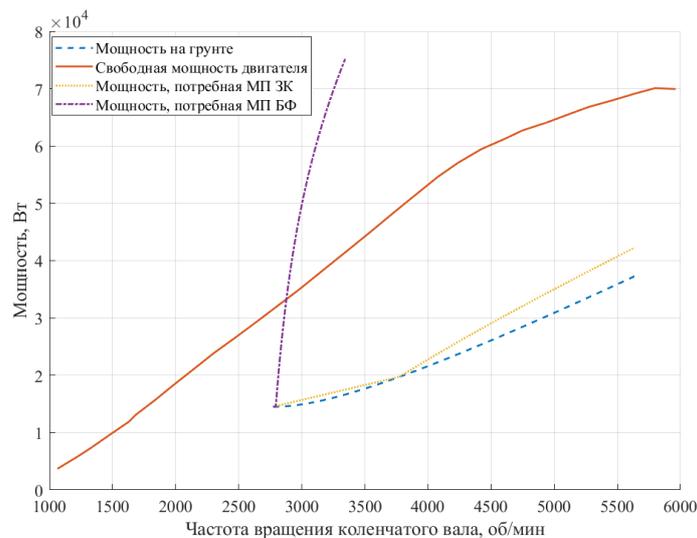


Рис. 12. Мощности, требуемые при повороте

Fig. 12. Power required when turning

МП БФ не способен завершить исследованный маневр из-за недостаточной мощности двигателя (и больших потерь мощности в тормозе) (рис. 12). Напротив, МП ЗК позволяет выполнить маневр с имеющимся двигателем, обеспечивая малые потери мощности в управляющих элементах. Рис. 13 также подтверждает, что МП ЗК обладает высокими тяговыми качествами в повороте, что позволяет иметь хороший запас динамики при маневрировании.

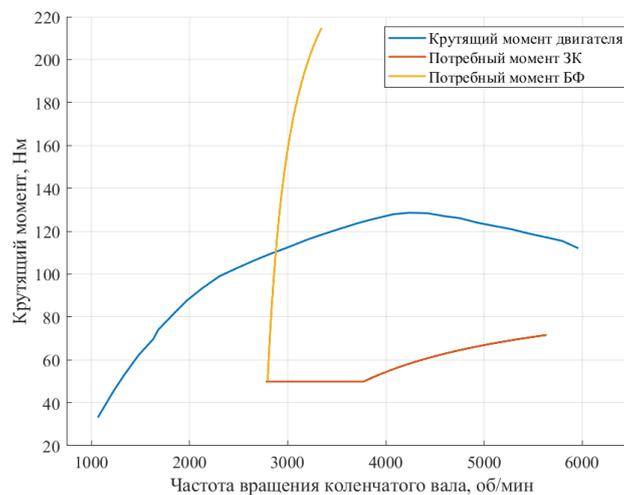


Рис. 13. Моменты, требуемые при повороте

Fig. 13. Torques required when turning

Выводы

Исследованы перспективы использования классического механизма поворота ЗК для легких гусеничных машин, оснащенных дешевыми бензиновыми автомобильными двигателями. В сравнении с механизмом поворота «бортовой фрикцион» МП ЗК дает до 5,5 раз меньшую нагрузку на элементы управления, показывает лучшие тяговые качества и меньшие потери мощности в повороте во всех исследованных режимах. Режим работы двигателя на гусеничной машине с ЗК смещается в зону с большими частотами вращения коленчатого вала и меньшими требуемыми крутящими моментами, что позволяет обеспечить лучшую маневренность в случае применения автомобильных бензиновых двигателей (развивающих большие моменты на высоких частотах вращения коленчатого вала).

Недостатком ЗК, помимо сложной конструкции из двух планетарных рядов, является то, что на первой он не обеспечивает приемлемую скорость разворота. Специфический режим работы ЗК, при котором нет буксования фрикционов и тормозов, но имеется две степени свободы, может затруднять управление ГМ. Кроме того, высокие тяговые свойства МП ЗК делают возможным движение на скоростях, близких к заносным. Оба этих обстоятельства могут потребовать применение электронной системы управления, разработка которой является дальнейшим направлением исследований.

Библиографический список

1. **Антонов, А.С.** Гусеничные тягачи. Часть первая. Теория. М.: Военное издательство Министерства обороны Союза ССР. 1959. – 356 с.
2. **Буров, С.С.** Конструкция и расчёт танков. Москва: Типолитография Военной ордена Ленина Красноказарменной академии бронетанковых войск. 1973. – 599 с.
3. **Чобиток, В.А.** Конструкция и расчет танков и БМП: учебник. – Москва: Воениздат, 1984. – 376 с.
4. **Чобиток, В.А.** Теория движения танков и БМП. М.: Воениздат, 1984. – 264 с.
5. Анализ ВСХ ВАЗ-21127 для МКПП Лада Гранта // DRIVE2.RU URL: <https://www.drive2.ru/l/584913798771543657/?ysclid=mig1b2yaen403481227> (дата обращения: 26.11.2025).

References

1. Antonov A.S. Gusenichnye tyagachi. Chast' pervaya. Teoriya [Crawler tractors. Part one. Theory]. Moscow: Voennoe izdatel'stvo Ministerstva oborony Soyuza SSR; 1959. 356 p. (In Russian).
2. Burov S.S. Konstruktsiya i raschet tankov [Design and calculation of tanks]. Moscow: Tipolitografiya Voennoy ordena Lenina Krasnokazarmennoy akademii bronetankovykh voysk; 1973. 599 p. (In Russian).
3. Chobitok V.A. Konstruktsiya i raschet tankov i BMP [Design and calculation of tanks and infantry fighting vehicles]. Moscow: Voenizdat; 1984. 376 p. (In Russian).
4. Chobitok V.A. Teoriya dvizheniya tankov i BMP [Theory of motion of tanks and infantry fighting vehicles]. Moscow: Voenizdat; 1984. 264 p. (In Russian).
5. Analiz VSKh VAZ-21127 dlya MKPP Lada Granta [Analysis of the WOT characteristic of the VAZ-21127 engine for the Lada Granta manual transmission]. DRIVE2.RU. Available from: <https://www.drive2.ru/l/584913798771543657/?ysclid=mig1b2yaen403481227> [accessed 2025 Nov 26] (in Russian).

*Дата поступления
в редакцию: 19.12.2025*

*Дата принятия
к публикации: 26.02.2026*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ МАШИНЫ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ПОДХОДА

И.А. Трусевич

ORCID: 0000-0002-6092-8762 e-mail: trilal@bk.ru

АО «Специальное конструкторское бюро машиностроения»

Курган, Россия

Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН

Екатеринбург, Россия

С.В. Абдулов

ORCID: 0009-0003-1769-4520 e-mail: sincopa2004@mail.ru

АО «Специальное конструкторское бюро машиностроения»

Курган, Россия

И.А. Тараторкин

ORCID: 0000-0003-3836-6238 e-mail: ig_tar@mail.ru

Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН

Екатеринбург, Россия

В.Б. Держанский

ORCID: 0000-0003-1043-8340 e-mail: dvb_47@mail.ru

Институт машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН

Екатеринбург, Россия

Решается задача совершенствования конструкции системы кондиционирования перспективной транспортной машины. Серия расчетов проведена в программном пакете для инженерной симуляции на основе методов мультифизического моделирования STAR-CCM+. Определены основные подходы по разработке систем кондиционирования, в том числе, на ранних этапах проектирования и с применением методов численного моделирования. Выявлено несовершенство существующей методики проведения экспериментального исследования, в методику испытаний существующих и перспективных систем кондиционирования предложены изменения, обеспечивающие упрощение проведения и повышение точности получаемого результата.

По результатам серии симуляционных расчетов определены диаметры отверстий для получения равномерного распределения расхода воздуха через каждый патрубок, отклонение составляет не более 5 % от среднего, обеспечивающие, удовлетворяющие требованиям, значения скорости потока воздуха в зоне дыхания водителя и пассажиров при открытых и закрытых заслонках. Проведена экспериментальная оценка усовершенствованной системы кондиционирования, подтвердившая результаты моделирования.

Ключевые слова: кондиционирование; система: распределение воздуха; зона дыхания; кабина; транспортная машина; симуляция; CFD; анализ; верификация; экспериментальное исследование; прогнозирование; оценка; климат; комфорт.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Трусевич, И.А. Совершенствование конструкции системы кондиционирования перспективной транспортной машины на основе расчетно-экспериментального подхода / И.А. Трусевич, С.В. Абдулов, И.А. Тараторкин, В.Б. Держанский // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 108-123. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_108. EDN: YAUXVT

IMPROVING DESIGN OF AIR CONDITIONING SYSTEM OF PROMISING TRANSPORT VEHICLE BASED ON CALCULATION AND EXPERIMENTAL APPROACH

I.A. Trusevich

ORCID: **0000-0002-6092-8762** e-mail: **trilal@bk.ru**

Joint-stock Company «Special design Bureau of machine building»

Kurgan, Russia

Institute of Engineering Science Ural Branch RAS

Yekaterinburg, Russia

S.V. Abdulov

ORCID: **0009-0003-1769-4520** e-mail: **sincopa2004@mail.ru**

Joint-stock Company «Special design Bureau of machine building»

Kurgan, Russia

I.A. Taratorkin

ORCID: **0000-0003-3836-6238** e-mail: **ig_tar@mail.ru**

Institute of Engineering Science Ural Branch RAS

Yekaterinburg, Russia

V.B. Derzhansky

ORCID: **0000-0003-1043-8340** e-mail: **dvb_47@mail.ru**

Institute of Engineering Science Ural Branch RAS

Yekaterinburg, Russia

Abstract. The article addresses the problem of improving the design of the air conditioning system of a promising transport vehicle. A series of simulation calculations are performed in the STAR-CCM+ software package for engineering simulation based on multiphysics modeling methods. The main approaches to the development of air conditioning systems are defined, including at the early stages of design and using numerical modeling methods. The existing methodology for conducting experimental research is imperfect, therefore, changes to the testing process of existing and prospective air conditioning systems are proposed, ensuring simplification of the procedure and increasing the accuracy of the obtained results.

Based on the results of a series of simulation calculations, the diameters of the holes were determined to obtain a uniform distribution of air flow through each branch pipe. The deviation is no more than 5% of the average. The calculated values provide air flow velocities in the breathing zone of the driver and passengers with the flaps open and closed that meet the requirements. An experimental assessment of the improved air conditioning system was carried out, confirming the results of the simulation.

Key words: air conditioning; system; air distribution; breathing area; cabin, transport vehicle; simulation; CFD; analysis; verification; experimental study; prediction; estimation; climate; comfort.

FOR CITATION: I.A. Trusevich, S.V. Abdulov, I.A. Taratorkin, V.B. Derzhansky. Improving design of air conditioning system of promising transport vehicle based on calculation and experimental approach. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 108-123. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_108. EDN: YAUXVT

Введение

Важным направлением текущих и перспективных исследований в области машиностроения является не только улучшение эксплуатационных характеристик транспортных машин, но и повышение уровня комфорта для водителя и пассажиров. При этом, помимо работ, посвященных снижению уровня шума и вибрации [1-3], важным направлением является обеспечение нормальной вентиляции, отопления и кондиционирования салона. Это достигается не только за счет разработки и внедрения более эффективных блоков обработки воздуха, но и совершенствования трасс систем забора и распределения. Кабины транспортных

машин, как правило, имеют ограниченные размеры, обеспечивающие сравнительно малый внутренний объем для водителя и пассажиров [4]. При отсутствии или недостаточности вентиляции, внутри быстро накапливаются двуокись углерода и вредные вещества, повышаются влажность и температура, которая, также, увеличивается и под воздействием солнечной радиации, нагрева двигателя, трансмиссии и других агрегатов [5-7]. Данные факторы, как по отдельности, так и в совокупности, могут привести к проявлению целого ряда нежелательных симптомов у находящихся в кабине людей – возникновению головной боли, раздражению слизистых оболочек, уменьшению внимания, точности и скорости реакции, повышению утомляемости. Все это, в свою очередь, приводит к снижению работоспособности лица, управляющего машиной, и, как следствие, увеличению вероятности возникновения аварийных ситуаций. С целью их предотвращения в реальных условиях вводятся дополнительные перерывы для водителя, что, в свою очередь, снижает общую эффективность эксплуатации транспортного средства.

Системы кондиционирования, обеспечивающие охлаждение, обогрев и вентиляцию салона, широко распространены в авиационной, автомобильной, железнодорожной и морской технике. Много работ посвящено рассмотрению существующих способов и подходов [8-10], применению различных компоновочных и конструктивных решений [11-12], разработке алгоритмов и систем управления [13-15], диагностике и анализу работоспособности [16-17], оценке непосредственного теплового состояния на основе моделирования теплопереноса [18], прочностному анализу элементов [19]. Существенное количество поздних исследований направлены на разработку и совершенствование систем кондиционирования электрических автомобилей [20-23]. Главный акцент в них, как правило, делается на повышение общей энергоэффективности агрегатов, но рассматривается полный спектр вопросов, актуальных и для обычных транспортных средств: проектирование и оптимизация систем кондиционирования [24-28], стратегия эксплуатации и исследование эффективности [29-32], внедрение интегрированных систем терморегулирования [33-35], экспериментальная проверка и доводка новых разработок [36-38], проектирование и оптимизация ключевых компонентов [39-40], повышение эффективности теплопередачи теплообменников [41-42], разработка систем управления [43-45], оценка тепловой обстановки в салоне и характеристик в течение жизненного цикла [46-49].

Целью данной работы является разработка модели для прогнозирования и совершенствования функционирования системы кондиционирования кабины перспективной транспортной машины.

Задачами исследования являются:

- экспериментальное определение величин скоростей потока воздуха в зоне дыхания водителя и пассажиров и на выходе из патрубков системы распределения для открытого и закрытого положения заслонки дефлектора в условиях объекта;
- разработка симуляционной модели системы кондиционирования и ее верификация на основе сопоставления расчетных и экспериментальных данных;
- предложение комплекса мер по совершенствованию рассматриваемой системы.

Условия моделирования

Согласно стандарту на системы обеспечения микроклимата для автомобильных транспортных средств, подвижность воздуха в зоне дыхания не должна превышать 1,0 м/с. Второе требование к системе кондиционирования, определяющее необходимость обеспечения равномерного расхода воздуха по патрубкам и реализуемое в ходе данной работы, обусловлено первым и рациональным подходом к общим вопросам конструирования. Расчетное исследование осуществлялось в многофункциональном программном продукте для мультифизического моделирования STAR-CCM+. Трасса смоделирована в соответствии с конструкторской документацией, без учета допусков и отклонений. На рис. 1 представлена принципиальная расчетная модель рассматриваемой конструкции.

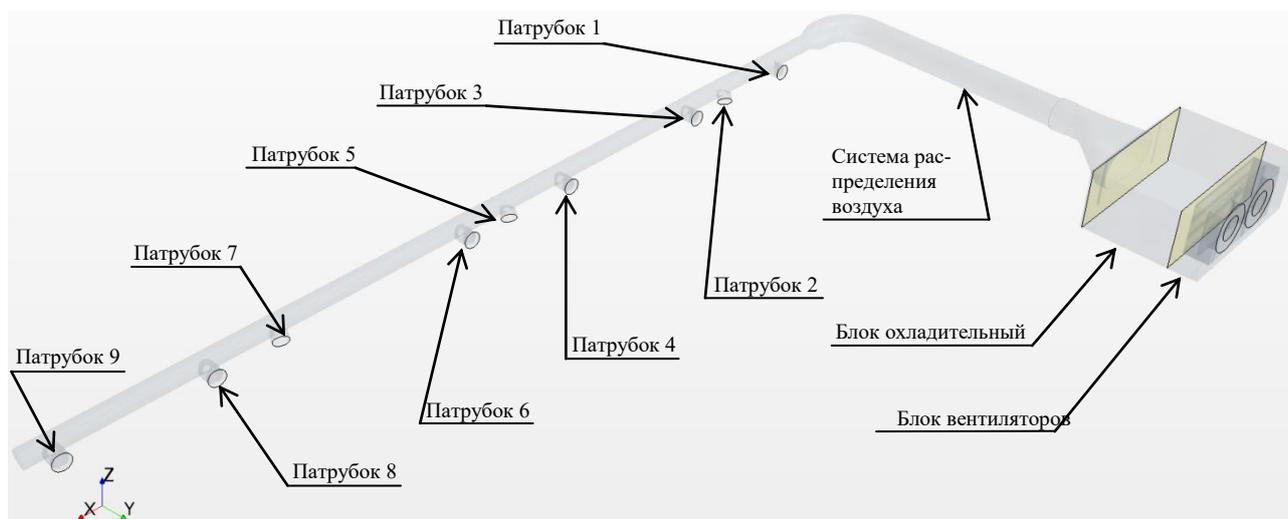


Рис. 1. Принципиальная расчетная модель системы кондиционирования

Fig. 1 The basic calculation model of the air conditioning system

Основные симуляционные расчеты проводились для воздуха с динамическим коэффициентом вязкости ($\mu = 1,85508 \cdot 10^{-5}$ Па·с) и плотностью ($\rho = 1,18415$ кг/м³), соответствующими температуре 297° К. Расчетная область была разбита на многогранные элементы с применением призматического слоя, базовый размер 20 мм, относительный минимум размера – 20 %, число призматических слоев – 3, а общее число ячеек ≈ 500 тыс. Выбор типа и параметров сетки обусловлен серией предварительных сравнительных расчетов для обеспечения необходимой сходимости и минимизации требуемого расчетного времени. Исходное качество сетки определялось по минимуму качества грани (0,51), минимальному качеству ячейки (1,0E-8), минимальному изменению объема (1,0E-10), минимуму смежных ячеек (1), минимальной площади присоединенной грани (0,0 м²) и минимуму объема (0,0 м³) и подтвердило удовлетворительные показатели – несоответствующих требованиям ячеек не найдено.

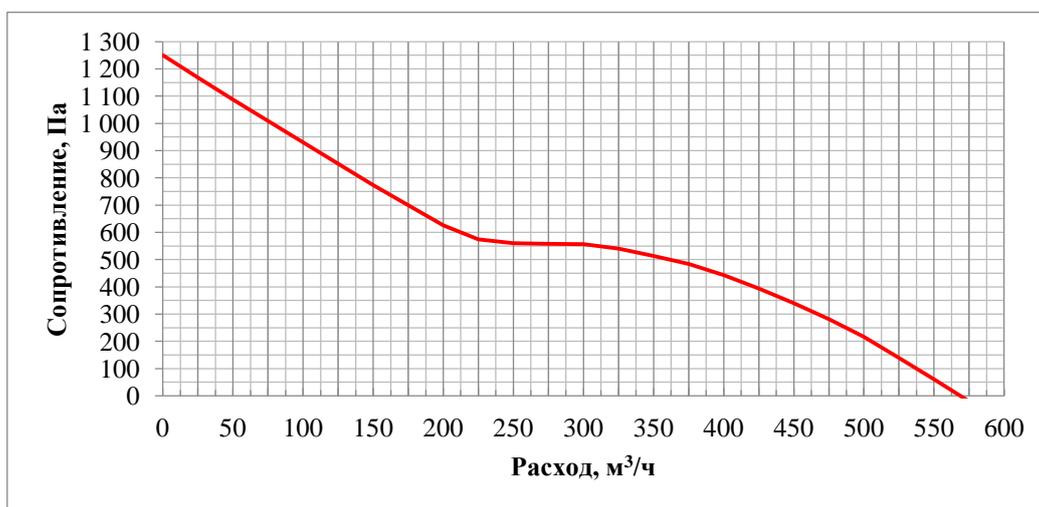


Рис. 2. Характеристика вентилятора 4114N/2H8P

Fig. 2. 4114N/2H8P fan specifications

Для моделирования использовались стационарный режим и решатель разделенного потока, сжимаемость среды не учитывалась. В качестве метода определения связи *давление – скорость* был выбран алгоритм SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Турбулентность потока описывалась моделью *k-ε*. Используемые типы границ – массовый расход на входе, стенка, внутренний интерфейс, плоскость симметрии, давление на выходе.

Инициализация решения выполнялась встроенным инструментом используемого программного продукта. В качестве граничных условий заданы давление на выходе, соответствующее атмосферному (101325 Па) и расход на входе, определяемый по характеристике вентилятора 4114N/2H8P (рис. 2) в зависимости от сопротивления трассы.

Анализ сходимости, выполнявшийся как посредством встроенных инструментов используемого программного продукта, так и путем оценки изменения величин давлений и массовых расходов, показал достаточную степень достоверности и стабильности. Невязки по итерациям менее 0,01. Полноценное моделирование сложной внутренней конфигурации охладительного блока было заменено пористым представлением данной части расчетной области, связанной с другими внутренними интерфейсами. На основании экспериментально определенных показателей подбирались величины компонентов тензоров главных напряжений вязкого и инерционного сопротивления пористости, обеспечивающие достоверность симуляции во всем рассматриваемом диапазоне. Ранее выполнялось аналогичное исследование для прорабатываемого варианта системы распределения воздуха с меньшим количеством и иным расположением патрубков, однако последовавшие изменения конструкции оказали значимое влияние на ключевые рассматриваемые показатели. Моделирование текущей конструкции выявило существенные различия расхода воздуха через каждый патрубок.

Экспериментальное исследование и верификация модели

Экспериментальное исследование по замеру скорости потока воздуха из труб системы кондиционирования проводилось в составе изделия – перспективной транспортной машины. Для определения величин скорости потока воздуха в зоне дыхания и на выходе из патрубков раздачи использовался анемометр *Testo 417-2*. Замеры проводились в зоне дыхания водителя и пассажиров – на расстоянии 300 мм от подголовника и на высоте 700 мм от подушки сидения, в соответствии с антропометрическими данными, используемыми для технического проектирования. Скорость потока воздуха измерялась для двух случаев – заслонки дефлекторов открыты (положение параллельно потоку) и закрыты (положение перпендикулярно потоку). Помимо этого, в ходе эксперимента были выполнены замеры объемного расхода воздуха после охладительного блока – перед входом в трассу раздачи воздуха, которая была демонтирована. Это позволило учесть сопротивление охладительного блока без непосредственного моделирования сложной внутренней конструкции, как уже было описано выше.

В табл. 1 приведены величины скорости воздуха на выходе из дефлекторов раздачи воздуха, полученные экспериментальным и расчетным путем, а также их расхождение в %, для трех режимов работы кондиционера по расходу воздуха.

Таблица 1.
Сравнение скорости потока воздуха на выходе из дефлекторов раздачи воздуха

Table 1.
Comparison of air flow velocity at the outlet of air distribution deflectors

Наименование	Патрубок								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 режим									
Экспериментальное значение, м/с	1,08	0,98	1,41	0,94	1,88	1,57	1,58	2,98	1,65
Расчетное значение, м/с	1,17	0,97	1,23	0,94	1,86	1,50	2,57	2,87	1,60
Расхождение, %	-8,05	1,01	12,83	0,25	1,21	4,23	-62,94	3,75	3,16
2 режим									
Экспериментальное значение, м/с	1,56	1,40	1,62	1,95	1,29	2,68	2,15	4,14	2,38
Расчетное значение, м/с	1,46	1,40	1,54	1,73	1,04	2,39	3,43	3,75	2,10
Расхождение, %	6,15	-0,34	4,74	11,10	19,05	10,64	-59,58	9,34	11,94
3 режим									
Экспериментальное значение, м/с	2,32	1,92	2,46	1,90	4,92	3,36	3,07	5,81	3,37
Расчетное значение, м/с	2,38	1,92	2,54	1,90	3,96	3,24	5,67	3,58	3,08
Расхождение, %	-2,51	0,21	-3,21	0,25	19,54	3,62	-84,56	21,23	8,52

Сходимость результатов расчетного и экспериментального исследования по большинству патрубков на всех режимах работы свидетельствует о удовлетворительной степени достоверности разработанной модели. Наличие отдельных выбросов объясняется, в первую очередь, несовершенством существующей методики проведения экспериментального исследования – испытатель располагался в кабине и поочередно проводил замеры у каждого патрубка, держа анемометр в руках. При таком подходе удобство расположения каждого патрубка оказывает влияние на получаемый результат. Это подтверждают существенные различия, обнаруженные для патрубка 7 на всех режимах и для патрубка 5 на режимах 2 и 3. Они, как и патрубок 2, были внесены в конструкцию позже и не учитывались при установке деталей и изделий внутри кабины, поэтому доступ к ним затруднен, что осложняет и корректное проведение замеров. Рекомендовано в дальнейшем при проведении испытаний и экспериментальных исследований применять специализированный штатив или проверять функционирование системы в стендовых условиях.

В табл. 2 приведены величины скорости воздуха в зоне дыхания водителя и пассажиров, полученные экспериментальным и расчетным путем, а также их расхождение в %, для трех режимов работы кондиционера по расходу воздуха. Наблюдается высокая сходимость величин скорости потока воздуха в зоне дыхания водителя при открытых заслонках и приемлемые расхождения исследуемого показателя при открытых заслонках для пассажира в центре. Кратная разница скоростей потока воздуха в зоне дыхания пассажира справа при открытых заслонках на режимах 2 и 3 может быть объяснена только значительным смещением области измерения, при проведении экспериментального исследования, от потоков, формируемого патрубками 1 и 3.

Таблица 2.
Сравнение скорости потока воздуха в зоне дыхания

Table 2.
Comparison of air flow velocity in the breathing zone

Наименование	Водитель		Пассажир в центре		Пассажир справа	
	Заслонки открыты	Заслонки закрыты	Заслонки открыты	Заслонки закрыты	Заслонки открыты	Заслонки закрыты
1 режим						
Экспериментальное значение, м/с	0,26	0,0	0,71	0,50	0,28	0,65
Расчетное значение, м/с	0,27	0,17	0,54	0,21	0,27	0,14
Расхождение, %	-3,85		23,94	58,00	3,57	78,46
2 режим						
Экспериментальное значение, м/с	0,45	0,0	0,90	0,34	0,15	0,67
Расчетное значение, м/с	0,48	0,35	1,03	0,33	0,89	0,21
Расхождение, %	-6,67		-14,44	2,94	-493,33	68,66
3 режим						
Экспериментальное значение, м/с	0,82	0,0	1,10	0,8	0,16	0,85
Расчетное значение, м/с	0,83	0,58	1,26	0,44	1,58	0,32
Расхождение, %	-1,22		-14,55	-81,82	-887,5	62,35

В целом показатели, полученные расчетным путем, выглядят более логичными и закономерными, а существенные расхождения экспериментальных величин, в том числе и между собой, объясняются ошибками при проведении и несовершенством постановки испытаний. Большие расхождения, полученные для водителя и пассажиров при закрытых дефлекторах, помимо написанного выше, могут объясняться допусками и погрешностями при изготовлении, влияние которых существенно возрастает при значительном уменьшении сечения.

Результаты моделирования

После проведения верификации для обеспечения равномерного распределения воздуха были внесены изменения в конструкцию – итерационно подобраны внутренние диаметры патрубков. Сравнительные результаты моделирования базовой и доработанной конструкции приведены в табл. 3. Дальнейшее уменьшение отклонений расхода по каждому из патрубков можно достичь за счет перехода на дробные диаметры, либо внесения существенных изменений в текущую конструкцию узла, что повлечет за собой усложнение производственных процессов при незначительном улучшении исследуемых показателей.

Таблица 3.
Результаты расчета
Table 3.
Calculation results

Наименование	Патрубок								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Базовая конструкция									
Диаметр отверстия, мм	35	35	29	24	35	24	35	20	20
Расход, м ³ /ч	4,99	6,54	7,63	7,45	24,08	21,13	54,68	25,95	27,53
Отклонение, %	-75,05	-67,29	-61,84	-62,75	20,42	5,70	173,39	29,76	37,66
Доработанная конструкция									
Диаметр отверстия, мм	35	25	21	20	19	18	18	17	17
Расход, м ³ /ч	18,66	19,85	18,50	19,36	18,70	18,89	19,17	18,97	20,07
Отклонение, %	-2,46	3,77	-3,27	1,22	-2,25	-1,25	0,19	-0,83	4,89

Для определения величин скорости потока воздуха в зоне дыхания в расчетной модели учитывался внутренний объем кабины. Искомые показатели определялись путем осреднения по поверхности поля скоростей в характерных областях диаметром 100 мм, в соответствии с методикой и условиями проведения экспериментального исследования. Верифицированная модель системы кондиционирования позволила предсказать величины скорости потока воздуха в зоне дыхания. На рис. 3-5 показаны поля скоростей в зоне дыхания водителя и пассажиров, где закрашенная фиолетовым цветом окружность – область измерения.

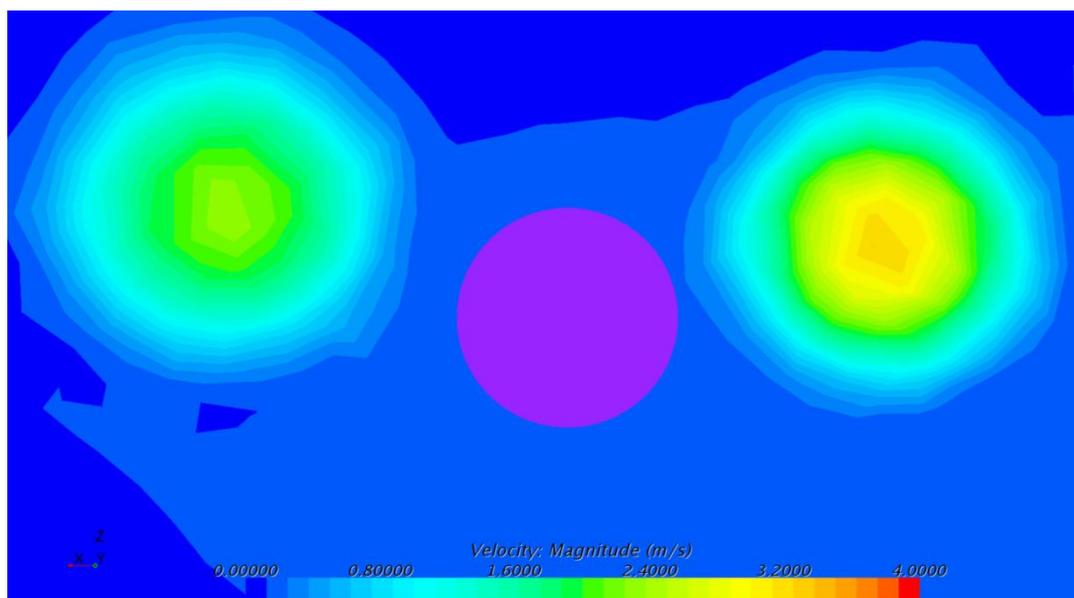


Рис. 3. Поле скоростей в зоне дыхания водителя
Fig. 3. Velocity field in the driver's breathing zone

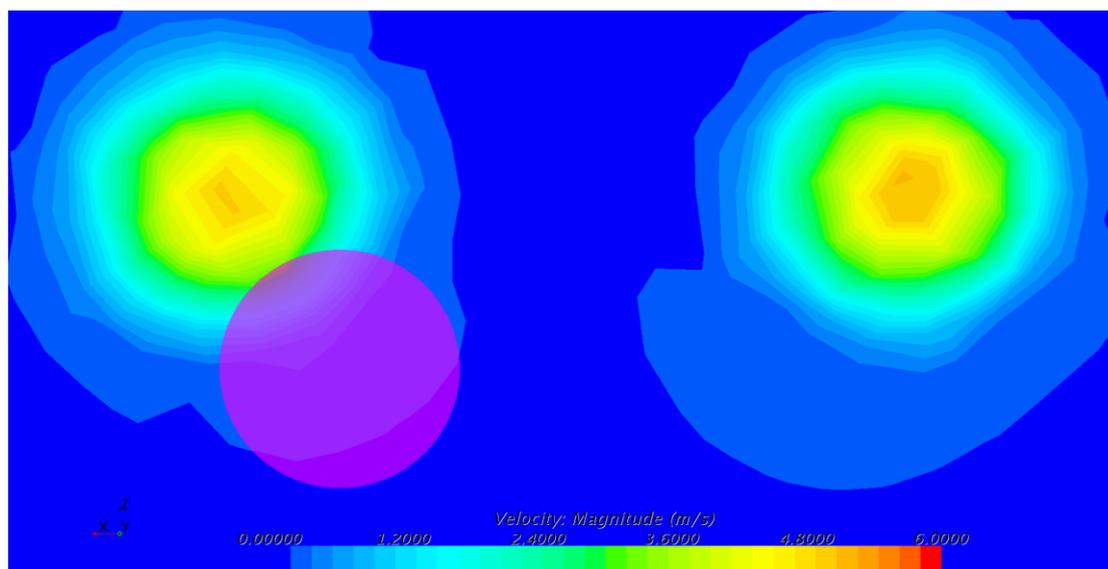


Рис. 4. Поле скоростей в зоне дыхания пассажира в центре
Fig. 4. Velocity field in the breathing zone of the passenger in the center

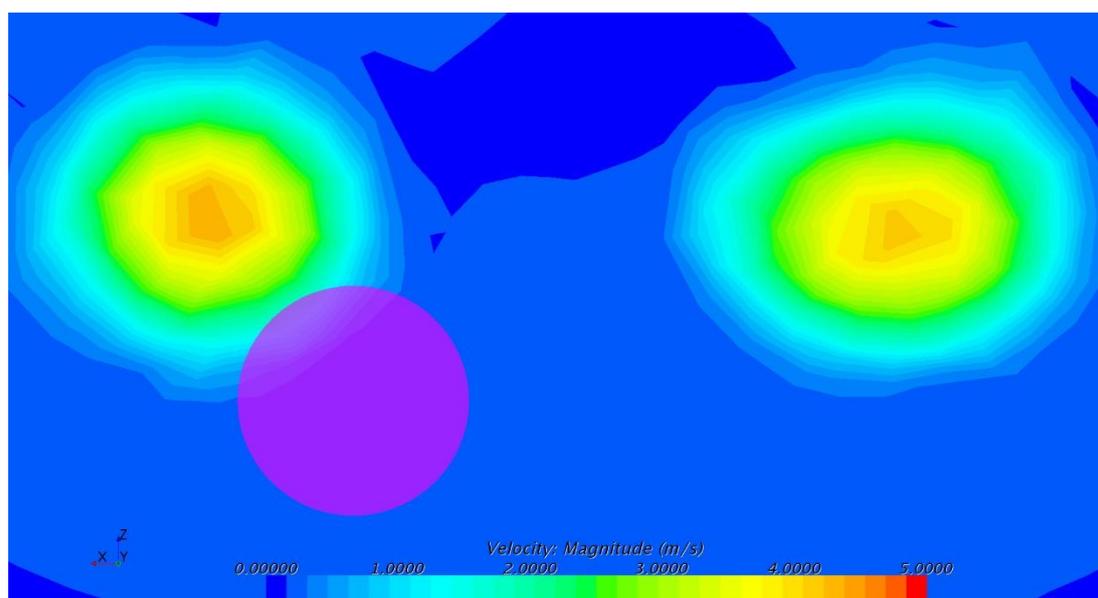


Рис. 5. Поле скоростей в зоне дыхания пассажира справа
Fig. 5. Velocity field in the breathing zone of the passenger on the right

Важно отметить, что с точки зрения комфорта находящихся в кабине, наилучшее расположение соответствует месту водителя – зона дыхания находится между двумя патрубками; это обеспечивает не только постоянный приток воздуха, но и сравнительно невысокую скорость, удовлетворяющую предъявляемым требованиям. Для центрального и правого мест, занимаемых пассажирами, зона дыхания находится близко к центру одного из патрубков и, в зависимости от антропометрических показателей и принятой позы, скорость в реальной области может превышать требуемую даже при обеспечении равномерного расхода по патрубкам. Для более наглядного представления на рис. 6 приведены поля скоростей в области измерения. Полученные значения скорости потока воздуха в зоне дыхания членов экипажа при открытых и закрытых заслонках приведены в табл. 4.

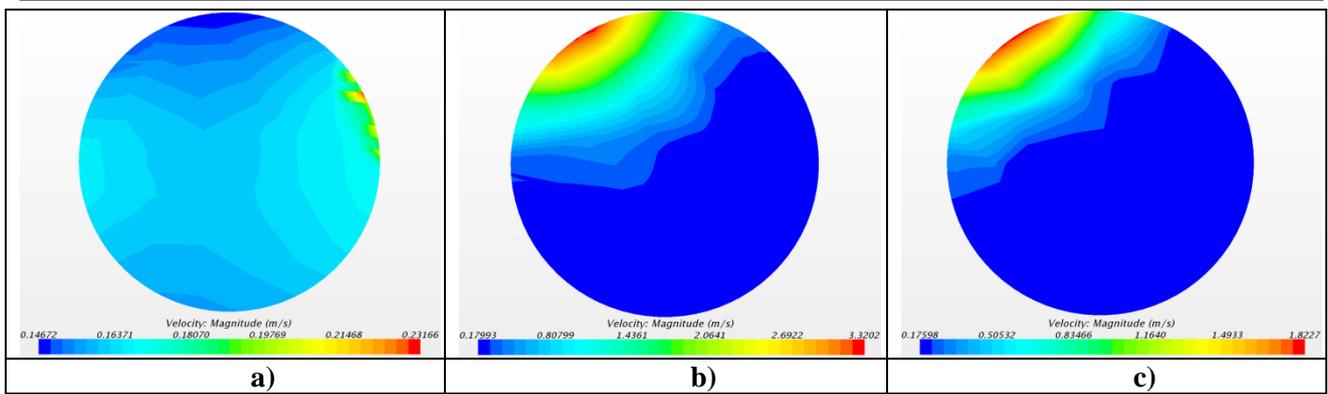


Рис. 6. Поле скоростей области измерения для водителя (а), пассажира в центре (b) и пассажира справа (c)

Fig. 6. Velocity field of the measurement area for the driver (a), passenger in the center (b) and passenger on the right (c)

Таблица 4.

Значения скорости потока воздуха в зоне дыхания

Table 4.

Air flow velocity values in the breathing zone

Наименование	Заслонки открыты	Заслонки закрыты
Водитель	0,161 м/с	0,085 м/с
Пассажир в центре	0,474 м/с	0,095 м/с
Пассажир справа	0,323 м/с	0,109 м/с

После внесения изменений в конструкцию была проведена экспериментальная оценка, подтвердившая адекватность и удовлетворительную сходимость разработанной модели и продемонстрировавшая выполнение требований по величине скорости потока воздуха в зоне дыхания.

Выводы

В результате работы усовершенствована конструкция системы кондиционирования кабины перспективной транспортной машины, обеспечено равномерное распределение воздуха по патрубкам, расчетным и экспериментальным путем определены величины скоростей воздуха в зоне дыхания для водителя и пассажиров. На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработана и верифицирована модель с удовлетворительной степенью достоверности описывающая рассматриваемую систему кондиционирования перспективной транспортной машины.
2. Сформулированы основные подходы по разработке систем кондиционирования, в том числе, на ранних этапах проектирования и с применением методов численного моделирования.
3. Предложены изменения в методику испытаний существующих и перспективных систем кондиционирования, обеспечивающие упрощение проведения и повышение точности получаемого результата.
4. Определены диаметры отверстий для обеспечения равномерного распределение расхода воздуха через каждый патрубок, отклонение не более 5 %. В базовой конструкции данный показатель достигал 173 %.
5. Получены значения скорости потока воздуха для доработанной системы кондиционирования перспективной транспортной машины в зоне дыхания водителя и пассажиров при открытых и закрытых заслонках, удовлетворяющие требованиям (< 1 м/с).

Библиографический список

1. **Трусевич, И.А.** Верификация модальной модели трансмиссии с целью прогнозирования NVH-параметров / И.А. Трусевич, С.В. Абдулов, В.Б. Держанский, И.А. Тараторкин, А.И. Тараторкин, А.А. Волков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 61-68. – DOI: 10.14529/engin210306.
2. **Трусевич, И.А.** Совершенствование акустического поведения корпуса автоматической коробки передач автомобиля категории N2 на основе метода модального представления динамической системы / И.А. Трусевич, И.А. Тараторкин, А.И. Тараторкин // Механика машин, механизмов и материалов. – 2023. – № 4(65). – С. 38-46. – DOI: 10.46864/1995-0470-2023-4-65-38-46.
3. **Трусевич, И.А.** Прогнозирование виброповедения корпуса перспективной автоматической коробки передач грузового автомобиля на основе метода модального представления динамической системы / И.А. Трусевич, И.А. Тараторкин, А.И. Тараторкин, В.Б. Держанский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2024. – Т. 24, № 1. – С. 70-81. – DOI: 10.14529/engin240107.
4. **Верещагин, С.Б.** Основы проектирования средств тепловой защиты кабин и обитаемых отсеков / С.Б. Верещагин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2021. – № 3(134). – С. 81-85. – DOI: 10.46960/1816-210X_2021_3_81
5. **Верещагин, С.Б.** Исследование температурного режима и влажности в кабине транспортного средства в условиях жары / С.Б. Верещагин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2011. – № 3(84). – С. 56-63.
6. **Верещагин, С.Б.** Методология проведения климатических испытаний в кабинах и обитаемых отсеках колёсных и гусеничных машин / С.Б. Верещагин // Известия МГТУ «МАМИ». – 2020. – № 3 (45). – С. 2-6. – DOI: 10.31992/2074-0530-2020-45-3-2-6
7. **Верещагин, С.Б.** Натурные ходовые испытания для изучения климатических факторов, воздействующих на водителя в условиях высоких температур / С.Б. Верещагин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2021. – № 2(133). – С. 68-73. – DOI: 10.46960/1816-210X_2021_2_68
8. **Аксенов, П.Ю.** Преимущества и недостатки систем кондиционирования в современных автомобилях / П.Ю. Аксенов, С.З. Манойлина // Молодежный вектор развития аграрной науки. Материалы 71-й студенческой научной конференции. Часть 1. Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I. – 2020. – С. 524-528.
9. **Войтекунас, Р.П.** Развитие систем кондиционирования салона автомобиля / Р.П. Войтекунас, А.П. Ильин // Человек в природном, социальном и социокультурном окружении. Материалы II региональной студенческой научно-практической конференции, посвященной 25-летию Международного Восточно-Европейского университета. – 2018. – С. 98-106.
10. **Маслов, В.А.** Перспективы использования струйных насосов и компрессоров в системах кондиционирования / В.А. Маслов, С.П. Ланин, К.Н. Карасев // Актуальные проблемы научного и технологического обеспечения инновационного развития. Сборник статей Международной научно-практической конференции. – 2024. – С. 45-48.
11. **Шабловский, Я.О.** Оптимизация системы кондиционирования воздуха в салонах автомобилей специального назначения / Я.О. Шабловский, В.В. Киселевич // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2013. – Т. 8, № 2. – С. 161-167.
12. **Петров, А.П.** Аспекты компоновок вентиляторных установок систем охлаждения двигателя внутреннего сгорания и кондиционирования воздуха в автомобиле / А.П. Петров, С.Н. Банников // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2018. – № 12(705). – С. 45-57. – DOI: 10.18698/0536-1044-2018-12-45-57
13. **Ланин, С.П.** Алгоритм управления кондиционером модульного типа / С.П. Ланин // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе. Материалы международной научно-практической конференции. Том Часть II. – 2021. – С. 55-63.
14. **Ланин, С.П.** Анализ системы управления, регулирования и защиты кондиционера модульного типа / С.П. Ланин, Е.С. Науменко, С.В. Саликов // Структурная модернизация науки как основа устойчивого развития общества. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. – 2024. – С. 84-89.
15. **Попов, А.Н.** Исследование эффективности системы управления, регулирования и защиты кондиционера модульного типа / А.Н. Попов, С.П. Ланин, С.В. Саликов // Актуальные проблемы науч-

- ного и технологического обеспечения инновационного развития. Сборник статей Международной научно-практической конференции. – 2024. – С. 58-63.
16. **Пьянзов, С.В.** Анализ средств диагностирования компрессора системы кондиционирования автомобиля / С.В. Пьянзов, П.А. Ионов, А.А. Фиклинов, Р.Ф. Шунихин // *Современные материалы, техника и технологии*. 2022. № 5(44). С. 48-54. DOI: 10.47581/2022/SMTT/04/Pianzov-Fiklinov.01
 17. **Ионов, П.А.** Анализ факторов, определяющих работоспособность системы кондиционирования транспортно-технологических машин / П.А. Ионов, С.В. Пьянзов, Р.Ф. Шунихин // *ОГАРЁВ-ONLINE*. Электронное периодическое научное издание. – 2023. – № 5(190). URL: <https://sciup.org/ogarev-online/articles?page=6> (дата обращения 1.08.2025).
 18. **Дубовицкий, О.О.** Применение программного пакета STAR-ССМ+ в решении задач теплопередачи в системе кондиционирования автомобиля / О.О. Дубовицкий, Н.К. Полуянович // *Сборник трудов конференции «Информационные технологии, системный анализ и управление» (ИТСАИУ-2015)*. – 2016. – Т. 3. – С. 197-203.
 19. **Орлов, Е.А.** Анализ напряженно-деформированного состояния участка трубопровода комплексной системы кондиционирования воздуха летательного аппарата / Е.А. Орлов, М.В. Горбачев // *Наука и кадры для авиастроения. Труды Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию ФЛА и 75-летию НГТУ*. – 2024. – С. 267-271.
 20. **Ко, J.** Status and challenges of vapor compression air conditioning and heat pump systems for electric vehicles / J. Ко, J.H. Jeong, // *Applied Energy*. – 2024. – Vol. 375. iss. C. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.124095
 21. **Xia, K.** PSA-Optimized Compressor Speed Control Strategy of Electric Vehicle / K. Xia, L. Yu, J. Wang, W. Yu // *Thermal Management Systems. Energies*. – 2025. – Vol. 18, iss. 11. – DOI: 10.3390/en18112687
 22. **Zhu, Z.** Review of integrated thermal management system research for battery electrical vehicles / Z. Zhu, Y. Zhang, A. Chen, J. Chen, Y. Wu, X. Wang, T. Fei // *Journal of Energy Storage*. – 2025. – Vol. 106. – DOI: 10.1016/j.est.2024.114662
 23. **Jose, S.** Electric Vehicle Air Conditioning System and Its Optimization for Extended Range – A Review / S. Jose, C. Kumar // *World Electric Vehicle Journal*. – 2022. – Vol. 13, iss. 11. – DOI: 10.3390/wevj13110204
 24. **Zhao, Y.** Simulation Study on Heating Performance of Thermal Management in Heat Pump Air Conditioning Systems for Electric Vehicles / Y. Zhao // *International Journal of Automotive Manufacturing and Materials*. – 2024. – Vol. 3, iss. 4. – DOI: 10.53941/ijamm.2024.100025
 25. **Shalgar, S.** Waste heat driven hybrid air conditioning system for vehicles / S. Shalgar, R. Bindu // *AIP Conference Proceedings*. – 2022. – Vol. 2469, iss. 1. – DOI: 10.1063/5.0080487
 26. **Schweizer, M.** Influence of heating, air conditioning and vehicle automation on the energy and power demand of electromobility / M. Schweizer, M. Stöckl, R. Tutunaru, U. Holzhammer // *Energy Conversion and Management: X*. 2023. – Vol. 20. – DOI: 10.1016/j.ecmx.2023.100443
 27. **Tan, L.** Computational fluid dynamics simulation and performance optimization of an electrical vehicle Air-conditioning system / L. Tan, Y. Yuan // *Alexandria Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 61, iss. 1. – Pp 315-328. DOI: 10.1016/j.aej.2021.05.001
 28. **Niu, J.** Simulation study on the performance of heat pump air conditioning system for pure electric vehicles / J. Niu, Y. Wang, F. Guo // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2024. – Vol. 2782. – DOI: 10.1088/1742-6596/2782/1/012075
 29. **Muriban, J.** Development of an energy-efficient hybrid electric vehicle air-conditioning system test rig coupled with nanolubricant / J. Muriban, R. Mamat, G. S. Prayogo, M. F. Jamlos // *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. – 2025. – Vol. 19, no. 1. – Pp. 10530–10543. DOI: 10.15282/jmes.19.1.2025.8.0825
 30. **Chaudhari, S.S.** Optimizing air conditioning efficiency: Utilizing nano-oxides ZnO, CuO, and TiO₂ with traditional and alternative refrigerants in medium temperature range cooling systems / S.S. Chaudhari, A.H. Pundkar, J. Giri, R. Chadge, T. Sathish, A.S. Daryapurkar, A. Pathiban // *Interactions*. – 2024. – Vol. 245. – DOI: 10.1007/s10751-024-01931-z
 31. **Zawawi, N.N.M.** Experimental investigation of air-conditioning electrical compressor using binary TiO₂-SiO₂ polyol-ester nanolubricants / N.N.M. Zawawi, W.H. Azmi, A.H. Hamisa, Tri Yuni Hendrawati, A.R.M. Aminullah // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2024. – Vol. 54. – DOI: 10.1016/j.csite.2024.104045

32. **Di Pierro, G.** Emissions Savings from Efficient Mobile Air-Conditioning (MAC) Systems in Passenger Vehicles / G. Di Pierro, D. Currò, S. Gil-Sayas, G. Fontaras // SAE Technical Paper 2025-01-8156. – 2025. – DOI: 10.4271/2025-01-8156
33. **Rusdijjati, R.** Integration of water heating systems with car air conditioning systems: a bibliometric analysis, lab-scale investigation, and potential applications / R. Rusdijjati, B.C. Purnomo, M.L. Rochman, F.D. Pertiwi, M. Setiyo // Indonesian Journal of Science & Technology. – 2025. – Vol. 10, no. 1. – DOI: 10.17509/ijost.v10i1.80966
34. **Wang, J.** Performance investigation of integrated thermal management system based on a pumped two-phase cooling system for electric vehicles / J. Wang, L. Ruan // Journal of Energy Storage. – 2023. – Vol. 72. – DOI: 10.1016/j.est.2023.107922
35. **He, L.** Study on a novel thermal management system and heat recovery strategy of range extend electric vehicle / L. He, Z. Gu, Y. Zhang, H. Jing, P. Li // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 237. – DOI: 10.1016/j.renene.2024.121538
36. **Keven, A.** Exergy Analyses of Vehicles Air Conditioning Systems for Different Refrigerants / A. Keven // International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering. – 2023. – Vol. 9, iss. 1. – Pp. 20-28. DOI: 10.22399/ijcesen.1258770
37. **Yunus, F.A.N.** A Study of the Effect on Air Velocity and Temperature by Altering the Shuttle Bus Parameters / F.A.N. Yunus, Z.A.M. Salleh, M.S.S. Mustafa, H.M. Affandi, A. Kamis, M.B. Rahim // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2023. – Vol. 107, iss. 1. – Pp. 165-173. – DOI: 10.37934/arfmts.107.1.165173
38. **Baharudin, N.** Examining the Influence of Vehicle Speed on Thermal Comfort and Temperature Control in Vehicle Cabins / N. Baharudin, B. Manshoor, M. Mohamed Salleh, A.N.A. Ahmad, M.A.S. Sabrudin, M. Mondal // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2025. – Vol. 132, no. 1. – Pp. 141–157. DOI: 10.37934/arfmts.132.1.141157
39. **Oztekin, E.K.** Thermoeconomic Analyses of Heat Pumps / E.K. Oztekin, M.M. Gur, R. Karaali // International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering. – 2025. – Vol. 11, no. 1. – DOI: 10.22399/ijcesen.867
40. **Cai, Z.** Experimental Study on the Cooling Performance of a Hybrid Vehicle Air Conditioning Compressor / Z. Cai, H. Zhao // Scientific Journal of Technology. – 2025. – Vol. 7, no. 2. – Pp. 57-65. – DOI: 10.54691/es2cx156
41. **Morrow, J.A.** Flow condensation heat transfer and pressure drop of R134a alternative refrigerants R513A and R450A in 0.95-mm diameter minichannels / J.A. Morrow, M.M. Derby // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2022. – Vol. 192. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122894
42. **Zhang, J.** Condensation heat transfer and pressure drop characteristics of zeotropic mixtures of R134a/R245fa in plate heat exchangers / J. Zhang, B. Elmegaard, F. Haglind // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 164. – DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120577
43. **Wu, J.** Research on Intelligent Control Technology of Air Conditioning Systems for New Energy Vehicles / J. Wu // Highlights in Science, Engineering and Technology. – 2024. – Vol. 119. – Pp. 703-708. – DOI: 10.54097/dbx3ba69
44. **Shalgar, S.** Design and development of a novel multichannel data acquisition system using labview for an automobile air conditioning application / S. Shalgar R. Bindu // Journal of Thermal Engineering. – 2022. – Vol. 8, iss. 1. – Pp. 14-28. DOI: 10.18186/thermal.1066990
45. **Yakubu, A.U.** Fuzzy-based thermal management control analysis of vehicle air conditioning system / A.U. Yakubu, S. Xiong, Q. Jiang, J. Zhao, Z. Wu, H. Wang, X. Ye, H. Wangsen // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 77. – Pp. 834-843. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.030
46. **Zhao, C.** Solutions for decarbonising urban bus transport: a life cycle case study in Saudi Arabia / C. Zhao, L.Z. Kobayashi, A.B.S. Alquaity, J.-C. Monfort, E. Cenker, N. Miralles, S.M. Sarathy // Communications Engineering. – 2024. – DOI: 10.1038/s44172-024-00238-9
47. **Ünal, Ş.** An Experimental Study on a Bus Air Conditioner to Determine its Conformity to Design and Comfort Conditions / Ş. Ünal // Journal of Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 3, iss. 1. – Pp. 1089-1101. DOI: 10.18186/thermal.277288
48. **Yunus, F.A.N.** Field Measurement of Air Velocity and Temperature Factors that Influence the Thermal Comfort in Shuttle Bus / F.A.N. Yunus, Z.A.M. Salleh, M.B. Rahim, H.M. Affandi, A. Kamis, M.S.S.

Mustafa // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2023. – Vol. 101, no. 2. – Pp. 164–171. DOI: 10.37934/arfmts.101.2.164171

49. Çelik, A. Investigation of cabin heating in electric vehicles with integrating solar cells and heat storage systems / A. Çelik // Journal of Energy Storage. – 2024. – Vol. 101. – DOI: 10.1016/j.est.2024.113782

References

1. Trusevich I.A., Abdulov S.V., Derzhanskiy V.B., Taratorkin I.A., Taratorkin A.I., Volkov A.A. Verifikatsiya modal'noy modeli transmissii s tsel'yu prognozirovaniya NVH-parametrov [Verification of the modal model of the transmission for the purpose of predicting NVH parameters]. Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroenie» [Bulletin of the South Ural State University. Series «Mechanical Engineering»]. 2021;21(3):61-68. doi: 10.14529/engin210306 (in Russian).
2. Trusevich I.A., Taratorkin I.A., Taratorkin A.I. Sovershenstvovanie akusticheskogo povedeniya korpusa avtomaticheskoy korobki peredach avtomobilya kategorii N2 na osnove metoda modal'nogo predstavleniya dinamicheskoy sistemy [Improving the acoustic behavior of the automatic transmission housing of an N2 category vehicle based on the modal representation method of a dynamic system]. Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials]. 2023;(4):38-46. doi: 10.46864/1995-0470-2023-4-65-38-46 (in Russian).
3. Trusevich I.A., Taratorkin I.A., Taratorkin A.I., Derzhanskiy V.B. Prognozirovanie vibropovedeniya korpusa perspektivnoy avtomaticheskoy korobki peredach gruzovogo avtomobilya na osnove metoda modal'nogo predstavleniya dinamicheskoy sistemy [Predicting the vibration behavior of the housing of an advanced automatic transmission for a truck based on the modal representation method of a dynamic system]. Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroenie» [Bulletin of the South Ural State University. Series «Mechanical Engineering»]. 2024;24(1):70-81. doi: 10.14529/engin240107 (in Russian).
4. Vereshchagin S.B. Osnovy proektirovaniya sredstv teplovoy zashchity kabin i obitaemykh otsekov [Fundamentals of designing thermal protection means for cabs and habitable compartments]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2021;(3):81-85. doi: 10.46960/1816-210X_2021_3_81 (in Russian).
5. Vereshchagin S.B. Issledovanie temperaturного rezhima i vlazhnosti v kabine transportnogo sredstva v usloviyakh zhary [Study of temperature and humidity conditions in a vehicle cab in hot climates]. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Mashinostroenie» [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Mechanical Engineering"]. 2011;(3):56-63 (in Russian).
6. Vereshchagin S.B. Metodologiya provedeniya klimaticheskikh ispytaniy v kabinakh i obitaemykh otsekakh kolesnykh i gusenichnykh mashin [Methodology for conducting climatic tests in cabs and habitable compartments of wheeled and tracked vehicles]. Izvestiya MGTU «MAMI» [Izvestiya MGTU «MAMI»]. 2020;(3):2-6. doi: 10.31992/2074-0530-2020-45-3-2-6 (in Russian).
7. Vereshchagin S.B. Naturnye khodovye ispytaniya dlya izucheniya klimaticheskikh faktorov, vozdeystvuyushchikh na voditelya v usloviyakh vysokikh temperatur [Full-scale road tests to study climatic factors affecting the driver under high temperature conditions]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2021;(2):68-73. doi: 10.46960/1816-210X_2021_2_68 (in Russian).
8. Aksenov P.Yu., Manoylina S.Z. Preimushchestva i nedostatki sistem konditsionirovaniya v sovremennykh avtomobilyakh [Advantages and disadvantages of air conditioning systems in modern cars]. In: Molodezhnyy vektor razvitiya agrarnoy nauki. Materialy 71-y studencheskoy nauchnoy konferentsii. Chast' 1 [Youth vector of development of agricultural science. Proceedings of the 71st Student Scientific Conference. Part 1]. Voronezh: Voronezh State Agrarian University; 2020. p. 524-528 (in Russian).
9. Voytekunas R.P., Ilyin A.P. Razvitie sistem konditsionirovaniya salona avtomobilya [Development of automotive cabin air conditioning systems]. In: Chelovek v prirodnom, sotsial'nom i sotsiokul'turnom okruzenii. Materialy II regional'noy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 25-letiyu Mezhdunarodnogo Vostochno-Evropeyskogo universiteta [Man in the natural, social and socio-cultural environment. Proceedings of the II Regional Student Scientific and Practical Conference dedicated to the 25th anniversary of the International East European University]. 2018. p. 98-106 (in Russian).
10. Maslov V.A., Lanin S.P., Karasev K.N. Perspektivy ispol'zovaniya struynykh nasosov i kompressorov v sistemakh konditsionirovaniya [Prospects for the use of jet pumps and compressors in air conditioning

- systems]. In: Aktual'nye problemy nauchnogo i tekhnologicheskogo obespecheniya innovatsionnogo razvitiya. Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Current problems of scientific and technological support for innovative development. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference]. 2024. p. 45-48 (in Russian).
11. Shablovskiy Ya.O., Kiselevich V.V. Optimizatsiya sistemy konditsionirovaniya vozdukha v salonakh avtomobiley spetsial'nogo naznacheniya [Optimization of the air conditioning system in the cabins of special purpose vehicles]. Chrezvychaynye situatsii: obrazovanie i nauka [Emergency Situations: Education and Science]. 2013;8(2):161-167 (in Russian).
 12. Petrov A.P., Bannikov S.N. Aspekty komponovok ventilyatornykh ustanovok sistem okhlazhdeniya dvigatelya vnutrennego sgoraniya i konditsionirovaniya vozdukha v avtomobile [Layout aspects of fan units for internal combustion engine cooling and air conditioning systems in a vehicle]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie [BMSTU Journal of Mechanical Engineering]. 2018;(12):45-57. doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-45-57 (in Russian).
 13. Lanin S.P. Algoritm upravleniya konditsionerom modul'nogo tipa [Control algorithm for a modular-type air conditioner]. In: Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Tom Chast' II [Energy efficiency and energy saving in modern production and society. Materials of the international scientific and practical conference. Volume Part II]. 2021. p. 55-63 (in Russian).
 14. Lanin S.P., Naumenko E.S., Salikov S.V. Analiz sistemy upravleniya, regulirovaniya i zashchity konditsionera modul'nogo tipa [Analysis of the control, regulation and protection system of a modular-type air conditioner]. In: Strukturnaya modernizatsiya nauki kak osnova ustoychivogo razvitiya obshchestva. Sbornik statey po itogam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Structural modernization of science as a basis for sustainable development of society. Collection of articles following the International Scientific and Practical Conference]. 2024. p. 84-89 (in Russian).
 15. Popov A.N., Lanin S.P., Salikov S.V. Issledovanie effektivnosti sistemy upravleniya, regulirovaniya i zashchity konditsionera modul'nogo tipa [Study of the efficiency of the control, regulation and protection system of a modular-type air conditioner]. In: Aktual'nye problemy nauchnogo i tekhnologicheskogo obespecheniya innovatsionnogo razvitiya. Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Current problems of scientific and technological support for innovative development. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference]. 2024. p. 58-63 (in Russian).
 16. P'yanzov S.V., Ionov P.A., Fiklinov A.A., Shunikhin R.F. Analiz sredstv diagnostirovaniya kompressora sistemy konditsionirovaniya avtomobilya [Analysis of diagnostic tools for the automotive air conditioning system compressor]. Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii [Modern Materials, Machinery and Technologies]. 2022;(5):48-54. doi: 10.47581/2022/SMTT/04/Pianzov-Fiklinov.01 (in Russian).
 17. Ionov P.A., P'yanzov S.V., Shunikhin R.F. Analiz faktorov, opredelyayushchikh rabotosposobnost' sistemy konditsionirovaniya transportno-tekhnologicheskikh mashin [Analysis of factors determining the performance of the air conditioning system of transport and technological machines]. OGAREV-ONLINE. 2023;(5). Available from: <https://sciup.org/ogarev-online/articles?page=> [accessed 2025 Aug 1] (in Russian).
 18. Dubovitskiy O.O., Poluyanovich N.K. Primenenie programmnoy paketa STAR-CCM+ v reshenii zadach teploperenosa v sisteme konditsionirovaniya avtomobilya [Application of the STAR-CCM+ software package in solving heat transfer problems in an automobile air conditioning system]. In: Sbornik trudov konferentsii «Informatsionnye tekhnologii, sistemnyy analiz i upravlenie» (ITSAIU-2015) [Proceedings of the conference «Information Technologies, System Analysis and Management» (ITSAIU-2015)]. 2016. Vol. 3. p. 197-203 (in Russian).
 19. Orlov E.A., Gorbachev M.V. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uchastka truboprovoda kompleksnoy sistemy konditsionirovaniya vozdukha letatel'nogo apparata [Analysis of the stress-strain state of a pipeline section of an aircraft integrated air conditioning system]. In: Nauka i kadry dlya aviastroeniya. Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 65-letiyu FLA i 75-letiyu NGTU [Science and personnel for aircraft manufacturing. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 65th anniversary of the FLA and the 75th anniversary of NSTU]. 2024. p. 267-271 (in Russian).
 20. Ko J., Jeong J.H. Status and challenges of vapor compression air conditioning and heat pump systems for electric vehicles. Applied Energy. 2024;375(124095). doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124095
 21. Xia K., Yu L., Wang J., Yu W. PSA-Optimized Compressor Speed Control Strategy of Electric Vehicle Thermal Management Systems. Energies. 2025;18(11). doi: 10.3390/en18112687.

22. Zhu Z., Zhang Y., Chen A., Chen J., Wu Y., Wang X., et al. Review of integrated thermal management system research for battery electrical vehicles. *Journal of Energy Storage*. 2025;106. doi: 10.1016/j.est.2024.114662.
23. Jose S., Kumar C. Electric Vehicle Air Conditioning System and Its Optimization for Extended Range -- A Review. *World Electric Vehicle Journal*. 2022;13(11). doi: 10.3390/wevj13110204
24. Zhao Y. Simulation Study on Heating Performance of Thermal Management in Heat Pump Air Conditioning Systems for Electric Vehicles. *International Journal of Automotive Manufacturing and Materials*. 2024;3(4). doi: 10.53941/ijamm.2024.100025.
25. Shalgar S., Bindu R. Waste heat driven hybrid air conditioning system for vehicles. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2469(1). doi: 10.1063/5.0080487.
26. Schweizer M., Stöckl M., Tutunaru R., Holzhammer U. Influence of heating, air conditioning and vehicle automation on the energy and power demand of electromobility. *Energy Conversion and Management*: X. 2023;20. doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100443
27. Tan L., Yuan Y. Computational fluid dynamics simulation and performance optimization of an electrical vehicle Air-conditioning system. *Alexandria Engineering Journal*. 2022;61(1):315-328. doi: 10.1016/j.aej.2021.05.001.
28. Niu J., Wang Y., Guo F. Simulation study on the performance of heat pump air conditioning system for pure electric vehicles. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024;2782. doi: 10.1088/1742-6596/2782/1/012075.
29. Muriban J., Mamat R., Prayogo G.S., Jamlos M.F. Development of an energy-efficient hybrid electric vehicle air-conditioning system test rig coupled with nanolubricant. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2025;19(1):10530-10543. doi: 10.15282/jmes.19.1.2025.8.0825.
30. Chaudhari S.S., Pundkar A.H., Giri J., Chadge R., Sathish T., Daryapurkar A.S., et al. Optimizing air conditioning efficiency: Utilizing nano-oxides ZnO, CuO, and TiO₂ with traditional and alternative refrigerants in medium temperature range cooling systems. *Interactions*. 2024;245. doi: 10.1007/s10751-024-01931-z.
31. Zawawi N.N.M., Azmi W.H., Hamisa A.H., Hendrawati T.Y., Aminullah A.R.M. Experimental investigation of air-conditioning electrical compressor using binary TiO₂--SiO₂ polyol-ester nanolubricants. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024;54. doi: 10.1016/j.csite.2024.104045.
32. Di Pierro G., Currò D., Gil-Sayas S., Fontaras G. Emissions Savings from Efficient Mobile Air-Conditioning (MAC) Systems in Passenger Vehicles. *SAE Technical Paper 2025-01-8156*. 2025. doi: 10.4271/2025-01-8156.
33. Rusdijati R., Purnomo B.C., Rochman M.L., Pertiwi F.D., Setiyo M. Integration of water heating systems with car air conditioning systems: a bibliometric analysis, lab-scale investigation, and potential applications. *Indonesian Journal of Science & Technology*. 2025;10(1). doi: 10.17509/ijost.v10i1.80966
34. Wang J., Ruan L. Performance investigation of integrated thermal management system based on a pumped two-phase cooling system for electric vehicles. *Journal of Energy Storage*. 2023;72. doi: 10.1016/j.est.2023.107922.
35. He L., Gu Z., Zhang Y., Jing H., Li P. Study on a novel thermal management system and heat recovery strategy of range extend electric vehicle. *Renewable Energy*. 2024;237. doi: 10.1016/j.renene.2024.121538
36. Keven A. Exergy Analyses of Vehicles Air Conditioning Systems for Different Refrigerants. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*. 2023;9(1):20-28. doi: 10.22399/ijcesen.1258770.
37. Yunus F.A.N., Salleh Z.A.M., Mustafa M.S.S., Affandi H.M., Kamis A., Rahim M.B. A Study of the Effect on Air Velocity and Temperature by Altering the Shuttle Bus Parameters. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2023;107(1):165-173. doi: 10.37934/arfmts.107.1.165173.
38. Baharudin N., Manshoor B., Mohamed Salleh M., Ahmad A.N.A., Sabrudin M.A.S., Mondal M. Examining the Influence of Vehicle Speed on Thermal Comfort and Temperature Control in Vehicle Cabins. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2025;132(1):141-157. doi: 10.37934/arfmts.132.1.141157.
39. Oztekin E.K., Gur M.M., Karaali R. Thermoeconomic Analyses of Heat Pumps. *International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering*. 2025;11(1). doi: 10.22399/ijcesen.867
40. Cai Z., Zhao H. Experimental Study on the Cooling Performance of a Hybrid Vehicle Air Conditioning Compressor. *Scientific Journal of Technology*. 2025;7(2):57-65. doi: 10.54691/es2cx156

41. Morrow J.A., Derby M.M. Flow condensation heat transfer and pressure drop of R134a alternative refrigerants R513A and R450A in 0.95-mm diameter minichannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022;192. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122894.
42. Zhang J., Elmegaard B., Haglind F. Condensation heat transfer and pressure drop characteristics of zeotropic mixtures of R134a/R245fa in plate heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021;164. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120577.
43. Wu J. Research on Intelligent Control Technology of Air Conditioning Systems for New Energy Vehicles. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2024;119:703-708. doi: 10.54097/dbx3ba69.
44. Shalgar S., Bindu R. Design and development of a novel multichannel data acquisition system using labview for an automobile air conditioning application. *Journal of Thermal Engineering*. 2022;8(1):14-28. doi: 10.18186/thermal.1066990.
45. Yakubu A.U., Xiong S., Jiang Q., Zhao J., Wu Z., Wang H., et al. Fuzzy-based thermal management control analysis of vehicle air conditioning system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024;77:834-843. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.030
46. Zhao C., Kobayashi L.Z., Alqaity A.B.S., Monfort J.-C., Cenker E., Miralles N., et al. Solutions for decarbonising urban bus transport: a life cycle case study in Saudi Arabia. *Communications Engineering*. 2024. doi: 10.1038/s44172-024-00238-9.
47. Ünal Ş. An Experimental Study on a Bus Air Conditioner to Determine its Conformity to Design and Comfort Conditions. *Journal of Thermal Engineering*. 2016;3(1):1089-1101. doi: 10.18186/thermal.277288.
48. Yunus F.A.N., Salleh Z.A.M., Rahim M.B., Affandi H.M., Kamis A., Mustafa M.S.S. Field Measurement of Air Velocity and Temperature Factors that Influence the Thermal Comfort in Shuttle Bus. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2023;101(2):164-171. doi: 10.37934/arfmts.101.2.164171.
49. Çelik A. Investigation of cabin heating in electric vehicles with integrating solar cells and heat storage systems. *Journal of Energy Storage*. 2024;101. doi: 10.1016/j.est.2024.113782.

**Дата поступления
в редакцию: 18.08.2025**

**Дата принятия
к публикации: 15.01.2026**

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗНАЧИМОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОЛЕСНОГО ШАССИ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ТЯЖЕЛОГО ОБОРУДОВАНИЯ

С.В. Шаповалов

ORCID: 0000-0003-3551-715X e-mail: ser150386@mail.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Москва, Россия

Исследованы эксплуатационные свойства колесного шасси для транспортировки тяжелого оборудования с применением метода анализа иерархий (МАИ). Разработана подробная номенклатура эксплуатационных свойств, охватывающая как технические, так и функциональные аспекты шасси (подвижность, живучесть и их производные разных уровней). Для каждого критерия проведен подробный анализ, описаны детали и дополнительные параметры, влияющие на него. Ранжированы свойства по степени их значимости. Установлено, что ключевым критерием при оценке колесного шасси специальных транспортных средств является опорная проходимость.

Определено, что оптимальным вариантом колесного шасси для транспортировки тяжелого оборудования является КамАЗ-65221 с трехосным полуприцепом, так как он в наибольшей степени соответствует ключевым критериям, в частности, опорной проходимости. Полученные результаты демонстрируют эффективность применения метода анализа иерархий для решения задач сравнительной оценки эксплуатационных свойств специальной техники и могут быть использованы при модернизации существующих или разработке новых образцов шасси.

Ключевые слова: колесное шасси; эксплуатационные свойства; метод анализа иерархий; экспертная оценка; многокритериальный анализ; парные сравнения; техническая надежность; иерархическая структура; технические системы; приоритетное техническое решение.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шаповалов, С.В. Применение метода анализа иерархий для оценки значимости эксплуатационных свойств колесного шасси для транспортировки тяжелого оборудования // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 1. С. 124-132. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_124 EDN: IRKYCT

ANALYTIC HIERARCHY PROCESS APPLICATION TO ASSESS IMPORTANCE OF PERFORMANCE PROPERTIES OF WHEELED CHASSIS FOR TRANSPORTING HEAVY EQUIPMENT

S.V. Shapovalov

ORCID: 0000-0003-3551-715X e-mail: ser150386@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Abstract. The article investigates the performance properties of a wheeled chassis for transporting heavy equipment using the analytic hierarchy process (AHP). A detailed nomenclature of performance properties has been developed, covering both technical and functional aspects of the chassis, such as mobility, survivability and their derivatives at different levels. A detailed analysis is carried out for each criterion, describing the details and additional parameters that influence it. The properties are ranked according to their degree of importance. It has been established that flotation ability is a key criterion when evaluating the wheeled chassis of special vehicles.

It has been determined that the KAMAZ-65221 with a three-axle semi-trailer is the optimal wheeled chassis option for transporting heavy equipment, as it best meets key criteria, in particular, flotation ability. The obtained results demonstrate the effectiveness of the application of the analytic hierarchy process for solving problems of comparative assessment of the operational performance of special vehicles and can be used in the modernization of existing or the development of new chassis models.

Ключевые слова: wheeled chassis; performance properties; analytic hierarchy process; expert assessment; multicriteria analysis; paired comparisons; technical reliability; hierarchical structure; technical systems; priority technical solution.

FOR CITATION: S.V. Shapovalov. Analytic hierarchy process application to assess importance of performance properties of wheeled chassis for transporting heavy equipment. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 1. Pp. 124-132. DOI: 10.46960/1816-210X_2026_1_124 EDN: IRKYCT

Введение

При проведении сравнительного анализа колесных шасси с различными конструктивно-компоновочными решениями используется множество различных методик. Рассмотренные в [1, 2] методы интегральной оценки, несмотря на их распространенность, характеризуются существенными ограничениями: высокой ресурсоемкостью, фрагментарностью учитываемых параметров, значительной долей субъективизма в весовых коэффициентах и низкой релевантностью для задач этапа НИОКР.

Метод анализа иерархий (МАИ) позиционируется в области проектирования специальных транспортных средств как системный инструмент для многокритериальной оценки, применяемый на всех этапах – от стратегического планирования НИР до тактического выбора компонентов и конечных изделий. Ключевая компетенция метода заключается в его способности структурировать сложные решения в виде иерархии, для которой осуществляется количественное определение значимости элементов с учетом совокупности разнородных показателей, включая количественные и качественные атрибуты [3, 4]. Универсальность МАИ обеспечивает его действенность при проведении комплексного анализа, оперирующего разнотипными данными.

В настоящее время МАИ получил широкое распространение при решении задач, связанных с выбором и обоснованием перспективных направлений развития в области специальных машин. Он активно применяется при оценке и выборе колесных шасси для разработки унифицированных семейств специальной техники, а также при сравнении и выборе конкретных образцов специализированных машин с учетом множества критериев. Структура иерархии свойств при применении МАИ формируется с учетом особенностей конкретного сравнительного анализа. Глубина проработки и число учитываемых показателей определяются степенью детализации рассматриваемых альтернатив. В современных исследованиях МАИ занимает ключевое положение среди подходов к оценке эксплуатационных характеристик и технического совершенства специальных транспортных средств [5-11].

Краткий обзор математического аппарата метода анализа иерархий (МАИ)

МАИ представляет собой эффективный инструмент для сложных многофакторных задач выбора и принятия решений. В его основе лежит принцип разбиения общей проблемы на более простые элементы, связанные между собой в виде многоуровневой иерархической структуры [12]. Верхний уровень такой структуры занимает главная цель, а нижние – критерии, подкритерии и возможные альтернативы решений.

Основным математическим подходом, используемым в МАИ, является метод попарных сравнений элементов на каждом из уровней. Эти сравнения проводятся с помощью специальной шкалы относительной важности, предложенной Саати. В результате формируются квадратные обратно-симметричные матрицы, каждая ячейка которых отражает степень предпочтения одного элемента над другим, оцениваемую экспертами.

После формирования матриц парных сравнений рассчитываются приоритеты элементов иерархии. Для этого определяют собственные векторы матриц, соответствующие их максимальным собственным значениям. Они отражают относительную значимость (приоритет) элементов, и после нормирования позволяют получить конкретные количественные оценки степени влияния каждого критерия и альтернативы на решение поставленной задачи. Упрощенный подход расчета таких векторов заключается в использовании среднего геометриче-

ского значений в строках матриц. Для обеспечения достоверности и надежности результатов парных сравнений проводится проверка их внутренней согласованности. Согласованность оценок измеряется через специальные показатели: индекс согласованности и случайный индекс, которые затем объединяются в интегральный показатель – отношение согласованности. Данный показатель позволяет понять, насколько экспертные оценки логичны и приемлемы. При превышении допустимого значения отношения согласованности экспертам рекомендуется пересмотреть свои оценки для устранения внутренних противоречий.

На заключительном этапе вычисляется глобальный приоритет каждого критерия, который отражает его значимость в общей иерархической структуре. Это достигается последовательным перемножением значений приоритетов, начиная с текущего критерия и заканчивая главным (верхним) уровнем иерархии. Подобная операция позволяет получить единую, комплексную количественную оценку значимости критерия во всей системе. Итоговым шагом становится расчет итоговой приоритетности альтернатив. Глобальные приоритеты критериев перемножаются с локальными приоритетами альтернатив по каждому из них и суммируются, формируя интегральную оценку предпочтительности каждого из возможных решений. По полученным значениям выбирается наиболее предпочтительная альтернатива.

Таким образом, МАИ дает возможность интегрировать как количественные, так и качественные показатели, сочетая при этом объективные данные и субъективные оценки экспертов, что делает его удобным и надежным инструментом при принятии решений в сложных многофакторных задачах.

Определение перечня эксплуатационных параметров колесной платформы тяжеловозного назначения

Процедура формирования перечня свойств объекта была реализована на основе системного анализа, в рамках которого ключевыми детерминантами выступили функционально-эксплуатационные параметры. Они были идентифицированы для класса специальных технических систем, целевое назначение которых заключается в эксплуатации и работе с тяжелым оборудованием. Для специальной техники принципиально необходимо шасси, обладающее высокими показателями мобильности, маневренности и проходимости, которое должно гарантировать оперативное перемещение в пределах занимаемой территории, а также быстрое развертывание в новом позиционном районе – как маршем, так и с использованием железнодорожного или воздушного транспорта. Помимо этого, к важнейшим требованиям относятся надежная защита экипажа и высокая эксплуатационная надежность шасси в разнообразных условиях. Перечисленные характеристики в совокупности определяют эффективность специальных машин при решении боевых задач, в связи с чем в рамках оценочной системы были выделены три ключевых свойства, выступающих в качестве основных критериев: мобильность, огневая мощь и живучесть [2]. Визуальное представление иерархии критериев дано на рис. 1. Детальный анализ и описание составляющих ее атрибутов приведены в следующих разделах работы.

Дескрипция параметров, образующих иерархическую модель

Для транспортных средств, предназначенных для перевозки тяжелого оборудования, были выбраны следующие критерии оценки для выполнения специальных задач: подвижность и живучесть.

Подвижность – это способность транспортного средства быстро передвигаться, выражающаяся в средней скорости и времени, необходимом для развертывания и свертывания. Под данным понятием подразумевается возможность перемещения из одной точки в другую в установленные сроки. Подвижность как комплексная характеристика структурируется по следующим уровням реализации: стратегический, оперативный и тактический. Критериальная база оценки подвижности формируется ключевыми параметрами: транспортабельностью, быстроходностью, проходимостью и автономностью [3].

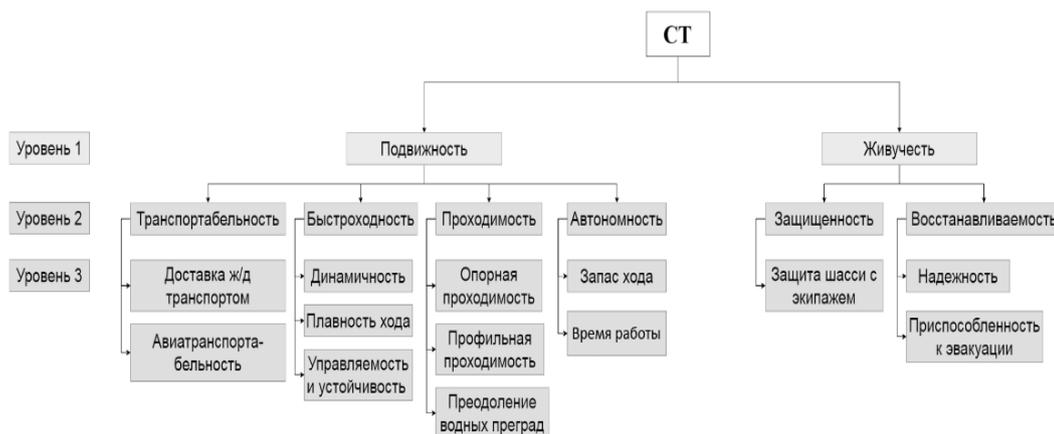


Рис. 1. Многоуровневая система оценочных показателей для специальной транспортной техники

Fig. 1. Multi-level system of evaluation indicators for special transport equipment

Проектирование образцов ВАТ должно учитывать императив транспортабельности как ключевого условия обеспечения мобильности войск. Данное требование реализуется посредством унификации массогабаритных и конструктивных параметров, обеспечивающей совместимость с различными видами транспорта. В структуре критериев транспортабельности, исходя из анализа условий перевозки, были выделены два ключевых компонента: железнодорожные перевозки и доставка авиационным транспортом.

Параметр «быстроходность» операционализируется через три группы свойств: динамичность (прямолинейная быстроходность), плавность хода и управляемость. Набор показателей, характеризующих динамичность, включает экстремальные и средние значения скоростей на различных типах дорожного покрытия, максимальный динамический фактор и экстремальные значения кинематических параметров (ускорение/замедление). Плавность хода представляет собой ключевое эксплуатационное свойство транспортного средства, характеризующее его способность перемещаться по дорогам и пересеченной местности с установленными скоростными режимами при минимальном воздействии ударов, толчков и ограниченной амплитуде колебаний корпуса. Это свойство напрямую влияет на сохранение нормального физиологического состояния экипажа и пассажиров, обеспечивает целостность и сохранность перевозимых грузов, а также поддерживает стабильную работу всех систем и механизмов автомобиля. Она является комплексным показателем, определяющим безопасность, комфорт и надежность эксплуатации транспортного средства в различных дорожных условиях. Критерием оценки плавности хода выступает среднеквадратичное отклонение (СКО) вертикальных виброускорений экипажа. Криволинейное движение определяется совокупностью динамических свойств: управляемости и устойчивости [1].

Адекватность реакции параметров движения транспортного средства на управляющие воздействия характеризуется его свойством управляемости. Оценка данного свойства в соответствии с теорией испытаний автомобильной техники базируется на следующих показателях: статическая траекторная управляемость, где наблюдается функциональная зависимость кривизны траектории от угла поворота рулевого колеса; усилие фиксации рулевого колеса, требуемое как в статическом, так и в установившемся криволинейном режимах; а также совокупность предельных скоростных характеристик, включающая скорость входа в поворот, выполнения маневра «переставка», движения по траектории с фиксированным радиусом и критическую скорость, при которой происходит потеря устойчивости.

Способность транспортного средства к автономному движению в условиях пересеченной местности, характеризуемой неоднородностью грунтов и наличием препятствий, формирует комплексное свойство, определяемое как проходимость. Его количественная

оценка основывается на следующих параметрах: поддержание регламентированной средней скорости на грунтах с низкой несущей способностью; преодоление препятствий (подъемы, спуски, косогоры, рвы) в установленных пределах; движение по слабым грунтам и участкам с геометрическими ограничениями; а также способность к форсированию водных преград вброд без нарушения работоспособности систем.

Перечисленные выше критерии были объединены в три группы: профильная проходимость, опорная проходимость, и преодоление водных преград [2]. Опорная проходимость характеризует способность транспортного средства сохранять подвижность на грунтах с ограниченной несущей способностью. Количественная оценка данного свойства осуществляется по значению средней скорости на деформируемых покрытиях (размокшие и заснеженные грунтовые дороги, колонные пути), тогда как качественная оценка фиксирует способность к преодолению локальных зон с критическим сопротивлением движению.

Профильная проходимость лимитируется геометрическими и маневренными характеристиками транспортного средства. Ее параметризация включает следующие показатели [2]: предельные углы подъема и спуска; критические углы статического и динамического крена; максимальная высота вертикального порогового препятствия; максимальная ширина преодолеваемого рва; минимальный радиус поворота при преодолении препятствия.

Водопреодолевающая способность (при движении вброд) определяется максимальной глубиной водной преграды, при которой гарантируется сохранение функциональности силовой установки и ключевых систем транспортного средства. Автономность системы характеризуется совокупностью ее мобильности, определяемой запасом хода по топливу, и оперативной готовности, задаваемой продолжительностью независимой работы целевой аппаратуры, достаточной для выполнения функциональных задач.

Комплексное свойство *живучести* проявляется в способности объекта сохранять и оперативно восстанавливать боеспособность после поражающих воздействий. Концептуальная модель свойства включает две составляющие: защищенность (противодействие средствам поражения) и восстанавливаемость (оптимизация времени восстановления работоспособности). Оценка компонента защищенности осуществляется по степени защищенности основных структурных элементов: шасси, экипажа и систем вооружения.

Восстанавливаемость определяет потенциал вооружения и военной техники к быстрому возобновлению боевых и функциональных качеств после их нарушения вследствие боевых повреждений или технических сбоев. Система оценки данного атрибута базируется на двух синтетических показателях: структурной безотказности объекта (надежности) и его подготовленности к эвакуационным операциям.

Надежность представляет собой системное свойство технического объекта, детерминирующее его способность к сохранению установленных значений параметров и характеристик в течение регламентированного периода эксплуатации. Данная характеристика обеспечивает выполнение объектом предписанных функций в условиях номинальных режимов работы, внешних воздействий, а также при проведении операций технического обслуживания, хранения и транспортирования в соответствии с нормативно-технической документацией.

Как было сказано выше, система свойств надежности обладает адаптивной структурой, конфигурация которой определяется эксплуатационным назначением объекта и внешними операционными условиями. Ядро системы составляют взаимообусловленные компоненты: безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость, способные образовывать ситуативно-обусловленные конфигурации.

Эвакуация поврежденной техники представляет собой комплекс мероприятий: от поиска и извлечения поврежденного оборудования до его транспортировки в ремонтные зоны или к пунктам погрузки на другой транспорт. Приспособленность к эвакуации предполагает наличие: стандартных точек крепления буксировочных средств; минимального количества операций, необходимых для подготовки техники к перемещению; взаимодействия со средствами технической помощи (эвакуаторы, тягачи, транспортно-ремонтные машины).

Результаты экспертной оценки

Для установления количественных значений весовых коэффициентов оценочных показателей было организовано экспертное исследование с участием 25 профильных специалистов, имеющих опыт в сфере конструирования и эксплуатации колесных шасси. Результаты оценки на основе МАИ Т. Саати приведены на диаграмме (рис. 2).

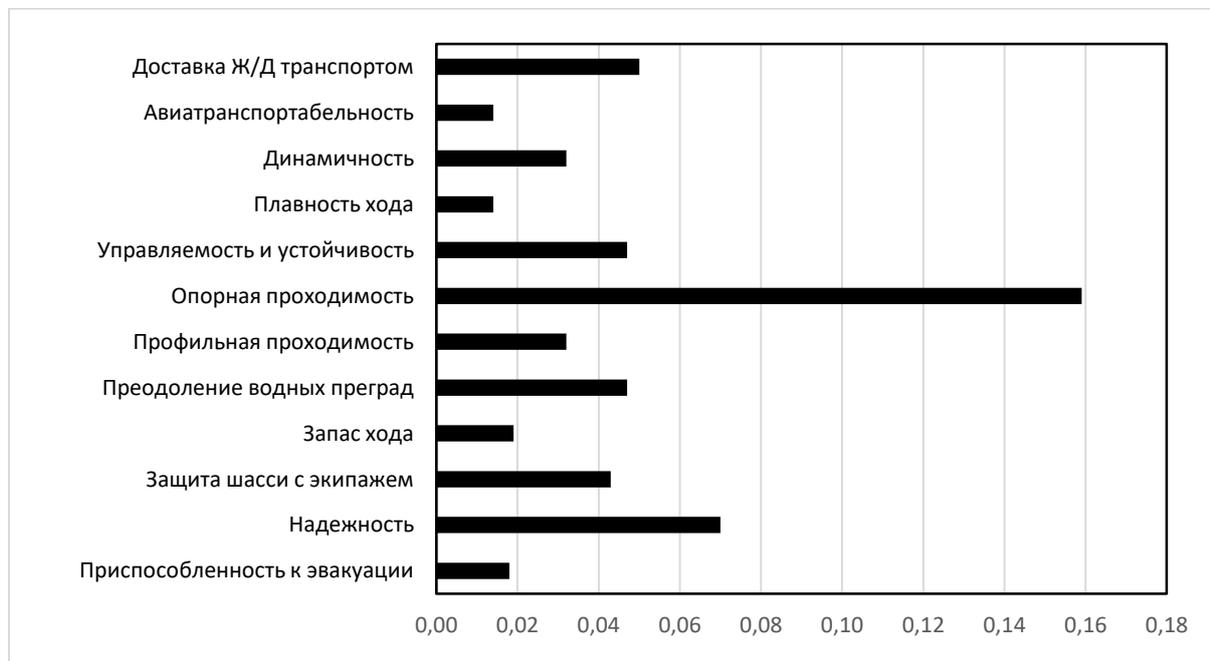


Рис. 2. Глобальные приоритеты критериев

Fig. 2. Global priorities for criteria

Анализ результатов позволяет сделать вывод, что ключевым критерием, определяющим эффективность, выступает опорная проходимость. Именно она имеет наибольшее значение при выборе колесного шасси для транспортировки тяжелого оборудования.

Выбор колесного шасси по результатам проведенной оценки

На основе результатов экспертной оценки был проведен выбор наиболее подходящей модели колесного шасси, в качестве основного критерия принимался уровень опорной проходимости. Такой подход позволяет обеспечить соответствие выбранной конструкции требованиям к передвижению в условиях ограниченной проходимости и повышенной сложности рельефа. В рамках данной работы сравнены варианты шасси для транспортировки тяжелого оборудования, а именно КамАЗ-6505, БАЗ-6909 и активный автопоезд с тягачом КамАЗ-6505. Их ключевые эксплуатационные характеристики представлены в табл. 1 [1].

Результаты компаративного исследования свидетельствуют о достижении активным автопоездом с тягачом КамАЗ-6560 максимальных значений в категории опорной проходимости. Критически значимыми эксплуатационными характеристиками данной транспортной платформы являются: минимизация осевых нагрузок, повышенная топологическая проходимость и увеличенный запас устойчивости. Конструкция шасси обладает свойством функциональной адаптивности, обеспечивающей как автономную эксплуатацию полуприцепа в стационарном режиме, так и реализацию модульной конфигурации силового агрегата. Корреляционный анализ верифицирует гипотезу о целесообразности применения активного автопоезда на базе КамАЗ-6560 в качестве оптимального транспортного решения для перемещения тяжелогрузного оборудования, удовлетворяющего полной номенклатуре релевантных эксплуатационных параметров.

Таблица 1.
Сравнение характеристик

Table 1.
Comparison of characteristics

	КамАЗ-6560	БАЗ-6909	Активный автопоезд с тягачом КамАЗ-6560
Колесная формула	8x8.1	8x8.1	12x12
Формула рулевого управления	1-2-00	1-2-00	1-2-00
Колея колес, мм	2086	2217	2086
База, мм	7140	7350	17020
Расстояние между осями, мм	2060+3640+1440	2200+3700+1450	2060+4400+1440+ +7560+1560
Габаритные размеры, мм:			
- длина	10080	11760	19960
- ширина	2550	2750	2550
- высота по крыше кабины	3230	2850	3230
Внешний габаритный радиус поворота, мм	16200	14000	-
Передний свес, мм	1405	2500	1415
Задний свес, мм	1345	1800	1840
Снаряженная масса, кг	13250	18200	13250+7000
Грузоподъемность, кг	21550	18000	21550+25000
Полная масса, кг	35000	36500	66800
Радиус колес, мм	635	675	635, 530
Наибольшая глубина преодолеваемого брода, мм	1800	1400	-
Угол преодолеваемого подъема, град	31	30	-
Максимальная скорость, км/ч	90	80	90 – тягач 70 – полуприцеп
Силовая установка			
- тип	ДВС	ДВС	ДВС+электро-мотор
- модель	КАМАЗ-740.37-400	ЯМЗ-849.10	
- мощность, л.с. (кВт)	400 (294)	500 (368)	
- крутящий момент, Н·м (кгс·м)	1766 (180)	1960 (200)	
Трансмиссия	автоматическая 9-ти ступенчатая	механическая 9-ти ступенчатая	тягач – автоматическая 9-ти ступенчатая, полуприцеп – бесступенчатая передача

Заключение

Проведено системное исследование эксплуатационных характеристик колесных шасси тяжелогрузных транспортных платформ. Разработана многоуровневая критериальная модель, позволившая провести структурированный анализ и количественно оценить влияние различных факторов на интегральный показатель эксплуатационной эффективности.

Применение методов экспертного оценивания с последующим ранжированием позволило установить доминирующую роль критерия опорной проходимости в общей системе оценок. Данное положение подтверждает определяющее значение параметров статической устойчивости и динамической маневренности шасси в реальных условиях эксплуатации.

Полученные результаты обеспечивают научно обоснованный выбор активного автопоезда КамАЗ-6560 в качестве оптимального технологического решения для различных операционных контекстов, а также создают методологическую платформу для дальнейших исследований. Предложенная методика, основанная на применении метода анализа иерархий, демонстрирует потенциал для оценки широкого класса мобильных технических систем и обладает свойством адаптации к изменяющимся требованиям за счет модификации критерияльного аппарата.

Библиографический список

1. **Морозов, А.В.** Выбор метода комплексного сравнения объектов автобронетанковой техники на этапе проектирования / А.В. Морозов, А.А. Котровский, А.В. Филев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 2 (104). – С. 120-123.
2. Методы оценки эффективности полноприводной автомобильной техники / В.В. Шипилов, В.Б. Каспаров [и др.]. – Бронницы, 2005. – 144 с.
3. **Саати, Т.Л.** Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т.Л. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
4. **Саати, Т.Л.** Аналитическое планирование. Организация систем / Т.Л. Саати, К. Кернс.– М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
5. **Плиев, И.А.** Оценка технического уровня семейств автомобилей многоцелевого назначения на основе метода анализа иерархий // Журнал автомобильных инженеров. – 2010. – № 3. – С. 46-49.
6. **Плиев, И.А.** Оценка технического уровня семейств автомобилей многоцелевого назначения на основе метода анализа иерархий // Журнал автомобильных инженеров. – 2010. – № 5. – С. 50-54.
7. **Рязанцев, В.И.** Методика проведения согласования экспертных оценок полученных путем индивидуального анкетирования методом анализа иерархий / В.И. Рязанцев, А.В. Морозов // Инженерный вестник. – 2014. – № 12. – С. 1-9.
8. **Морозов, А.В.** Комплексное сравнение объектов военной автомобильной техники типа MRAP на стадии проектирования // Журнал автомобильных инженеров. – 2015. – № 1 (90). – С. 40-45.
9. **Дубенский, М.Я.** Метод выбора базового шасси при создании спецавтомобиля. дисс ... кандидата технических наук. – Москва, 1999. – 130 с.
10. **Постников, М.В.** Метод комплексного сравнения военных гусеничных машин на основе анализа иерархий. дисс ... кандидата технических наук. – Москва, 2003. – 240 с.
11. **Наумов, В.Н.** Оценка конструкций и компоновок военных гусеничных машин с помощью метода анализа иерархий / В.Н. Наумов, Ю.Л. Рождественский, В.Г. Брекалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 64 с.
12. **Евсеев, К.Б.** Иерархия эксплуатационных свойств транспортных средств для перевозки тяжелых неделимых грузов в условиях Крайнего Севера // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2021. – № 2 (133). – С. 74-84.

References

1. Morozov A.V., Kotrovskiy A.A., Filev A.V. Vybora metoda kompleksnogo sravneniya ob"ektov avtobronetankovoy tekhniki na etape proektirovaniya [Selection of a method for complex comparison of armored vehicles at the design stage]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2014;(2):120-123 (in Russian).
2. Shipilov V.V., Kasparov V.B., et al. Metody otsenki effektivnosti polnoprivodnoy avtomobil'noy tekhniki [Methods for assessing the efficiency of all-wheel drive vehicles]. Bronnitsy; 2005. 144 p. (In Russian).
3. Saaty T.L. Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy [Decision making. The analytic hierarchy process]. Moscow: Radio i svyaz'; 1993. 278 p. (In Russian).
4. Saaty T.L., Kearns K. Analiticheskoe planirovanie. Organizatsiya sistem [Analytical planning. The organization of systems]. Moscow: Radio i svyaz'; 1991. 224 p. (In Russian).
5. Pliev I.A. Otsenka tekhnicheskogo urovnya semeystv avtomobiley mnogotselevogo naznacheniya na osnove metoda analiza ierarkhiy [Assessment of the technical level of families of multi-purpose vehicles based on the analytic hierarchy process]. Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov [Automotive Engineers Journal]. 2010;(3):46-49 (in Russian).

6. Pliev I.A. Otsenka tekhnicheskogo urovnya semeystv avtomobiley mnogotselevogo naznacheniya na osnove metoda analiza ierarkhiy [Assessment of the technical level of families of multi-purpose vehicles based on the analytic hierarchy process]. Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov [Automotive Engineers Journal]. 2010;(5):50-54 (in Russian).
7. Ryazantsev V.I., Morozov A.V. Metodika provedeniya soglasovaniya ekspertnykh otsenok poluchennykh putem individual'nogo anketirovaniya metodom analiza ierarkhiy [Methodology for reconciling expert assessments obtained by individual questioning using the analytic hierarchy process]. Inzhenernyy vestnik [Engineering Bulletin]. 2014;(12):1-9 (in Russian).
8. Morozov A.V. Kompleksnoe sravnenie ob"ektov voennoy avtomobil'noy tekhniki tipa MRAP na stadii proektirovaniya [Complex comparison of MRAP-type military vehicles at the design stage]. Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov [Automotive Engineers Journal]. 2015;(1):40-45 (in Russian).
9. Dubenskiy M.Ya. Metod vybora bazovogo shassi pri sozdanii spetsavtomobilya [Method for selecting a base chassis when creating a special vehicle] [dissertation]. Moscow; 1999. 130 p. (In Russian).
10. Postnikov M.V. Metod kompleksnogo sravneniya voennykh gusenichnykh mashin na osnove analiza ierarkhiy [Method for complex comparison of military tracked vehicles based on the analytic hierarchy process] [dissertation]. Moscow; 2003. 240 p. (In Russian).
11. Naumov V.N., Rozhdestvenskiy Yu.L., Brekalov V.G. Otsenka konstruksiy i komponovok voennykh gusenichnykh mashin s pomoshch'yu metoda analiza ierarkhiy [Evaluation of designs and layouts of military tracked vehicles using the analytic hierarchy process]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 2005. 64 p. (In Russian).
12. Evseev K.B. Ierarkhiya ekspluatatsionnykh svoystv transportnykh sredstv dlya perevozki tyazhelykh nedelimykh gruzov v usloviyakh Kraynego Severa [Hierarchy of operational properties of vehicles for transporting heavy indivisible cargo in the Far North]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2021;(2):74-84 (in Russian).

*Дата поступления
в редакцию: 28.07.2025*

*Дата принятия
к публикации: 18.02.2026*

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Куликов Михаил Сергеевич – доцент Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, канд. техн. наук

Манцеров Сергей Александрович – директор Института промышленных технологий и машиностроения Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Насонов Михаил Алексеевич – начальник отдела разработки систем производственного назначения, руководитель проектов автоматизации производства Группы компаний «Синтез-ОКА»

Прилуцкий Михаил Хаимович – профессор Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, д-р техн. наук

Родимков Юрий Александрович – инженер 2-й категории Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Дмитриев Сергей Михайлович – ректор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор

Добров Александр Алексеевич – старший научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Игнатьев Алексей Алексеевич – старший научный сотрудник отдела детерминистического обоснования безопасности АО «Атомэнергопроект», канд. техн. наук

Игонин Михаил Александрович – инженер АО «ОКБМ Африкантов»

Коробейников Кирилл Юрьевич – начальник отдела разработки нестандартного оборудования АО «Атомэнергопроект»

Легчанов Максим Александрович – директор Института ядерной энергетики и технической физики им. Ф.М. Митенкова Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Матюшев Леонид Александрович – ведущий инженер-конструктор отдела разработки нестандартного оборудования АО «Атомэнергопроект»

Митрюхин Андрей Геннадьевич – главный эксперт дирекции по обоснованию безопасности АО «Атомэнергопроект», канд. техн. наук

Осмаков Никита Андреевич – главный специалист отдела детерминистического обоснования безопасности АО «Атомэнергопроект»

Фиськов Антон Александрович – эксперт дирекции по обоснованию безопасности АО «Атомэнергопроект», канд. техн. наук

Шамрай Евгения Леонидовна – ведущий инженер-проектировщик отдела разработки систем управления авариями АО «Атомэнергопроект»

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Абдулов Сергей Владимирович – исполнительный директор – главный конструктор Специального конструкторского бюро машиностроения (г. Курган), канд. техн. наук

Баранова Мария Сергеевна – старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Бокарев Александр Игоревич – старший научный сотрудник отдела НОЦ «КАМАЗ – БАУМАН» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

Держанский Виктор Борисович – профессор, ведущий научный сотрудник Института машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН, д-р техн. наук

Дианов Вадим Андреевич – конструктор отдела «Численное моделирование и виртуальные испытания» НОЦ «КАМАЗ – БАУМАН» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Дьяков Филипп Кириллович – доцент Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета, канд. техн. наук

Елисеев Михаил Евгеньевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук

Елисеева Ирина Николаевна – старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Ерофеева Лариса Николаевна – заведующая кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук

Мазур Егор Петрович – ведущий инженер ресурсных испытаний АО «КАМА» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Нескин Иван Владимирович – студент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Падалкин Борис Васильевич – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Сахаров Даниил Сергеевич – студент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Стадухин Антон Алексеевич – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Тараторкин Игорь Александрович – главный научный сотрудник, заведующий отделом механики транспортных машин Института машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН, д-р техн. наук, профессор

Трусевич Илья Александрович – инженер-конструктор 1-ой категории Специального конструкторского бюро машиностроения (г. Курган), младший научный сотрудник Института машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН, канд. техн. наук

Шаповалов Сергей Вячеславович – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ «ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

*Адрес редакции: 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
ауд. 1363-3
e-mail: rsl@nntu.ru*

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляются два печатных экземпляра статьи и комплекты сопроводительной документации: бумажный и электронный.
- Рекомендуемый объем статьи не превышает 15 страниц текста. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 7; **минимальный объем статьи – 0,5 п.л.**
- **Статью необходимо сопроводить** актом и протоколом экспортного контроля, экспертным заключением о возможности открытого опубликования, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию.
- **Печатные экземпляры** статей должны быть подписаны всеми авторами.
- **Первая страница** статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в порядке, отражающем 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, подрисуночная подпись 11 жирный кегль, ссылки на рисунки: (рис. 1).

РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПРИНИМАЮТСЯ:

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации

2.3.8 – Информатика и информационные процессы

Валерий Павлович Хранилов: [**hranilov@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

Юрий Игоревич Молев: [**rsl@nttu.ru**](mailto:rsl@nttu.ru)

16+

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 1 (152)

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**

Редакция:

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

rsl@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать: 17.03.2026. Дата выхода в свет 30.03.2026. Формат 60x84 ¹/₈.

Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 8,50. Тираж 100 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.

Типография НГТУ.

Адрес университета и типографии:

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24