

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

**ТРУДЫ НГТУ**  
**им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

*Журнал издается с 2010 года*

**№ 2 (153)**

**Нижний Новгород 2026**

УДК 050(06)  
ББК 9я54  
Т 78

Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2026. № 2 (153). – 136 с.

*Выходит 4 раза в год*

**Журнал включен ВАК при Минобрнауки России**

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

**Главный редактор А.А. Куркин**

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

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

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

*Published since 2010*

**№ 2 (153)**

**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:  
ПМ № 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**

|  |            |
|--|------------|
| <b>ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ .....</b>  | <b>7</b>   |
| <b>Родимков Ю.А., Перевалов С.Е., Волокитин В.Д., Котов А.В., Соловьев А.А., Мее-<br/>ров И.Б.</b> Итеративная тонкая настройка нейронной сети для обработки данных двухэкран-<br>ного магнитного спектрометра .....   | <b>7</b>   |
| <b>Саразов А.В., Козелков А.С., Корнев А.В.</b> Применение комплексной математической мо-<br>дели летательного аппарата в интересах решения задач внешней аэродинамики .....   | <b>17</b>  |
| <b>Шамин А.А.</b> Архитектурные основы цифровой трансформации сложных систем .....   | <b>30</b>  |
| <b>ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ .....</b>   | <b>40</b>  |
| <b>Душев С.А., Лапшин Д.А., Пичков С.Н., Шорохов В.В.</b> Применение параметрического<br>моделирования для оптимизации процесса подбора геометрических характеристик демпфи-<br>рующих устройств .....   | <b>40</b>  |
| <b>Курицин Д.Д., Доронков Д.В., Николаев Д.С., Рязанов А.В., Солнцев Д.Н., Легча-<br/>нов М.А., Кудряшов Д.А.</b> Расчетно-экспериментальное обоснование выбора модели тур-<br>булентности для анализа перераспределения расходов в призматической активной зоне вы-<br>сокотемпературного газоохлаждаемого реактора ..... | <b>57</b>  |
| <b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ,<br/>ПРОИЗВОДСТВО .....</b>  | <b>70</b>  |
| <b>Бутарович Д.О., Бруй Д.А., Гараев Р.И.</b> Современные энергоэффективные системы<br>управления термостатированием тяговой аккумуляторной батареи электромобиля .....  | <b>70</b>  |
| <b>Кобзаренко В.Б., Левенков Я.Ю.</b> Влияние модификаций зубчатого зацепления на эксплуа-<br>тационные характеристики передачи .....  | <b>84</b>  |
| <b>Летопольский А.Б., Тетерина И.А.</b> Рабочее оборудование бульдозера с уширителями .....  | <b>96</b>  |
| <b>Манянин С.Е., Молев Ю.И., Прошин Д.Н., Чакров Н.И.</b> К вопросу применения резуль-<br>татов испытаний транспортных средств на управляемость в экспертной практике .....  | <b>107</b> |
| <b>Четвериков М.В.</b> Метод многофакторной многокритериальной оптимизации конструктив-<br>ных параметров системы первичного подрессоривания колесного транспортного средства ...  | <b>117</b> |
| <b>НАШИ АВТОРЫ .....</b>   | <b>132</b> |

## CONTENTS

|   |                |
|---|----------------|
| <b>COMPUTER SCIENCE, MANAGEMENT AND SYSTEM ANALYSIS .....</b>   | <b>7</b>       |
| <b>Rodimkov Yu.A., Perevalov S.E., Volokitin V.D., Kotov A.V., Soloviev A.A., Meyerov I.B.</b> Iterative fine-tuning of neural network for processing data from two-screen magnetic spectrometer .....  | 7              |
| <b>Sarazov A.V., Kozelkov A.S., Kornev A.V.</b> Application of aircraft comprehensive mathematical model to address external aerodynamics problems .....  | 17             |
| <b>Shamin A.A.</b> Architectural foundations for digital transformation of complex systems .....  | 30             |
| <br><b>NUCLEAR POWER AND ATOMIC POWER ENGINEERING .....</b>   | <br><b>40</b>  |
| <b>Dushev S.A., Lapshin D.A., Pichkov S.N., Shorokhov V.V.</b> Application of parametric modeling for optimization of selection process of damping devices geometric characteristics .....  | 40             |
| <b>Kuritsin D.D., Nikolaev D.S., Ryazanov A.V., Solntsev D.N., Legchanov M.A., Kudryashov D.A.</b> Computational and experimental validation of turbulence models for flow distribution analysis in a prismatic core of high temperature gas cooled reactor ..... | 57             |
| <br><b>MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT:<br/>THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION .....</b>   | <br><b>70</b>  |
| <b>Butarovich D.O., Bruy D.A., Garaev R.I.</b> Modern energy-efficient thermal management systems for electric vehicle traction battery .....   | 70             |
| <b>Kobzarenko V.B., Levenkov Ya.Yu.</b> The effect of gear modifications on the operational characteristics of a gear train .....   | 84             |
| <b>Letopolsky A.B., Teterina I.A.</b> Bulldozer working equipment with widening attachments .....   | 96             |
| <b>Manyanin S.E., Molev Yu.I., Prohin D.N., Chakrov N.I.</b> On the application of vehicle handling test results in expert practice .....   | 107            |
| <b>Chetverikov M.V.</b> Method of multifactor multicriteria optimization of design parameters of primary suspension system of wheeled vehicle .....   | 117            |
| <br><b>AUTHORS .....</b>  | <br><b>132</b> |

---

**ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ**

---

УДК 004.852

EDN SUATEQ

**ИТЕРАТИВНАЯ ТОНКАЯ НАСТРОЙКА НЕЙРОННОЙ СЕТИ  
ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ  
ДВУХЭКРАННОГО МАГНИТНОГО СПЕКТРОМЕТРА****Ю.А. Родимков**ORCID: 0000-0003-2962-9366 e-mail: [rodimkov@itmm.unn.ru](mailto:rodimkov@itmm.unn.ru)Национальный исследовательский  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
*Нижний Новгород, Россия***С.Е. Перевалов**ORCID: 0000-0001-9347-7374 e-mail: [perevalov@ipfran.ru](mailto:perevalov@ipfran.ru)Институт прикладной физики Российской академии наук  
*Нижний Новгород, Россия***В.Д. Волокитин**ORCID: 0000-0003-1075-1329 e-mail: [volokitin@itmm.unn.ru](mailto:volokitin@itmm.unn.ru)Национальный исследовательский  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
*Нижний Новгород, Россия***А.В. Котов**ORCID: 0000-0002-0454-3403 e-mail: [kotov@ipfran.ru](mailto:kotov@ipfran.ru)Институт прикладной физики Российской академии наук  
*Нижний Новгород, Россия***А.А. Соловьев**ORCID: 0000-0001-8595-5604 e-mail: [so\\_lo@ipfran.ru](mailto:so_lo@ipfran.ru)Институт прикладной физики Российской академии наук  
*Нижний Новгород, Россия***И.Б. Мееров**ORCID: 0000-0001-6905-2050 e-mail: [meerov@vmk.unn.ru](mailto:meerov@vmk.unn.ru)Национальный исследовательский  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
*Нижний Новгород, Россия*

Предложен метод повышения точности восстановления распределения электронов с использованием тонкой настройки модели машинного обучения. Модель дообучается с помощью экспериментально обоснованного синтетического набора данных: предобученная модель предсказывает физические параметры на экспериментальных данных, которые затем применяются как входные параметры для численного моделирования. Новые генерируемые примеры имеют распределение, близкое к истинным аналогам в экспериментальных данных. Предложенный подход позволяет повысить точность аппроксимации в среднем на 8 %.

**Ключевые слова:** глубокое обучение; сверточные нейронные сети; тонкая настройка; синтетические данные; численное моделирование лазеров; лазерное кильватерное ускорение; взаимодействие лазера с плазмой; магнитный спектрометр.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Родимков, Ю.А. Итеративная тонкая настройка нейронной сети для обработки данных двухэкранного магнитного спектрометра / Ю.А. Родимков, С.Е. Перевалов, В.Д. Волокитин, А.В. Котов, А.А. Соловьев, И.Б. Мееров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 2. С. 7-16. EDN SUATEQ

## **ITERATIVE FINE-TUNING OF NEURAL NETWORK FOR PROCESSING DATA FROM TWO-SCREEN MAGNETIC SPECTROMETER**

**Yu.A. Rodimkov**

ORCID: **0000-0003-2962-9366** e-mail: **rodimkov@itmm.unn.ru**  
National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**S.E. Perevalov**

ORCID: **0000-0001-9347-7374** e-mail: **perevalov@ipfran.ru**  
Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**V.D. Volokitin**

ORCID: **0000-0003-1075-1329** e-mail: **volokitin@itmm.unn.ru**  
National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.V. Kotov**

ORCID: **0000-0002-0454-3403** e-mail: **kotov@ipfran.ru**  
Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.A. Soloviev**

ORCID: **0000-0001-8595-5604** e-mail: **so\_lo@ipfran.ru**  
Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**I.B. Meyerov**

ORCID: **0000-0001-6905-2050** e-mail: **meerov@vmk.unn.ru**  
National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The paper proposes a method for improving the accuracy of electron distribution reconstruction using fine-tuning of a machine learning model. The model is fine-tuned using an experimentally validated synthetic dataset: the pre-trained model predicts physical parameters based on experimental data, which are then used as input parameters for numerical simulation. The newly generated samples have a distribution close to the true analogues in the experimental data. The proposed approach yields an average improvement of 8 % in approximation accuracy.

**Key words:** deep learning; convolutional neural networks; fine-tuning; synthetic data; lasers numerical simulation; laser wakefield acceleration; laser-plasma interaction; magnetic spectrometer.

**FOR CITATION:** Yu.A. Rodimkov, S.E. Perevalov, V.D. Volokitin, A.V. Kotov, A.A. Soloviev and I.B. Meyerov. Iterative fine-tuning of neural network for processing data from two-screen magnetic spectrometer. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 2. Pp. 7-16. EDN SUATEQ

### **Введение**

Развитие петаваттных лазерных систем [1] стимулировало значительный прогресс в исследовании лазерно-плазменного ускорения частиц кивальтерным полем [2, 3]. Данный метод

представляет большой научный интерес благодаря своей уникальной компактности и экономичности по сравнению с традиционными способами ускорения частиц [4, 5]. Для валидации результатов эксперимента необходимы надежные и эффективные методы диагностики [6]. Диагностика пучков ускоренных электронов состоит из двух этапов.

На первом этапе необходимо зарегистрировать всю необходимую информацию, которая позволит восстановить характеристики электронов. Для регистрации пучков обычно применяют магнитные спектрометры, принцип работы которых основан на том, что электроны с разными импульсами и энергиями отклоняются в магнитном поле по-разному; медленные – сильнее. Для регистрации всей информации и восстановления как энергетических, так и угловых характеристик необходимо использовать двухэкранные спектрометры [7], либо ограничивать угловой разброс электронов на входе в спектрометр, что приводит к потере информации об угловом распределении.

На втором этапе осуществляется аналитический или численный поиск конфигурации физических параметров, которая будет обеспечивать соответствие модели и экспериментальных данных. В результате необходимо решать некорректную обратную задачу. Однако существующие методы поиска конфигурации и восстановления характеристики электронов имеют ряд ограничений. Например, подходы, основанные на решении системы уравнений [7-9], или использовании численного моделирования [10, 11] для вычисления траектории электронов требуют значительного времени и ручного вмешательства для выделения и сопоставления паттернов на изображениях с обоих экранов спектрометра. С другой стороны, методы, основанные на оптимизации параметров базисных функций [12], работают эффективно только при малом количестве параметров, однако при большом их числе возникает проблема «проклятия размерности» [13].

Методы машинного обучения позволяют автоматизировать процесс решения обратной задачи и восстановления характеристик электронов из экспериментальных данных [14]. Но из-за отсутствия размеченных экспериментальных данных модель необходимо обучать на синтетических данных, включающих широкий спектр возможных комбинаций физических параметров для формирования репрезентативной выборки. Такой подход обеспечивает универсальность обученной модели, но связан с проблемой противоречия между универсальностью аппроксиматора и работой модели в узком диапазоне физических параметров. Сужение области определения обучающей выборки до окрестностей реальных значений параметров позволяет повысить точность аппроксимации за счет упрощения задачи, однако эти параметры неизвестны заранее. Именно поэтому физические параметры для численного моделирования генерируются в широком диапазоне.

В данной работе предлагается метод тонкой настройки нейронной сети, направленный на повышение точности реконструкции распределения ускоренных электронов. Он основан на итеративной процедуре, комбинирующей классическое обучение на синтетических данных и новой экспериментально обоснованной выборке. Экспериментально обоснованные данные генерируются на основе численного моделирования по информации, предсказанной для них с помощью предобученной модели распределения электронов. В результате модель дообучается восстанавливать не все возможные комбинации параметров задачи, а только характерные для конкретного набора экспериментальных данных.

### Постановка задачи

Рассматривается физический эксперимент (рис. 1). Электроны с функцией плотности  $f(E, \phi, \theta)$ , зависящей от энергии  $E$ , полярного  $\phi$  и азимутального  $\theta$  углов, пролетают через два сцинтилляционных экрана  $I_1$  и  $I_2$ . Перед каждым из них установлены дипольные магниты  $M_1$  и  $M_2$ , которые воздействуют на электроны. Пролетая через экран, электроны оставляют световые пятна в соответствующей области. Также задан процесс численного моделирования  $H: I_1, I_2 = H(f(E, \phi, \theta))$ , который описывает физический эксперимент и сопоставляет функции

распределения электронов с изображением экранов. Необходимо восстановить по изображениям с двух экранов  $I_1$  и  $I_2$  функцию плотности  $f(E, \phi, \theta)$ , которая будет максимизировать суммарное косинусное сходство  $\frac{I_1 \cdot \hat{I}_1}{\|I_1\| \|\hat{I}_1\|} + \frac{I_2 \cdot \hat{I}_2}{\|I_2\| \|\hat{I}_2\|}$  между изображениями с экспериментальных экранов  $I_1$  и  $I_2$  и экранов, полученных в результате численного моделирования в соответствии с восстановленным нейронной сетью распределением  $\hat{I}_1, \hat{I}_2 = H(f(E, \phi, \theta))$ .

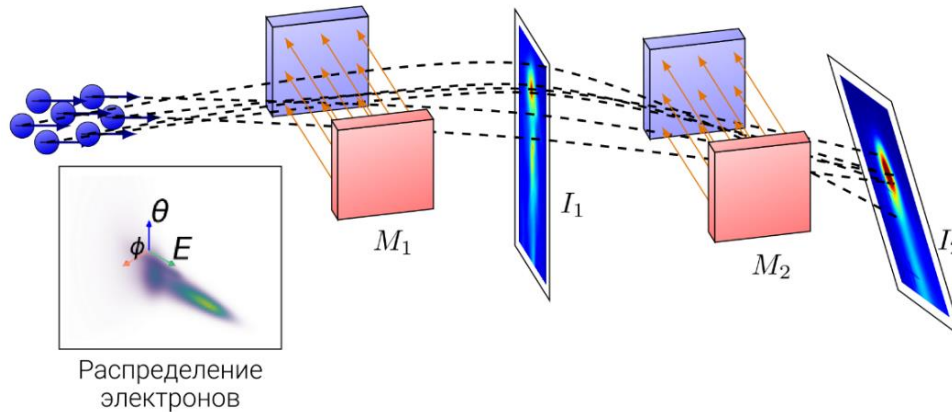


Рис. 1. Схема двухэкранного магнитного спектрометра

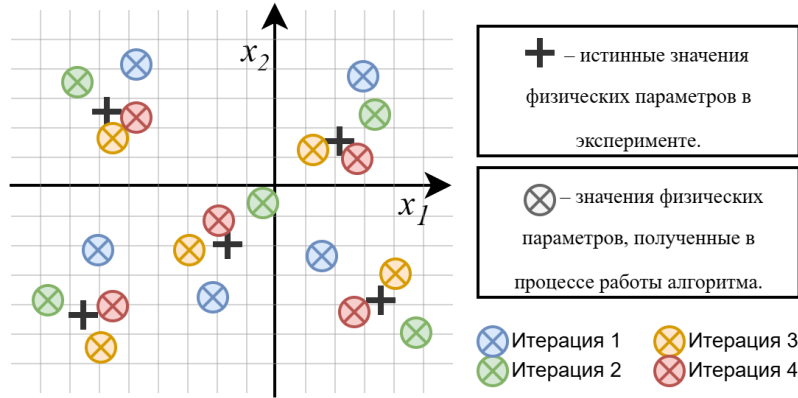
Fig. 1. Schematic diagram of a two-screen magnetic spectrometer

Ранее для решения данной задачи использовалась сверточная нейронная сеть [14]. Она была обучена на большом корпусе синтетических данных, полученных с помощью численного моделирования и охватывающих все возможные комбинации параметров. Целью данной работы является повышение точности реконструкции распределения с помощью тонкой настройки модели на основе экспериментально обоснованного синтетического набора данных.

### Метод

Предлагаемый метод направлен на повышение точности работы модели машинного обучения на конкретных экспериментальных данных. Для тонкой настройки модели формируется новая выборка синтетических данных, которые приближены по физическим параметрам к экспериментальным данным (рис. 2). Обучение на ней упрощает задачу для модели, так как не требует аппроксимации зависимости для всех возможных комбинаций параметров. Таким образом, акцент делается на точности модели именно на определенном множестве параметров, близких к экспериментальным данным. Изначально создать такую выборку не представляется возможным, так как сложно определить, какие физические параметры соответствуют конкретному экспериментальному примеру.

Для тонкой настройки предложен *Алгоритм 1*. Вначале модель машинного обучения инициализируется предобученными весами, полученными при обучении на исходных синтетических данных. Итеративно выполняются следующие действия. Модель обучается на исходных синтетических данных  $D_s$ , чтобы стабилизировать процесс обучения. Затем собираются новые данные  $D_e$  на основе предсказаний модели на экспериментальных примерах. Далее модель обучается на новых данных  $D_e$ . В конце выбирается модель с наилучшей точностью на тестовых данных.



**Рис. 2. Схематичный пример работы алгоритма. Итеративная процедура, в результате которой в обучающую выборку добавляются данные с физическими параметрами, значения которых близки к требуемым для обучения**

**Fig. 2. Schematic example of the algorithm's operation. An iterative procedure that results in data with physical parameters close to those required for training being added to the training set**

*Алгоритм 1.* Алгоритм тонкой настройки модели с помощью экспериментально обоснованного синтетического набора данных.

**Вход:**  $D_s = (\mathbf{x}, \mathbf{y})$  – набор пар синтетических данных,  $\mathbf{y}'$  – экспериментальные данные,  $D_e = \emptyset$  – экспериментально обоснованный синтетический набор данных,  $M_0$  – модель машинного обучения, обученная на синтетических данных,  $F: \mathbf{y} = F(\mathbf{x})$  – численная модель.

**Пока** критерий останова не выполнен, **делай:**

*Шаг 1.* Обучение модели  $M_i$  на случайных примерах из  $D_s$  с использованием аугментации.

*Шаг 2.* Предсказание физических параметров  $\mathbf{x}'$  с помощью модели  $M_i: \mathbf{x}' = M_i(\mathbf{y}')$ .

*Шаг 3.* Численное моделирование:  $\mathbf{y}' = F(\mathbf{x}')$ .

*Шаг 4.* Добавление новых данных в выборку:  $D_e \leftarrow D_e \cup \{\mathbf{x}', \mathbf{y}'\}$ .

*Шаг 5.* Обучение  $M_i$  на случайных примерах из  $D_e$  с использованием аугментации.

*Шаг 6.*  $i \leftarrow i + 1$ .

**Конец**

*Вернуть*  $M^* \leftarrow$  лучшая модель из  $\{M_0, M_1, \dots, M_{i-1}\}$ .

## Результаты

В работе использовались предобученные модели и синтетические данные  $D_s$ , а также методы аугментации и численного моделирования [14]. Для обучения модели, проводившегося в течение 250 эпох, использовался оптимизатор *Adam* [16] со скоростью обучения  $2 \times 10^{-5}$ , без регуляризации. Использовалось многозадачное обучение [17, 18], аналогичное исходной работе. Таким образом, модель предсказывала не только заданное распределение электронов, но и изображения экранов без шума. Архитектура представлена на рис. 3.

Изображения с первого и второго экранов обрабатываются отдельно с использованием одинаковых блоков нейронных сетей, но с разными весами кодировщиков. Выделенные признаки объединяются. Затем применяется дополнительный кодировщик для агрегации и извлечения новых признаков. Далее данные конвертируются в формат, соответствующий 3D-сверткам, и обрабатываются декодировщиком, который предсказывает распределение. Также используются дополнительные декодеры для восстановления исходных изображений без шума, данные на вход принимаются после каждого кодировщика.

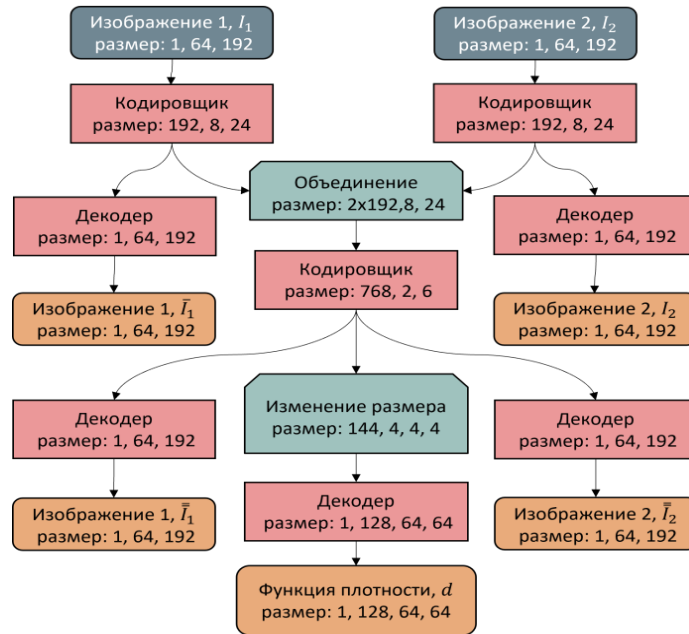


Рис. 3. Архитектура нейронной сети

Fig. 3. Neural network architecture

Общий функционал потерь определялся следующим образом:

$$Loss = Loss_d + 0.33 \times Loss_1 + 0.66 \times Loss_2$$

$$Loss_d = \frac{1}{N} \sum (d_i - f_i(E, \phi, \theta))^2$$

$$Loss_1 = \frac{1}{N} \sum (\bar{I}_{1,i} - I_{1,i}) + \frac{1}{N} \sum (\bar{I}_{2,i} - I_{2,i})$$

$$Loss_2 = \frac{1}{N} \sum (\bar{\bar{I}}_{1,i} - I_{1,i}) + \frac{1}{N} \sum (\bar{\bar{I}}_{2,i} - I_{2,i})$$

где  $d_i$  – предсказанная функция плотности,  $f_i(E, \phi, \theta)$  – истинная функция плотности,  $I_{1,i}$  и  $I_{2,i}$  – истинные синтетические изображения экранов, а  $\bar{I}_{1,i}, \bar{I}_{2,i}, \bar{\bar{I}}_{1,i}$  и  $\bar{\bar{I}}_{2,i}$  – предсказанные изображения экранов.

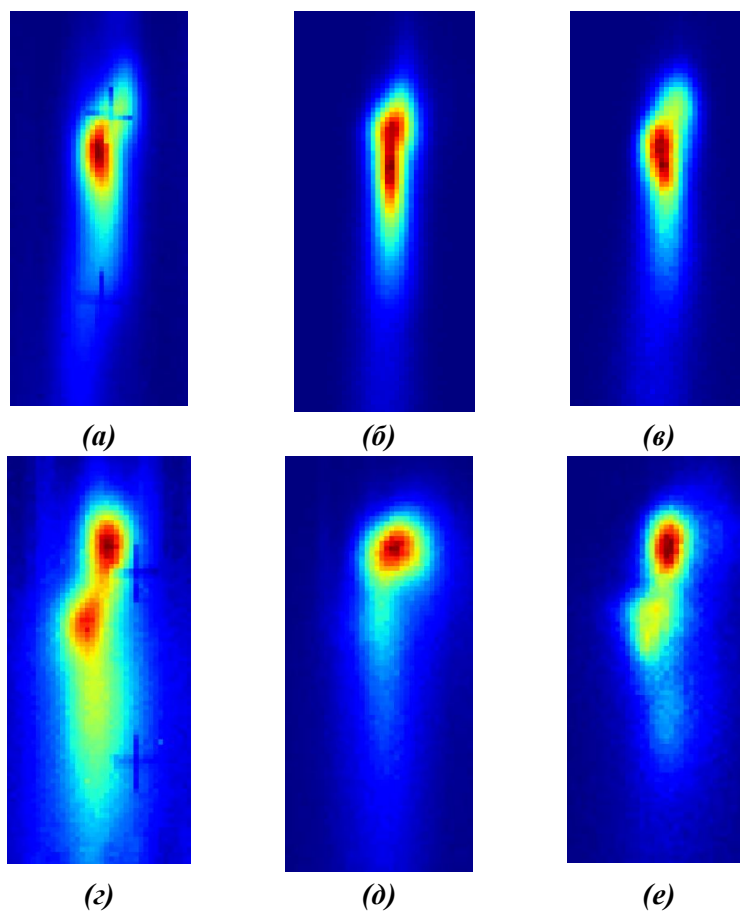
В данной работе анализируются два набора экспериментальных данных – TSMS-11 [15] и TSMS-18 [11], полученные в ходе исследований лазерно-плазменного ускорения электронов на установке PEARL. Данные были предварительно центрированы и нормализованы. Также изображения экранов содержат специальные метки – прямые линии, кресты и отверстия. Они использовались в качестве вспомогательной информации для калибровки в процессе проведения натурального эксперимента. Предварительно отверстия были удалены вручную, а соответствующие области – заменены средним значением изображения. Кроме того, для каждого изображения было вычтено среднее значение пикселей, а отрицательные значения были установлены в ноль, чтобы минимизировать влияние шума фона. Дополнительно для набора данных TSMS-18 применялась медианная фильтрация. В качестве синтетических данных  $D_s$  использовались две выборки по 50 000 примеров для каждого из наборов экспериментальных данных TSMS-11 и TSMS-18. Однако в процессе обучения использовались только 640 случайно выбранных примеров на каждой эпохе. Для выбора оптимальной модели в процессе обучения рассчитывалось суммарное косинусное сходство на экспериментальных данных.

Результаты работы базовой модели и после тонкой настройки представлены в табл. 1. Точность восстановления для каждого экрана значительно увеличилась, а средний прирост точности составил 8 %. Для первого экрана набора данных TSMS-11 точность возросла более чем на 20 %. В рамках данной задачи точное совпадение с экспериментальными данными невозможно из-за наличия шумов.

*Таблица 1.*  
Точность работы исходной модели и модели после тонкой настройки на двух экспериментальных наборах данных

*Table 1.*  
Accuracy of the original model and model after fine-tuning on two experimental datasets

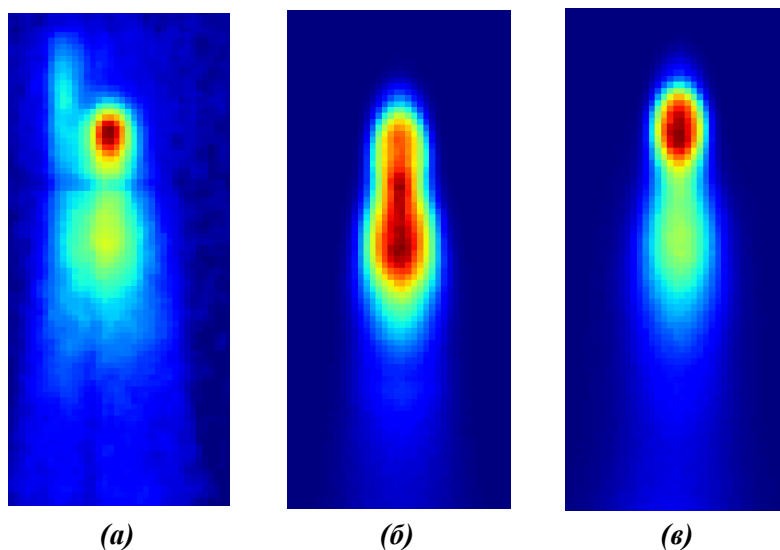
| Косинусное сходство                              | TSMS-11      |              | TSMS-18      |              |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
|  | Первый экран | Второй экран | Первый экран | Второй экран |
| Сверточная нейронная сеть                        | 0.658        | 0.894        | 0.897        | 0.731        |
| Сверточная нейронная сеть после тонкой настройки | 0.804        | 0.935        | 0.957        | 0.809        |



**Рис. 4.** Примеры экспериментальных и численных изображений для набора данных TSMS-11: (a) и (g) – экспериментальные изображения, (b) и (d) – изображения, полученные численным моделированием на основе функции плотности, восстановленной с помощью модели после тонкой настройки, (c) и (e) – изображения, полученные численным моделированием на основе функции плотности, восстановленной с помощью модели после тонкой настройки

**Fig. 4.** Examples of experimental and numerical images for the TSMS-11 dataset: (a) and (g) are experimental images, (b) and (d) are images obtained by numerical simulation based on the density function reconstructed by the model after fine-tuning, (c) and (e) are images obtained by numerical simulation based on the density function reconstructed by the model after fine-tuning

Примеры экспериментальных и предсказанных изображений с помощью двух разных методов для набора данных TSMS-11 представлены на рис. 4. После тонкой настройки сходство между изображениями значительно улучшилось. Например, на рис. 4 (г) наблюдается пучок с двумя центральными компонентами, что соответствует двум красным пятнам на экспериментальном изображении. На рис. 4 (д) для базовой модели второй пучок отсутствует, однако он появляется после тонкой настройки. Тем не менее, даже после дообучения модель некорректно оценивает амплитуду второй компоненты. Аналогичная информация представлена для набора данных TSMS-18 (рис. 5). После тонкой настройки модель значительно лучше оценивает соотношение амплитуд. Однако положение пучка немного теперь немного смещено вверх относительно верного ответа. Некоторые несоответствия между экспериментальными данными и предсказанными изображениями можно объяснить наличием шума и артефактов. В частности, уровень шума в наборе данных TSMS-18 достаточно высок, что влияет на качество предсказаний.



**Рис. 5. Примеры экспериментальных и численных изображений для набора данных TSMS-18:**  
 (а) – экспериментальные изображения, (б) – изображение, полученное численным моделированием на основе функции плотности, восстановленной с помощью модели после тонкой настройки,  
 (в) – изображение, полученное численным моделированием на основе функции плотности, восстановленной с помощью модели после тонкой настройки

**Fig. 5. Examples of experimental and numerical images for the TSMS-18 dataset:**  
 (a) experimental images, (b) image obtained by numerical simulation based on the density function reconstructed by the model after fine-tuning, (c) image obtained by numerical simulation based on the density function reconstructed by the model after fine-tuning

### Заключение

Предложен метод повышения точности восстановления распределения электронов с использованием тонкой настройки модели машинного обучения. Модель дообучается с помощью экспериментально обоснованного синтетического набора данных. Для этого предобученная модель предсказывает физические параметры на экспериментальных данных. Полученные предсказания затем применяются как входные параметры для численного моделирования. Новые генерируемые примеры имеют распределение, близкое к истинным аналогам в экспериментальных данных. В результате точность восстановления увеличивается в среднем на 8 %.

Необходимо отметить некоторые ограничения, связанные с предложенным методом. Одним из ключевых является точность предобученной модели. Если предсказанные значения физических параметров существенно отличаются от истинных, это может привести к снижению скорости сходимости алгоритма, а в некоторых случаях алгоритм может не сойтись вовсе.

Также наблюдается ухудшение точности метода на данных, не входящих в область интереса. Алгоритм переобучается под определенные данные, что связано с тем, что новые данные в процессе работы алгоритма сконцентрируются в определенной области. Однако это поведение является ожидаемым и не представляет проблему для практического использования, так как ключевой задачей является восстановление физических параметров именно для экспериментальных данных.

Предложенный метод предположительно может быть применен не только для рассмотренной, но и для других аналогичных задач с доступной численной моделью генерации синтетических данных.

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

*Авторы выражают благодарность за использование вычислительных ресурсов, предоставленных Университетом Лобачевского.*

### Библиографический список

1. **Li, Z.** Further development of the short-pulse Petawatt laser: trends, technologies, and bottlenecks / Z. Li, Y. Leng, R. Li // *Laser & Photonics Reviews*. – 2023. – Vol. 17, No. 1. – P. 2100705.
2. **Tajima, T.** Laser electron accelerator / T. Tajima, J. Dawson // *Physical Review Letters*. – 1979. – Vol. 43, No. 4. – P. 267.
3. **Poder, K.** Multi-GeV electron acceleration in wakefields strongly driven by oversized laser spots / K. Poder [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2024. – Vol. 132, No. 19. – P. 195001.
4. **Esarey, E.** Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators / E. Esarey, C.B. Schroeder, W.P. Leemans // *Reviews of Modern Physics*. – 2009. – Vol. 81, No. 3. – P. 1229-1285.
5. **Kostyukov I.Y.** Plasma-based methods for electron acceleration: current status and prospects / Kostyukov I.Y., Pukhov A.M. // *Physics-Uspekhi*. – 2015. – Vol. 58, No. 1. – P. 81-88.
6. **Soloviev, A.A.** Research in plasma physics and particle acceleration using the PEARL petawatt laser / A.A. Soloviev [et al.] // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. – 2024. – Vol. 194, No. 3. – P. 313-335.
7. **Blumenfeld, I.** Energy doubling of 42 GeV electrons in a metre-scale plasma wakefield accelerator / I.B. Blumenfeld, [et al.] // *Nature*. – 2007. – Vol. 445, No. 7129. – P. 741-744.
8. **Pollock, B.B.** Two-screen method for determining electron beam energy and deflection from laser wakefield acceleration / B.B. Pollock [et al.] // Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), 2009. – № LLNL-PROC-412609.
9. **Cha, H.J.** Absolute energy calibration for relativistic electron beams with pointing instability from a laser-plasma accelerator / H.J. Cha [et al.] // *Review of Scientific Instruments*. – 2012. – Vol. 83, No. 6.
10. **Hojbota, C.I.** Accurate single-shot measurement technique for the spectral distribution of GeV electron beams from a laser wakefield accelerator / C.I. Hojbota [et al.] // *AIP Advances*. – 2019. – Vol. 9, No. 8.
11. **Perevalov, S.E.** Experimental study of strongly mismatched regime of laser-driven wakefield acceleration / S.E. Perevalov [et al.] // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. – 2020. – Vol. 62, No. 9. – P. 094004.
12. **Soloviev, A.A.** Two-screen single-shot electron spectrometer for laser wakefield accelerated electron beams / A.A. Soloviev, M. V. Starodubcev, K. F. Burdonov [et al.] // *Review of Scientific Instruments*. – 2011. – Vol. 82, No. 4. 2011 Apr;82(4):043304. doi: 10.1063/1.3585862. Электронный ресурс. – URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21529002/> (дата обращения 15 декабря 2025).
13. **Bellman, R.** Dynamic programming / R. Bellman. – Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1957. – 339 p.
14. **Rodimkov, Yu.A.** [et al.]. 2026
15. **Soloviev A.A.** Fast electron generation using PW-class PEARL facility / A. A. Soloviev [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2011. – Vol. 653, No. 1. – P. 35-41.
16. **Kingma, D.P.** Adam: A method for stochastic optimization / D.P. Kingma, J. Ba // arXiv preprint arXiv:1412.6980. – 2014.
17. **Caruana, R.** Multitask learning / R. Caruana // *Machine Learning*. – 1997. – Vol. 28, No. 1. – P. 41-75.

18. **Zhang, Y.** A survey on multi-task learning / Y. Zhang, Q. Yang // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2021. – Vol. 34, No. 12. – P. 5586-5609.

### References

1. Li Z., Leng Y., Li R. Further development of the short-pulse Petawatt laser: trends, technologies, and bottlenecks. *Laser & Photonics Reviews*. 2023; 17(1): 2100705.
2. Tajima T, Dawson JM. Laser electron accelerator. *Physical Review Letters*. 1979; 43(4): 267.
3. Poder K., et al. Multi-GeV electron acceleration in wakefields strongly driven by oversized laser spots. *Physical Review Letters*. 2024; 132(19): 195001.
4. Esarey E., Schroeder C.B., Leemans W.P. Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators. *Reviews of Modern Physics*. 2009; 81(3): 1229-1285.
5. Kostyukov I.Y., Pukhov A.M. Plasma-based methods for electron acceleration: current status and prospects. *Physics-Uspokhi*. 2015;58(1):81-88.
6. Soloviev A.A., et al. Research in plasma physics and particle acceleration using the PEARL petawatt laser. *Uspokhi Fizicheskikh Nauk*. 2024; 194(3): 313-335.
7. Blumenfeld I., et al. Energy doubling of 42 GeV electrons in a metre-scale plasma wakefield accelerator. *Nature*. 2007; 445(7129): 741-744.
8. Pollock B.B., et al. Two-screen method for determining electron beam energy and deflection from laser wakefield acceleration. Livermore (CA): Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL); 2009. Report No.: LLNL-PROC-412609.
9. Cha H.J., et al. Absolute energy calibration for relativistic electron beams with pointing instability from a laser-plasma accelerator. *Review of Scientific Instruments*. 2012; 83(6).
10. Hojbota C.I., et al. Accurate single-shot measurement technique for the spectral distribution of GeV electron beams from a laser wakefield accelerator. *AIP Advances*. 2019; 9(8).
11. Perevalov S.E., et al. Experimental study of strongly mismatched regime of laser-driven wakefield acceleration. *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2020; 62(9):094004.
12. Soloviev A.A., Starodubtsev M.V., Burdonov K.F., et al. Two-screen single-shot electron spectrometer for laser wakefield accelerated electron beams. *Review of Scientific Instruments*. 2011;82(4):043304. doi: 10.1063/1.3585862. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21529002/> [accessed 2025 Dec 15].
13. Bellman R. *Dynamic programming*. Princeton (NJ): Princeton University Press; 1957. 339 p.
14. Rodimkov Yu.A., et al. 2026
15. Soloviev A.A., et al. Fast electron generation using PW-class PEARL facility. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2011; 653(1): 35-41.
16. Kingma D.P., Ba J. Adam: a method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980. 2014.
17. Caruana R. Multitask learning. *Machine Learning*. 1997; 28(1): 41-75.
18. Zhang Y., Yang Q. A survey on multi-task learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2021; 34(12): 5586-5609.

**Дата поступления  
в редакцию: 03.03.2026**

**Дата принятия  
к публикации: 07.04.2026**

УДК 519.6

EDN RNPALO

## ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ИНТЕРЕСАХ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВНЕШНЕЙ АЭРОДИНАМИКИ

**А.В. Саразов**

ORCID: 0000-0002-1143-8978 e-mail: alex\_sar@bk.ru

Российский федеральный ядерный центр –

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
Саров, РоссияНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
Нижний Новгород, Россия**А.С. Козелков**

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

Российский федеральный ядерный центр –

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
Саров, РоссияНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
Нижний Новгород, Россия**А.В. Корнев**

ORCID: 0000-0002-4056-8448 e-mail: avkorn@okb.sukhoi.org

ПАО «Объединенная авиастроительная корпорация»

Москва, Россия

Исследуются вопросы применения математического моделирования в авиационной промышленности. Современные методы расчета позволяют перейти от моделирования отдельных элементов конструкции планера к полномасштабному моделированию сложных режимов эксплуатации реального самолета. Совокупность методов и модулей расчета формируют комплексную математическую модель, которая является цифровым двойником летательного аппарата (ЛА). Применение данной концепции дает возможность на новом качественном уровне проанализировать работу ключевых систем и механизмов для интересующих сценариев функционирования самолета без привлечения дорогостоящих натуральных экспериментов. Главный акцент делается на применении комплексной математической модели – концепции цифрового двойника для определения аэродинамических характеристик современного маневренного самолета при выполнении фигур высшего пилотажа. Ключевыми элементами являются методики расчета аэродинамических характеристик ЛА на деформируемых сетках и сетках с перекрытиями. На примере решения задач выхода из фигуры «Петля» и выполнения фигуры «Кобра» показаны изменения ключевых характеристик самолета вследствие функционирования аэродинамических поверхностей и деформации планера. Полученные результаты показывают применимость предложенной концепции «виртуальный самолет» для широкого круга задач авиационной промышленности.

**Ключевые слова:** пакет программ «Логос»; система уравнений Навье-Стокса; математическое моделирование; летательный аппарат; виртуальный самолет; цифровой двойник; дискретная модель; аэродинамические характеристики; сетки с перекрытиями; деформируемые сетки.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Саразов, А.В. Применение комплексной математической модели летательного аппарата в интересах решения задач внешней аэродинамики / А.В. Саразов, А.С. Козелков, А.В. Корнев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 2. С. 17-29. EDN: RNPALO

## APPLICATION OF AIRCRAFT COMPREHENSIVE MATHEMATICAL MODEL TO ADDRESS EXTERNAL AERODYNAMICS PROBLEMS

**A.V. Sarazov**

ORCID: **0000-0002-1143-8978** e-mail: **alex\_sar@bk.ru**

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

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

**A.S. Kozelkov**

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

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

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

**A.V. Kornev**

ORCID: **0000-0002-4056-8448** e-mail: **avkorn@okb.sukhoi.org**

Public Joint Stock Company «United Aircraft Corporation»  
*Moscow, Russia*

**Abstract.** The article examines the application of mathematical modeling in the aircraft industry. Modern calculation methods make it possible to move from simulation of individual elements of the plane's structure to full-scale simulation of complex operating modes of a real aircraft. The combination of calculation methods and modules forms a comprehensive mathematical model which is a digital twin of an aircraft. The application of this concept allows to analyze the operation of key systems and mechanisms for aircraft operating scenarios at a new qualitative level without the use of expensive full-scale experiments. The main focus in the article is on the application of a comprehensive mathematical model – a digital twin to determine the aerodynamic characteristics of a modern maneuverable aircraft when performing aerobatics. The key elements are the methods for calculating the aerodynamic characteristics of aircraft on deformable grids and grids with overlaps. Changes in the key aircraft characteristics due to the operation of aerodynamic surfaces and airframe deformation are shown on the example of solving the problems of exiting a loop maneuver and performing the Cobra maneuver. The results demonstrate the applicability of the proposed «virtual aircraft» concept for a wide range of tasks in aircraft industry.

**Key words:** Logos software package; Navier-Stokes equations; mathematical modeling; aircraft; virtual aircraft; digital twin; discrete model; aerodynamic characteristics; grids with overlaps; deformable grids.

**FOR CITATION:** A.V. Sarazov, A.S. Kozelkov and A.V. Kornev. Application of aircraft comprehensive mathematical model to address external aerodynamics problems. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 2. Pp. 17-29. EDN: RNPALO

### Введение

Математическое моделирование с успехом используется в различных отраслях промышленности. Применительно к авиастроению главной целью создания и совершенствования методов моделирования различных режимов эксплуатации техники является корректное отражение явлений и процессов, возникающих в реальной работе летательного аппарата (ЛА). В настоящее время в авиационной технике математическое моделирование успешно применяется [1] для создания комплексной математической модели ЛА, т.е. *цифрового двойника самолета*. В дальнейшем под понятием «виртуальный самолет» (ВС) понимается совокупность математических моделей, взаимодействующих между собой для максимально подробного описания штатной или аварийной ситуации. Разработка ВС представляет собой эволюционный процесс, в котором происходит постепенное усложнение как исследуемых конструкций, так и физических постановок задач вплоть до всеобъемлющего моделирования полета самолета.

Требования, предъявляемые к концепции цифрового двойника, влияют на развитие методов вычислительной аэродинамики. Поэтому необходимо совершенствование численных методов, которые позволяли бы включить в рассмотрение смежные области и специфические особенности режимов эксплуатации.

Максимально точные результаты моделирования позволяют лучше понять физические аспекты явлений, возникающих при эксплуатации ЛА, что дает возможность учесть полученный опыт и знания при проектировании перспективных образцов техники. Поэтому в настоящее время растет потребность в решении задач, связанных с движением отдельных узлов и механизмов ЛА в процессе полета. Изменение формы и положения отдельных элементов конструкции, как правило, связано с переходными процессами, возникающими при маневрировании самолета. Это, в свою очередь, влияет на выбор методов математического моделирования. Описание ЛА цифровым двойником зависит не только от выбора того или иного метода моделирования, но и от дискретного представления объекта исследования. Промышленно-ориентированные задачи характеризуются должной степенью подробности дискретных моделей, что требует использования в численном эксперименте вычислительных машин с высоким уровнем параллелизма. По этой причине методы и алгоритмы моделирования должны отличаться вычислительной эффективностью.

В настоящей работе представлены математические методы и модели, примененные для создания комплексной математической модели современного маневренного ЛА. Приводятся дискретные модели и результаты моделирования нескольких реальных режимов эксплуатации современного маневренного самолета.

## 1. Математические методы и модели

### 1.1. Основные уравнения

Ключевым элементом виртуального самолета является набор физико-математических моделей и методов. В задачах численной газовой динамики для описания течения вязкого турбулентного газа применяется система уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, которая имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \\ \frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla(\tau_\mu + \tau_t) \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u} H) = \nabla[\vec{u}(\tau_\mu + \tau_t) - (\vec{q}_\mu + \vec{q}_t)] \end{cases}, \quad (1)$$

где знаки осреднения опущены и применяются общепринятые обозначения физических величин, такие как:  $t$  – время,  $\rho$  – плотность газа,  $\vec{u} = \{u, v, w\}$  – вектор скорости,  $p$  и  $T$  – статические давление и температура соответственно,  $E$  и  $H$  – полные энергия и энтальпия соответственно,  $\tau_\mu$  и  $\tau_t$  – молекулярная и турбулентная составляющие тензора касательных напряжений соответственно,  $q_\mu$  и  $q_t$  – молекулярная и турбулентная составляющие плотности теплового потока соответственно.

В разработанной концепции ВС в качестве среды функционирования рассматривается газ близкий по характеристикам к обычному воздуху. Данное обстоятельство позволяет рассматривать данную среду как ньютоновскую жидкость, для которой напряжение сдвига пропорционально скорости сдвига. Связь между плотностью теплового потока и градиентом температуры в изотропных материалах определяется на основе закона Фурье [2]. В общем случае система уравнений Навье-Стокса является системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, что требует начальных и граничных условий для корректной постановки задачи [3]. Система уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, содержит члены, представляющие собой некую корреляцию между флуктуацией и средней скоростью потока, которая в общем случае неизвестна. Для решения данной задачи применяются различ-

ные модели турбулентности, замыкающие систему уравнений Навье-Стокса. Также существуют модели турбулентности, позволяющие моделировать лишь малые турбулентные вихри, когда большие рассчитываются непосредственно из уравнений Навье-Стокса [4, 5].

### Дискретизация основных уравнений на основе метода конечных объемов

К настоящему времени решение уравнений Навье-Стокса в общем виде отсутствует, в связи с чем в качестве подходов к решению задач тепломассопереноса в инженерной практике применяются различные численные методы. Исторически первым был метод конечных разностей [6], который ввиду простоты мог применяться лишь на задачах с простыми геометрическими моделями. Дальнейшие исследования в части построения устойчивых схем расчета привели к появлению методов конечных элементов [7]. Однако сложность реализации ряда граничных условий, а также повышенная численная сложность и требования к аппаратным ресурсам привели к тому, что в инженерных пакетах программ для моделирования тепломассопереноса чаще применяется метод конечных объемов [8]. Применительно к задачам авиационной промышленности базой метода конечных объемов является интегральная формулировка уравнений Навье-Стокса, что обеспечивает консервативность физических величин. Это означает гарантии неизменности массы, импульса и энергии, что критически важно для моделирования процессов, характеризующихся наличием ударных волн.

Основная идея метода конечных объемов состоит в дискретизации пространства, окружающего объект исследования. Это подразумевает генерацию расчетной сетки, где ячейками могут быть в общем случае произвольные многогранники. Данное обстоятельство является достоинством метода, поскольку позволяет проводить геометрически сложные моделирования. Сравнительная простота, гибкость, а также консервативность сделали данный метод популярным среди разработчиков и исследователей. Поэтому он применяется в комплексной математической модели ЛА. Часть типовых сценариев эксплуатации авиационной техники подразумевает движение аэродинамических плоскостей ЛА, что требует отражения в математических моделях цифрового двойника. Поэтому методы численного моделирования включают в себя подходы для описания течения потока вблизи подвижных границ. Численное решение нестационарных задач с подвижными границами базируется на модификации исходной системы уравнений Навье-Стокса:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta V(t)} W dV + \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{\Delta V(t)} W dV + \oint_{\Delta S(t)} (F - \vec{x}W - G) dS = \int_{\Delta V(t)} R dV, \quad (2)$$

где система уравнений вида (1) представлена в векторной форме с использованием общепринятых обозначений:  $W$ ,  $F$ ,  $G$  – вектора консервативных переменных, конвективных и диффузионных потоков соответственно, вектор  $R$  соответствует дополнительным источникам. Ниже приведены выражения ранее упомянутых векторов:

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

где  $u_n$  – нормальная скорость на грани,  $q$  – тепловой поток,  $\tau_{ij}$  – тензор вязких напряжений,  $\tau$  – псевдовремя,  $\vec{x}$  – скорость движения грани.

Движение грани формально нарушает порядок аппроксимации численных схем вида (2), (3), что потенциально может привести к снижению точности результатов моделирования. Поэтому на вектор скорости движения грани  $\vec{x}$  накладывается условие, связанное с сохранением консервативности в каждой ячейке расчетной сетки [9].

Численная схема расчета для задач с подвижными границами основывается на применении теоремы о среднем для приведенной выше системы уравнений. Тогда дискретный аналог уравнения (2) может быть представлен следующим образом:

$$\left(\frac{2V_P^{n+1}-V_P^n}{\Delta t} + \frac{V_P^{n+1}}{\Delta t}\right) \Delta W_P^{\gamma+1} + \sum_{f=1}^N \left[\frac{\partial F}{\partial W} - \vec{x} - \frac{\partial G}{\partial W}\right]_f^{\gamma} \Delta W_P^{\gamma+1} S_f - \frac{\partial R}{\partial W_P} \Delta W_P^{\gamma+1} V_P^{\gamma+1} = Res(W), \quad (4)$$

где правая часть выражения является невязкой уравнений баланса:

$$Res(W) = (2V_P^{n+1} - V_P^n) \frac{W_P^n - W_P^{\gamma}}{\Delta t} - \sum_{f=1}^N [F - G]_f^{\gamma} \Delta S_f + R_P^{\gamma} V_P^{n+1}, \quad (5)$$

где  $V_P^n, V_P^{n+1}$  – объем ячейки  $P$  на моменты времени  $t_n, t_{n+1}$  соответственно.

Критически важными элементами численной схемы вида (4), (5) являются методы расчета конвективных и диффузионных потоков через грань контрольного объема, поскольку корректное описание потоков напрямую влияет на точность получаемых результатов. Для расчета конвективных потоков в модели ВС применяются схемы Роу [10] и схема адвекции AUSMPW [11].

### 1.3. Подходы для изменения дискретной модели

Дополнительно к представленным численным схемам (4), (5) и методам расчета потоков в цифровом двойнике используются различные подходы к изменению расчетной сетки ввиду движения границ. Среди множества способов модификации дискретной модели следует выделить методики расчета на деформируемых сетках [12] и сетках с перекрытиями [13, 14].

Методики с применением алгоритмов деформирования сетки, или *морфинг*, в процессе расчета позволяют сохранить такие ключевые характеристики сетки, как количество узлов, граней, ячеек. Важным свойством подобных методов является сохранение отношения соседства ячеек через грань, узлов через ребро, что позволяет создавать эффективные методики расчета. Методы морфинга расчетной сетки должны отличаться сохранением качества деформированной дискретной модели, особенно в призматическом слое, по причине того, что течение в пограничном слое напрямую влияет на весь характер течения. Метод интерполяции обратными взвешенными расстояниями – *Inverse Distance Weighting (IDW)* – позволяет изменить положение узлов расчетной сетки, сохраняя ортогональность призматического слоя. для вычисления перемещений внутренних узлов расчетной сетки используется интерполяционная функция смещения граничных вершин [12]:

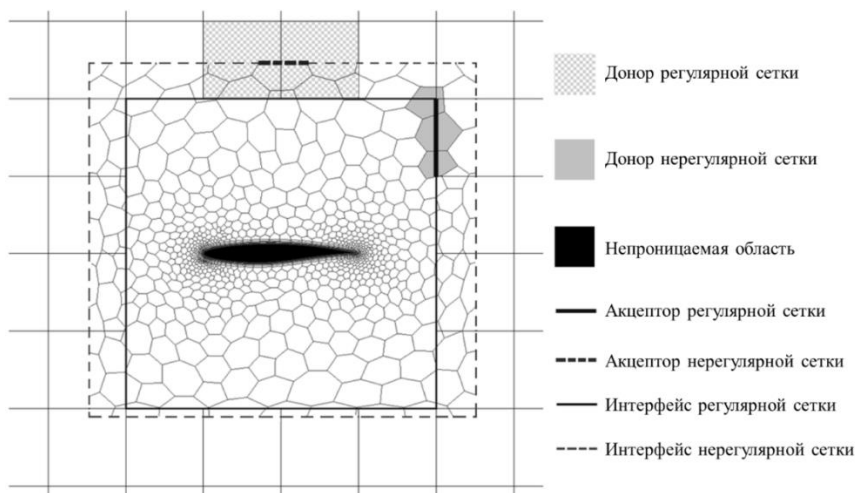
$$\vec{s}(\vec{r}) = \frac{\sum w_j(\vec{r}) \vec{s}_j}{\sum w_j(\vec{r})}, \quad (6)$$

$$w_j(\vec{r}) = \left\| \vec{r} - \vec{r}_{b_j} \right\|^p, p < 0. \quad (7)$$

Здесь  $\vec{r} = (x, y, z)$  – радиус-вектор внутреннего узла сетки,  $\vec{r}_{b_j}$  – радиус-вектор узла  $b_j$  на подвижной границе,  $w_j(\vec{r})$  – весовая функция,  $\vec{s}_j$  – перемещение узла с индексом  $j$  на границе,  $p$  – некоторая константа. Перемещение любого узла с координатами  $(x, y, z)$  определяется на основе перемещений всех узлов, принадлежащих к фиксированным и подвижным границам.

Применение описанной методики позволяет сохранить топологию сеточной (дискретной) модели, так как меняются лишь координаты узлов сетки. Это позволяет полностью сохранить отношение соседства через грань между ячейками, что дает возможность выполнять расчет, не меняя модель памяти вычислительного алгоритма. Представленное выше деформирование сетки имеет свои особенности, которые приходится учитывать в процессе решения реальных задач. В процессе изменения расчетной сетки неизбежна деградация качества ячеек. Поэтому в тех случаях, когда изменение расчетной сетки гарантированно приведет к вырождению ячеек, а, следовательно, и к снижению точности результатов, устойчивости численного расчета, следует применить технологию сеток с перекрытиями. Данный метод является разумным компромиссом между точностью моделирования и нагрузкой на вычислительные ресурсы. Совмещение отдельных сеток и обеспечение их взаимодействия является центральной задачей указанного метода. Расчет на перекрывающихся сетках лишен ограничений на движение отдельно взятых границ, тем самым позволяет свести к минимуму вероятность катастрофического ухудшения качества расчетной сетки.

Метод расчета на сетках с перекрытиями при подготовке задачи требует определения нового граничного условия, такого как интерфейс. Интерфейсы обеспечивают связь и функционирование отдельных сеток как единого целого. Правильное определение интерфейсов напрямую влияет на точность результатов моделирования. Расположение интерфейсов в пространстве является входной информацией для метода сопряжения расчетной сетки, который состоит из этапа определения множества ячеек пригодных для расчета и этапа генерации интерполяционного шаблона между независимыми расчетными сетками (рис. 1).



**Рис. 1. Пример сетки с перекрытиями**

**Fig. 1. Example of a grid with overlaps**

Качество получаемого решения, в первую очередь, зависит от свойств методов реконструкции данных на интерфейсах. С вычислительной точки зрения, подходы, гарантирующие консервативность реконструкции полей на интерфейсах, весьма дорогостоящие, и применение их для произвольных нерегулярных сеток затруднительно. Следует отметить, что в современных инженерных методиках, как правило, для повышения точности результатов моделирования используют алгоритмы интерполяции повышенного порядка [15].

Следовательно, для более полного описания процессов функционирования ЛА в полете модель ВС должна включать в себя описанные методики расчета на неструктурированных деформируемых сетках и сетках с перекрытиями с возможностью совместного использования. Данный подход к моделированию позволяет существенно расширить класс решаемых задач авиационной промышленности и сократить количество натурных экспериментов.

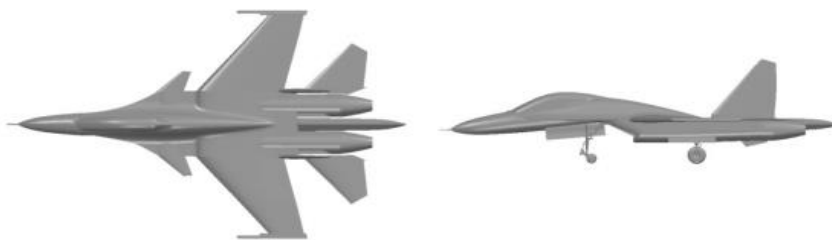
## **2. Цифровой двойник современного маневренного самолета**

### **2.1. Дискретная модель цифрового двойника**

В качестве объекта исследования выбрана модель маневренного ЛА [16] (рис. 2). В рамках исследования применимости виртуальной модели рассматривались два режима эксплуатации ЛА: выход из фигуры «Петля» и выполнение фигуры «Кобра». Выбранные сценарии определяет требуемый состав математических моделей для выполнения моделирования в 3D: геометрического, аэродинамического, газодинамического, кинематического, упруго-массового и 1D-моделирования: системы управления ЛА (органами и агрегатами, включая силовую установку с панелями воздухозаборников и соплами).

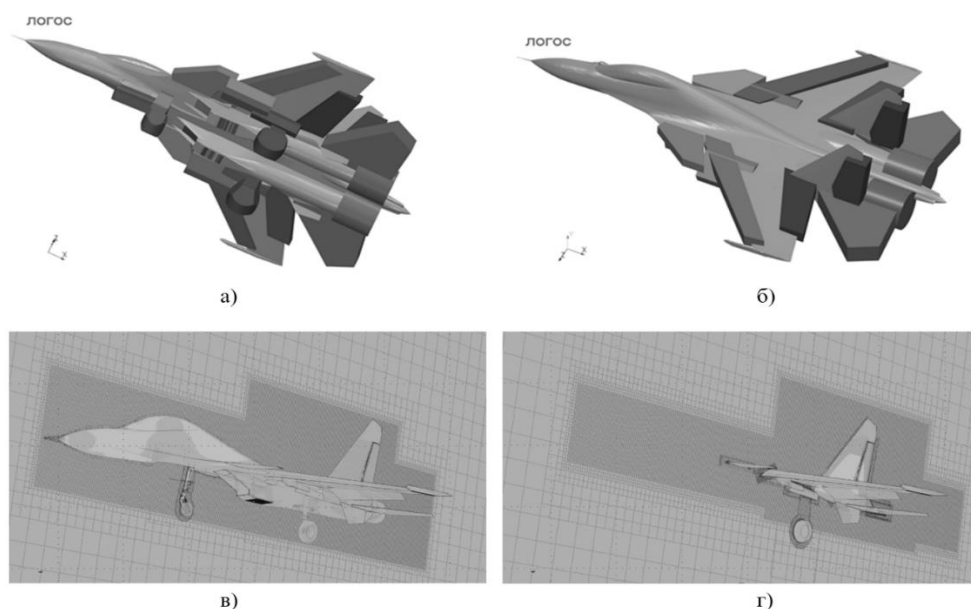
Для реализации цифрового двойника ЛА на основе исходных данных разработаны подробные и геометрические модели (рис. 3). Представлен общий вид расчетной сетки вблизи планера (рис. 3а, 3б), где каждый подвижный орган управления представлен отдельной дискретной моделью вместе с интерфейсными границами. Генерация неструктурированной рас-

четной сетки, состоящей из усеченных шестигранников, выполнена в препроцессоре ПП Логос [17, 18]. Для численных экспериментов построено 48 расчетных сеток, которые объединены в одну общую сетку с перекрытиями, состоящую из ~20 млн усеченных ячеек.



**Рис. 2. Геометрическая модель современного маневренного самолета**

**Fig. 2. Modern maneuverable aircraft geometric model**



**Рис. 3. Разработанная дискретная модель:**

- а) вид снизу; б) вид сверху; в) сечение в плоскости симметрии;  
г) сечение в плоскости симметрии левого шасси*

**Fig. 3. The developed discrete model:**

- a) bottom view; б) top view; в) section in the plane of symmetry;  
г) section in the plane of symmetry of the left chassis*

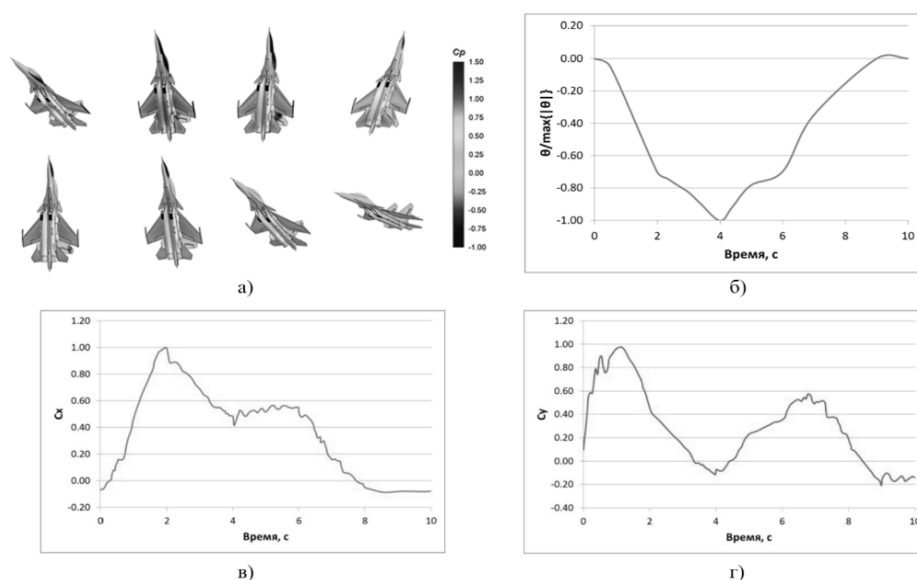
Моделирование выбранных сценариев потребовало применения метода расчета на сетках с перекрытиями, а также метода расчета на деформируемых сетках. Все представленные результаты расчетов получены в ПП Логос [17].

## 2.2. Фигура пилотажа «Кобра»

Современные ЛА отличаются высокой маневренностью с возможностью осуществления фигур высшего пилотажа, характеризующихся сложной динамикой полета и точной координацией управления. Возможность выполнения таких фигур обусловлена не только опытом пилота, но и современными технологиями: высокоточными системами авионики, мощными двигателями, средствами прогноза и нивелирования ухудшения аэродинамического качества самолета. Фигура высшего пилотажа «Кобра» представляет собой кратковременный выход самолета на закритические углы атаки, совместно с резким снижением скорости полета

[19]. Ключевыми элементами управления являются цельноповоротное горизонтальное оперение (ЦПГО) и переднее горизонтальное оперение (ПГО), движение которых в начале маневра приводит к резкому увеличению угла тангажа, далее – к поддержанию пространственной ориентации ЛА и в конечном итоге к выходу в горизонтальный полет. Движение органов управления в рамках разработанного ВС осуществлялось подключением стороннего модуля [20]. В исходной геометрии ЛА шасси находится в выпущенном положении, створки шасси открыты. Для моделирования горизонтального полета необходимо убрать шасси и их створки. Эта операция выполняется на основе алгоритмов движения сеток [12]. Дополнительно к ЦПГО и ПГО выполнение фигуры «Кобра» требует работы силовой установки в номинальном режиме с неработающими створками подпитки, убранными панелями воздухозаборника и сжатыми соплами.

Численное моделирование фигуры «Кобра» состояло из двух этапов. На первом этапе получено стационарное решение, соответствующее горизонтальному полету. На втором этапе выполнено моделирование движения аэродинамических плоскостей. На рис. 4 приведено распределение коэффициента давления на поверхности ЛА, изменение угла тангажа и аэродинамические характеристики (АДХ) в процессе выполнения фигуры «Кобра»<sup>1</sup>.



**Рис. 4. Результаты моделирования фигуры пилотажа «Кобра»:**

*а) распределение коэффициента давления на поверхности ЛА; б) изменение угла тангажа ЛА; в) коэффициент лобового сопротивления; г) коэффициент подъемной силы*

**Fig. 4. Results of the Cobra maneuver simulation:**

*a) distribution of the pressure coefficient on the aircraft surface; б) change in the aircraft pitch angle; в) drag coefficient; г) lift coefficient*

На первом этапе ЦПГО отклонено в максимальное положение для увеличения подъемной силы и удерживается в данном положении (рис. 4а). На завершающем этапе ЦПГО отклонено в отрицательном направлении для динамического торможения. На рис. 4б-г приведены графики изменения угла тангажа ЛА и АДХ с течением времени.

Представленные результаты позволяют проследить изменение АДХ ЛА в зависимости от угла тангажа в процессе выполнения фигуры высшего пилотажа. Анализ данных демонстрирует применимость разработанной комплексной математической модели ЛА для моделирования выполнения фигуры «Кобра» при различных параметрах полета и компоновки.

<sup>1</sup> По согласованию с ПАО «ОАК» «ОКБ Сухого» результаты расчетов приводятся без величин для обезразмеривания, таких как: напор, площадь Миделя, линейные размеры ЛА.

### 2.3. Выход из фигуры «Петля»

Качественное описание АДХ ЛА, выполняющего ту или иную фигуру пилотажа, требует учета деформирования конструкции под действием аэродинамических нагрузок. Наибольшее воздействие на планер оказывается в момент выхода из «Петли». Поскольку данная задача является междисциплинарной, для ее решения применяется связанное моделирование [21]. Это подразумевает применение дополнительного расчетного модуля. Для моделирования деформации конструкции самолета ввиду действия аэродинамических нагрузок в качестве модуля расчета напряженно-деформированного состояния применялся ПП Логос.Прочность. Взаимодействие ПП Логос.Аэрогидромеханика и Логос.Прочность осуществлено в ПП Логос.Платформа [22]. С его помощью в каждом модуле сформирована интерфейсная поверхность, посредством которой обеспечивается взаимодействие расчетных модулей аэродинамики и напряженно-деформированного состояния на каждый шаг по времени. Моделирование выхода ЛА из «Петли» проводится в два этапа, первый из которых – предварительный стационарный расчет в модуле Логос.Аэрогидромеханика для получения начального распределения полей. На втором этапе совместно с методами расчета на сетках с перекрытиями проводится расчет на деформируемых дискретных моделях. Используемая модель для расчета напряженно-деформированного состояния содержит 4000 оболочечных и 1700 балочных элементов. На рис. 5 представлена конечно-элементная модель самолета.

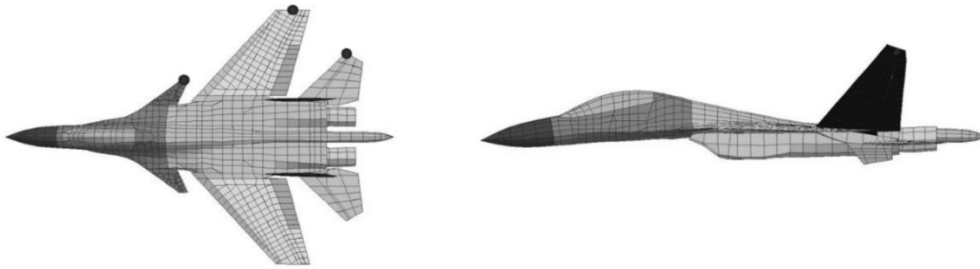


Рис. 5. Конечно-элементная модель современного маневренного самолета

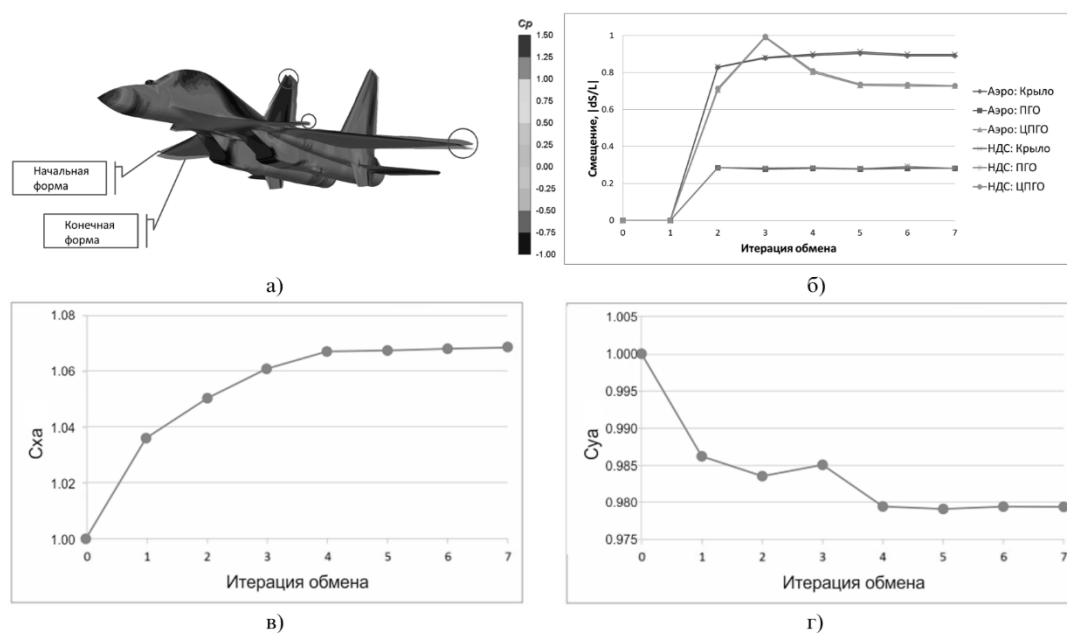
Fig. 5. Finite element model of a modern maneuverable aircraft

Модели материалов рассматривались в упругом приближении. Напряженно-деформированное состояние рассчитывалось статическим решателем Логос.Прочность. Для лучшего согласования постановки задачи с условиями эксперимента применялась инерциальная нагрузка. Выход из фигуры «Петля» сопровождается деформацией планера ввиду действующих на ЛА аэродинамических нагрузок. Поэтому интерфейсными поверхностями между расчетными модулями являются поверхности планера каждой дискретной модели. Поскольку наибольшим искажениям подвержены крылья, ЦПО, ЦПГО и вертикальное оперение (ВО), поверхностные сетки расчетных методик должны хорошо согласоваться друг с другом для указанных элементов управления. После приведения конфигурации ЛА в полетный режим проводился связанный расчет, в котором применялась стандартная модель атмосферы для характерной высоты и числа Маха. В численном эксперименте оценивается отклонение крыла, ЦПО, ЦПГО в состоянии аэроупругого равновесия. Для качественного анализа смещения частей планера рассматриваются контрольные узлы (рис. 5).

На рис. 6 приведены результаты моделирования выполнения ЛА выхода из фигуры пилотажа «Петля»<sup>1</sup>. Параметр  $L$  – максимальное смещение рассматриваемых контрольных точек (рис. 6б) на поверхности ЛА. Анализ полученных результатов показывает, что аэроупругое равновесие достигнуто через шесть шагов обмена. Изменение координат на поверхностях ЛА, принадлежащих разным расчетным модулям (Логос.Аэрогидромеханика и Логос.Прочность),

<sup>1</sup> По согласованию с ПАО «ОАК» «ОКБ Сухого», результаты расчетов приводятся без величин для обезразмеривания, таких как: напор, площадь Миделя, линейные размеры ЛА.

хорошо согласуется между собой. Как и следовало ожидать, максимальному отклонению подвержено крыло, которое принимает наибольшие нагрузки по сравнению с прочими участками планера.



**Рис. 6. Результаты моделирования выхода из фигуры пилотажа «Петля»:**

*а) распределение коэффициента давления на поверхности ЛА; б) относительные смещения контрольных точек; в) коэффициент лобового сопротивления; г) коэффициент подъемной силы*

**Fig. 6. Results of the exit from the loop maneuver simulation:**

*a) distribution of the pressure coefficient on the aircraft surface; б) relative displacements of control points; в) drag coefficient; г) lift coefficient*

Деформация маневренного самолета влияет на его интегральные аэродинамические характеристики. Рис. бв, бг демонстрируют ухудшение аэродинамического качества ЛА вследствие приложения нагрузок набегающего потока на упругую конструкцию планера ( $C_{xa}$  увеличилось на 7 %, а  $C_{ya}$  уменьшилось на 2 %). Это еще раз подтверждает важность учета в ходе моделирования изменения формы обтекаемого объекта для правдоподобного описания протекающих процессов.

Таким образом, разработанный ВС позволяет получить прогноз относительно деформации и АДХ в случае приложения аэродинамических нагрузок к планеру для различных параметров начальных и граничных условий.

### Заключение

Предложенные в настоящей работе математические модели и методы расчета составляют основу концепции ВС, предназначенной для высокоточного моделирования ЛА. Применение современных подходов к моделированию современных маневренных ЛА дает возможность выявить недостатки существующих образцов техники без проведения дорогостоящих натурных экспериментов, а также снизить вероятность их появления уже на этапе проектирования перспективных образцов авиационной техники. Демонстрация применимости концепции ВС для авиационной промышленности показана на типовой модели современного маневренного самолета. В качестве характерных режимов эксплуатации ЛА выбраны два сценария функционирования, а именно: выход из фигуры «Петля» и выполнение фигуры «Кобра». Численное моделирование каждого из сценариев потребовало определенное сочетание аэродина-

мических, прочностных, кинематических и управляющих математических моделей. Результаты расчетов по определению АДХ при выполнении указанных фигур позволили на новом качественном уровне оценить аэродинамическое качество ЛА.

Изложенные подходы к моделированию могут быть полезны для широкого класса задач численной аэродинамики с подвижными границами и позволяют повысить достоверность результатов математического моделирования, т.е. приблизиться к пониманию понятия «виртуальный самолет». Разработанные численные методы и алгоритмы внедрены в пакет программ *Логос* [17] и апробированы на ряде задач авиационной промышленности [19].

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

### Библиографический список

1. **Погосян, М.А.** Применение отечественных суперкомпьютерных технологий для создания перспективных образцов авиационной техники / М.А. Погосян, Е.П. Савельских, Р.М. Шагалиев [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2013. – Т. 2. – С. 3-17.
2. **Ландау, Л.Д.** Теоретическая физика: гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – Т. VI. – 736 с.
3. **Ferziger, J.H.** Computational methods for fluid dynamics / J.H. Ferziger, M. Peric. – 3rd ed. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2002. – 423 p.
4. **Spalart, P.R.** Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach / P.R. Spalart, W.H. Jou, M. Strelets, S.R. Allmaras // Proceedings of first AFOSR international conference on DND/LES. – 1997.
5. **Travin, A.** Physical and numerical upgrades in the detached-eddy simulation of complex turbulent flows / A. Travin, M. Shur, M. Strelets, P.R. Spalart // Fluid Mechanics its Application, Vol. 65. Advances in LES of Complex Flows / Editors R. Friedrich, W. Rodi. – Proceedings of Euromech Coll. 412. – Boston; London: Kluwer, 2002. – P. 239-245.
6. **Strikwerda, J.C.** Finite Difference Schemes and Partial Differential Equations / J.C. Strikwerda // Society for Industrial and Applied Mathematics. – 1998. – Vol. 88.
7. **Zienkiewicz, O.C.** Finite Element Method / O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. – Butterworth-Heinemann Limited, 2000. – 1440 p.
8. **Jasak, H.** Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flow: thesis submitted for the degree of doctor / H. Jasak. – London: Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, 1996.
9. **Farhat, C.** The Discrete Geometric Conservation Law and the Nonlinear Stability of ALE Schemes for the Solution of Flow Problems on Moving Grids / C. Farhat, P. Geuzaine, C. Grandmonty // Journal of Computational Physics. – 2001. – Vol. 174, № 2. – P. 669-694.
10. **Roe, P.L.** Introduction to computational fluid dynamics / P.L. Roe // Lecture Notes to a Short Course at Cranfield Institute of Technology. – May 27-29, 1986.
11. **Kim, K.H.** Methods for the accurate computations of hypersonic flows. I. AUSMPW+ scheme / K.H. Kim, Ch. Kim, O.H. Rho // Journal of Computational Physics. – 2001. – Vol. 174. – P. 38-80.
12. **Luke, E.** A fast mesh deformation method using explicit interpolation / E. Luke, E. Collins, E. Blades // Journal of Computational Physics. – 2012. – Vol. 231, № 2. – P. 586-601.
13. **Исаев, С.А.** Развитие многоблочных вычислительных технологий на композитных сетках, сравнение пакетов VP2/3 и SigmaFlow, верификация разноуровневых моделей турбулентности при расчете до- и трансзвукового обтекания толстых несущих поверхностей с вихревыми ячейками / С.А. Исаев, П.А. Баранов, А.Г. Судаков [и др.]. // Модели и методы аэродинамики. Шестнадцатая Международная школа-семинар. – Российская Академия наук, Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского. – 2016. – С. 83-84.
14. **Wang, Z.J.** A Fully Automated Chimera Methodology for Multiple Moving Body Problems / Z.J. Wang, V. Parthasarathy // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 2000. – Vol. 33, № 7. – P. 919-938.

15. **Саразов, А.В.** Повышение точности САЕ-моделирования задач аэродинамики с использованием технологии расчета на трехмерных неструктурированных сетках с перекрытиями / А.В. Саразов, А.С. Козелков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2024. – № 2. – С. 43-58.
16. Облачная среда GrabCAD для работы с САД-файлами [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://grabcad.com/library/sukhoi-su-30-mk-i-1> (дата обращения: 01.03.2026).
17. Пакет программ Логос [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://logos.vniief.ru/products/Logos> (дата обращения: 01.03.2026).
18. **Смолкина, Д.Н.** Автоматический генератор неструктурированных многогранных сеток в препроцессоре пакета программ «Логос» / Д.Н. Смолкина, О.Н. Борисенко, М.В. Черенкова [и др.]. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2018. – Т. 2. – С. 25-39.
19. **Саразов, А.В.** Моделирование динамики полета летательного аппарата с учетом работы силовой установки и органов управления / А.В. Саразов, А.С. Козелков, А.А. Уткина [и др.]. // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. – 2022. – Т. 1. – С. 203-204.
20. **Карташов, Б.А.** Среда динамического моделирования технических систем SimInTech / Б.А. Карташов, А.М. Щекатуров, О.С. Козлов [и др.]. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 424 с.
21. **Горбенко, Г.В.** Методика ГЕПАРД для моделирования связанных задач аэрогидроупругости / Г.В. Горбенко, Ю.В. Янилкин, А.В. Городничев [и др.]. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2005. – Т. 4. – С. 3-14.
22. **Надуев, А.Г.** Архитектура программного модуля «Логос ПЛАТФОРМА» / А.Г. Надуев, А.Д. Черевань, А.С. Лебедева // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2022. – Т. 4. – С. 55-63.

### References

1. Pogosyan M.A., Savel'evskikh E.P., Shagaliev R.M., Koz prefA.S., Strelets D.Yu., Ryabov A.A., Kornev A.V., Deryugin Yu.N., Spiridonov V.F., Tsiberev K.V. Primenenie otechestvennykh superkomp'yuternykh tekhnologiy dlya sozdaniya perspektivnykh obraztsov aviatsionnoy tekhniki [Application of domestic supercomputer technologies for creating advanced aircraft]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov* [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Mathematical Modeling of Physical Processes]. 2013; 2: 3-17. (in Russian).
2. Landau L.D., Lifshits E.M. Teoreticheskaya fizika: gidrodinamika [Theoretical physics: hydrodynamics]. 3rd ed. Vol. 6. Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit.; 1986. 736 p. (in Russian).
3. Ferziger J.H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics. 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer; 2002. 423 p.
4. Spalart P.R., Jou W.H., Strelets M., Allmaras S.R. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. In: Proceedings of first AFOSR international conference on DND/LES; 1997.
5. Travin A., Shur M., Strelets M., Spalart P.R. Physical and numerical upgrades in the detached-eddy simulation of complex turbulent flows. In: Friedrich R., Rodi W., editors. Fluid Mechanics its Application. Vol. 65. Advances in LES of Complex Flows. Proceedings of Euromech Coll. 412. Boston, London: Kluwer; 2002. p. 239-245.
6. Strikwerda J.C. Finite Difference Schemes and Partial Differential Equations. Society for Industrial and Applied Mathematics. 1998;88.
7. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. Finite Element Method. Butterworth-Heinemann Limited; 2000. 1440 p.
8. Jasak H. Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flow [dissertation]. London: Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science; 1996.
9. Farhat C., Geuzaine P., Grandmonty C. The Discrete Geometric Conservation Law and the Nonlinear Stability of ALE Schemes for the Solution of Flow Problems on Moving Grids. *Journal of Computational Physics*. 2001;174(2):669-694.
10. Roe P.L. Introduction to computational fluid dynamics. Lecture Notes to a Short Course at Cranfield Institute of Technology; 1986 May 27-29.
11. Kim K.H., Kim Ch., Rho O.H. Methods for the accurate computations of hypersonic flows. I. AUSMPW+ scheme. *Journal of Computational Physics*. 2001;174:38-80.
12. Luke E., Collins E., Blades E. A fast mesh deformation method using explicit interpolation. *Journal of Computational Physics*. 2012;231(2):586-601.

13. Isaev S.A., Baranov P.A., Sudakov A.G., Usachov A.E., Gavrilov A.A., Dekterev A.A., Mazo A.B., Demidov D.E., Kalinin E.I. Razvitie mnogoblastochnykh vychislitel'nykh tekhnologiy na kompozitnykh setkakh, sravnenie paketov VP2/3 i SigmaFlow, verifikatsiya raznourovnevykh modeley turbulentsnosti pri raschete do- i tranzvukovogo obtekaniya tolstykh nesushchikh poverkhnostey s vikhrevymi yacheykami [Development of multi-block computational technologies on composite grids, comparison of VP2/3 and SigmaFlow packages, verification of multi-level turbulence models for subsonic and transonic flow around thick lifting surfaces with vortex cells]. In: Modeli i metody aerodinamiki. Shestnadtsataya Mezhdunarodnaya shkola-seminar [Models and methods of aerodynamics. Sixteenth International School-Seminar]. Russian Academy of Sciences, Central Aerohydrodynamic Institute named after prof. N.E. Zhukovsky; 2016. p. 83-84. (in Russian).
14. Wang Z.J., Parthasarathy V. A Fully Automated Chimera Methodology for Multiple Moving Body Problems. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2000;33(7):919-938.
15. Sarazov A.V., Kozelkov A.S. Povyshenie tochnosti CAE-modelirovaniya zadach aerodinamiki s ispol'zovaniem tekhnologii rascheta na trekhmernykh nestrukturirovannykh setkakh s perekrytiyami [Improving the accuracy of CAE simulation of aerodynamics problems using the technology of calculation on three-dimensional unstructured overlapping grids]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2024;2:43-58. (in Russian).
16. Oblachnaya sreda GrabCAD dlya raboty s CAD-faylami [GrabCAD cloud environment for working with CAD files]. Available from: <https://grabcad.com/library/sukhoi-su-30-mk-i-1> [accessed 2026 March 1]. (in Russian).
17. Paket programm Logos [Logos software package]. Available from: <http://logos.vniief.ru/products/logos> [accessed 2026 March 1]. (in Russian).
18. Smolkina D.N., Borisenko O.N., Cherenkova M.V., Giniyatullina A.G., Kuz'menko M.V., Chukhmanov N.V., Potekhina E.V., Popova N.V., Turusov M.R. Avtomaticheskii generator nestrukturirovannykh mnogogrannykh setok v preprotsessore paketa programm «Logos» [Automatic unstructured polyhedral mesh generator in the preprocessor of the Logos software package]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov* [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Mathematical Modeling of Physical Processes]. 2018; 2: 25-39. (in Russian).
19. Sarazov A.V., Kozelkov A.S., Utkina A.A., Kornev A.V. Modelirovanie dinamiki poleta letatel'nogo apparata s uchetom raboty silovoy ustanovki i organov upravleniya [Simulation of aircraft flight dynamics taking into account the operation of the power plant and control surfaces]. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii* [Aerospace engineering, high technologies and innovations]. 2022;1:203-204. (in Russian).
20. Kartashov B.A., Shchekaturov A.M., Kozlov O.S., Shabaev E.A. Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech [SimInTech dynamic modeling environment for technical systems]. Moscow: DMK Press; 2017. 424 p. (in Russian).
21. Gorbenko G.V., Yanilkin Yu.V., Gorodnichev A.V., Smolyakov A.A., Golovko E.A., Kolobyanin V.Yu., Loginov P.B., Razumkov A.S., Tarasov V.I., Chistyakova I.N., Khovrin N.A. Metodika GEPARD dlya modelirovaniya svyazannykh zadach aerogidrouprugosti [GEPARD method for simulation of coupled aero-hydro-elasticity problems]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov* [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Mathematical Modeling of Physical Processes]. 2005; 4: 3-14. (in Russian).
22. Naduev A.G., Cherevan' A.D., Lebedeva A.S. Arkhitektura programmnoy modulya «Logos PLATFORMA» [Architecture of the Logos PLATFORM software module]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov* [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Mathematical Modeling of Physical Processes]. 2022; 4: 55-63. (in Russian).

**Дата поступления  
в редакцию: 23.03.2026**

**Дата принятия  
к публикации: 05.05.2026**

УДК 004.03

EDN WYXFEI

## АРХИТЕКТУРНЫЕ ОСНОВЫ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

**А.А. Шамин**ORCID: 0000-0001-7690-8718 e-mail: [al.shamin@mail.ru](mailto:al.shamin@mail.ru)Нижегородский государственный инженерно-экономический университет  
*Княгинино, Нижегородская область, Россия*

Представлена стратифицированная архитектурная модель цифровой экономики как сложной программно-интенсивной информационной системы. Обосновывается необходимость многоуровневого описания цифровых систем на основе теории иерархических систем Месаровича, Мако и Такахары. Выделены два блока страт: инфраструктурные (физические источники данных, сети, облачно-туманные вычисления) и предметно-ориентированные (управление данными, цифровые платформы, экосистемы, рынки). Особое внимание уделено роли метаданных как основе структурирования цифровой информации и обеспечения совместимости компонентов. Дополнительно рассматриваются послойная и эшелонированная модели цифровой экономики, отражающие уровни принятия решений и управления соответственно. Показано, что архитектурный подход обеспечивает системность, масштабируемость и устойчивость цифровой трансформации. Работа представляет интерес для исследователей, разработчиков архитектур цифровых систем и государственных регуляторов.

**Ключевые слова:** архитектура цифровой экономики; киберпространство; метаданные; послойное описание; стратификация; цифровая трансформация; цифровая экономика; цифровые платформы; эталонные модели; эшелоны управления.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Шамин, А.А. Архитектурные основы цифровой трансформации сложных систем // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 2. С. 30-39. EDN: WYXFEI

## ARCHITECTURAL FOUNDATIONS FOR DIGITAL TRANSFORMATION OF COMPLEX SYSTEMS

**A.A. Shamin**ORCID: 0000-0001-7690-8718 e-mail: [al.shamin@mail.ru](mailto:al.shamin@mail.ru)Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics  
*Knyaginino, Russia*

**Abstract.** The article presents a stratified architectural model of the digital economy as a complex, software-intensive information system. The necessity of a multi-level description of digital systems based on the theory of multi-level hierarchical systems by Mesarovich, Macko and Takahara is substantiated. Two blocks of strata are identified: infrastructural (physical data sources, networks, cloud-fog computing) and domain-oriented (data management, digital platforms, ecosystems, markets). Special attention is given to the role of metadata as the foundation for structuring digital information and ensuring component interoperability. Additionally, layered and echeloned models of the digital economy are discussed, reflecting the levels of decision-making and management, respectively. It is shown that an architectural approach ensures systematization, scalability, and sustainability of digital transformation. The work is of interest to researchers, developers of digital system architectures and government regulators.

**Key words:** architecture of digital economy; cyberspace, metadata; layered description; stratification; digital transformation; digital economy; digital platforms; reference models; management echelons.

**FOR CITATION:** A.A. Shamin. Architectural foundations for digital transformation of complex systems. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 2. Pp. 30-39. EDN: WYXFEI

### Введение

Цифровая экономика представляет собой сложную программно-интенсивную и цифровую информационную систему, в которой данные выступают в качестве нового фактора про-

изводства, а программное обеспечение – как ключевой инструмент трансформации экономических процессов (рис. 1). Ее функционирование невозможно без устойчивой, гибкой и стандартизированной архитектуры, обеспечивающей совместимость, масштабируемость и безопасность взаимодействия миллионов компонентов – от сенсоров интернета вещей до глобальных цифровых платформ [1, 2]. В условиях стремительной цифровизации всех сфер жизни актуализируется задача системного описания архитектуры цифровой экономики, основанного на принципах теории сложных систем, кибернетики и стандартизации информационных процессов [3].



**Рис. 1. Цифровая экономика как сложная система**

**Fig. 1. The digital economy as a complex system**

Одним из ключевых методологических подходов к решению этой задачи является стратифицированное описание, предложенное в работах Месаровича, Мако и Такахару и позволяющее декомпозировать сложность системы на иерархически организованные уровни абстрагирования – страты, слои и эшелоны [4]. В отличие от структурного синтеза, архитектурное проектирование предполагает сохранение независимости языков описания на разных уровнях абстракции [5], что обеспечивает масштабируемость и эволюционируемость системы без полной переработки нижележащих слоев. Такой подход не только упрощает понимание структуры цифровой экономики, но и обеспечивает основу для проектирования открытых, совместимых и устойчивых цифровых экосистем [6].

Цель работы – представить стратифицированную архитектурную модель цифровой экономики как результат архитектурного проектирования, а не структурного синтеза, выделить ее ключевые уровни, проанализировать взаимосвязи между ними и обосновать практическую значимость архитектурного подхода для цифровой трансформации предприятий и государственных систем.

Актуальность данного исследования определяется несколькими факторами. Во-первых, цифровая экономика перестала быть лишь совокупностью технологий и превратилась в социально-техническую реальность, в которой формируются новые формы собственности, труда, обмена и власти. Эта трансформация затрагивает не только рыночные отношения, но и институты государства, образование, культуру и повседневную жизнь. Однако отсутствие единой архитектурной парадигмы приводит к фрагментации цифрового пространства, технологической зависимости и регуляторным разрывам. Во-вторых, рост объемов данных, скорость их обработки и степень алгоритмизации решений требуют новых методологических инструментов, способных описывать динамику цифровых систем на разных уровнях абстракции – от физических сигналов до рыночных стратегий. Традиционные экономические модели, ориентированные на статические равновесия и рациональных агентов, оказываются недостаточными для анализа самоорганизующихся, адаптивных и непредсказуемых цифровых экосистем. В-третьих, стратифицированный подход позволяет преодолеть противоречие между универсальностью цифровых технологий и спецификой предметных областей. Все цифровые системы, будь то медицинская платформа или логистический маркетплейс, используют одни и те же принципы обработки данных, но реализуют их в контексте уникальных бизнес-процессов, норм и целей. Архитектурная модель, разделяющая описание на инфраструктурные и

предметно-ориентированные страты, делает возможным как унификацию технологической базы, так и гибкость прикладного слоя. Кроме того, в условиях геополитической нестабильности и технологического соперничества возрастает роль цифрового суверенитета – способности государства и общества контролировать собственные данные, инфраструктуру и правила цифрового взаимодействия. Реализация суверенитета невозможна без четкого понимания архитектурных зависимостей: какие компоненты могут быть локализованы, какие – стандартизированы, а какие – должны оставаться открытыми для глобального взаимодействия. Именно архитектурный подход позволяет выявить «узкие» места («узлы зависимости») и сформировать стратегию технологической независимости.

Практическая необходимость разработки такой модели продиктована запросами бизнеса и государственного управления. Предприятия сталкиваются с вызовами цифровой трансформации: как интегрировать микросервисы, облачные решения и ИИ-модели в единую архитектуру? Как обеспечить совместимость с внешними платформами при соблюдении требований безопасности? Государству, в свою очередь, требуется инструмент для проектирования цифровых государственных услуг, национальных платформ и регуляторных песочниц, основанных не на технологической моде, а на системных принципах. Стратифицированная модель, предложенная в настоящей работе, отвечает этим запросам, предлагая универсальный язык описания, пригодный как для проектировщиков, так и для регуляторов.

Научная новизна исследования заключается в разработке стратифицированной архитектурной модели цифровой экономики, предназначенной для обеспечения совместимости, масштабируемости и безопасности взаимодействия компонентов цифровых систем. Данная модель позволяет осуществлять декомпозицию сложных цифровых систем на иерархически организованные уровни абстрагирования с сохранением функциональной автономии страт, отличаясь от известных аналогов (OSI/RM, MIC) расширением охвата до социально-экономического уровня (7 страт) при сохранении принципов инкапсуляции интерфейсов.

### Теоретические основы архитектурного описания цифровой экономики

Цифровая экономика обладает фундаментальными свойствами сложных систем: она состоит из большого числа взаимосвязанных компонентов, проявляет эмерджентность и демонстрирует нелинейную динамику [7]. В соответствии с классификацией Герберта Саймона, речь идет о категории очень сложных вероятностных систем, которые не поддаются точному описанию, но могут быть структурированы через иерархические модели [3]. Их архитектурное описание строится на трех взаимодополняющих принципах: открытости, функциональности и многоуровневости. Открытость обеспечивает обмен информацией с внешней средой через стандартизированные интерфейсы (рис. 2). Функциональность позволяет рассматривать систему как «черный ящик», преобразующий входные данные  $X_t$  в выходные  $Y_t$  по правилу  $Y_t = F(X_t)$ . Многоуровневость, в свою очередь, позволяет описывать взаимодействие на разных уровнях абстракции [8-10]. Эти принципы лежат в основе эталонных моделей, таких как ЭМВОС (OSI/RM) и модель MIC, которые задают архитектуру взаимодействия в цифровой среде через строго определенные уровни и интерфейсы [11].

Согласно теории [4], введем семейство страт  $S = \{S_i\}, i = \overline{1,7}$ , где каждая страта  $S_i$  представляет собой отображение  $S_i: X_i \times W_{i-1} \times W_i \rightarrow Y_i$ , где  $X_i$  – пространство локальных входов  $i$ -й страты,  $W_{i-1}$  – пространство обратных связей от нижележащего уровня ( $W_0 = \emptyset, W_7 = \emptyset$ ),  $W_i$  – пространство координирующих воздействий,  $Y_i$  – пространство выходов  $i$ -й страты. На основе анализа свойств цифровых систем предложена семиуровневая стратифицированная модель архитектуры цифровой экономики (рис. 3), которая делится на две группы уровней:

- 1) инфраструктурные страты (1-3): обеспечивают физическую и вычислительную основу цифровой экономики;

- 2) предметно-ориентированные страты (4-7): реализуют экономические функции, рыночные взаимодействия и создание ценности.

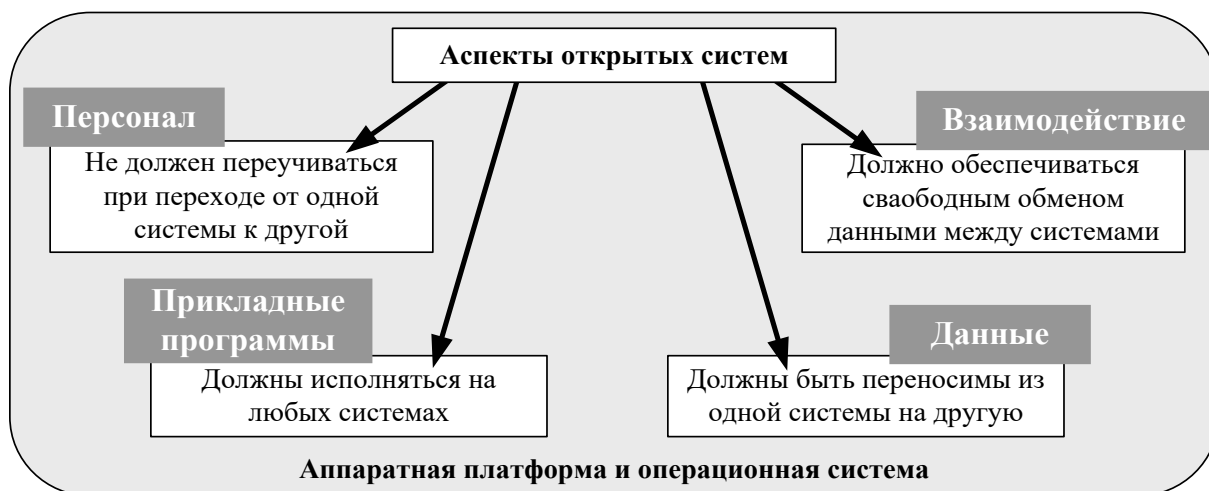


Рис. 2. Аспекты открытости в архитектуре цифровых систем

Fig. 2. Aspects of openness in digital systems architecture

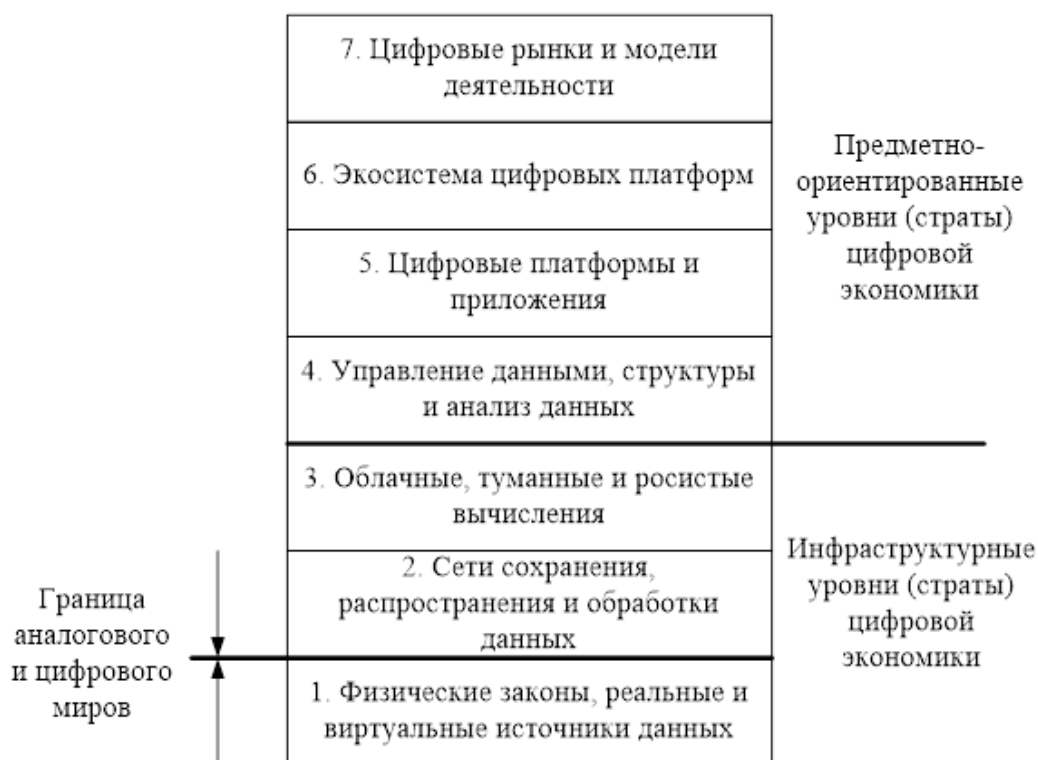


Рис. 3. Стратифицированная архитектурная модель цифровой экономики

Fig. 3. Stratified architectural model of the digital economy

*Страта 1. Физические законы и источники данных.* Включает технологии аналого-цифрового преобразования, сенсоры, радиотехнические и квантовые системы, формирующие цифровой след реального мира. Здесь реализуется теорема Котельникова, обеспечивающая корректное оцифровывание аналоговых процессов.

$S_1: X_1 \times W_1 \rightarrow Y_1$ , где  $X_1 = \{x \in \mathbb{R}^n \mid x = f(t), \exists F_x(\omega): F_x(\omega) = 0 \text{ при } |\omega| > \omega_{max}\}$  – пространство аналоговых сигналов с ограниченным спектром,  $W_1 \subseteq \mathbb{R}^m$  – параметры дискретизации,  $Y_1 = \{y_k \mid y_k = x(kT), T < \frac{\pi}{\omega_{max}}\}$  – множество цифровых отсчетов, удовлетворяющих теореме Котельникова,  $S_1(x, w) = \{x(nT_s) \cdot w\}_{n=-\infty}^{\infty}$ , где  $T_s$  – период дискретизации.

*Страта 2. Сети сохранения, распространения и обработки данных.* Охватывает телекоммуникационную инфраструктуру (включая 5G, тактильный интернет, IoT), где данные передаются в виде кадров, пакетов и сегментов с добавлением метаданных для маршрутизации и контроля целостности.

$S_2: X_2 \times W_1 \times W_2 \rightarrow Y_2$ , где  $X_2 = Y_1$  – цифровые отсчеты,  $W_1 = h_1(Y_1)$  – метаданные маршрутизации,  $W_2 \subseteq \mathbb{R}^q$  – параметры качества обслуживания,  $Y_2 = \{(d_j, m_j) \mid d_j \in \{0,1\}^l, m_j \in \{0,1\}^r\}$  – множество пакетов с метаданными,  $S_2(x, w_1, w_2) = \{(f_k(x), g_k(w_1, w_2))\}_{k=1}^N$  – отображение сегментации и добавления метаданных.

*Страта 3. Облачные, туманные и росистые вычисления.* Обеспечивает вертикально распределенную обработку данных, где облако отвечает за централизованную аналитику, туман – за обработку на границе сети, а роса – за автономную работу локальных устройств.

$S_3: X_3 \times W_2 \times W_3 \rightarrow Y_3$ , где  $X_3 = Y_2$  – пакеты данных с метаданными,  $W_2 = Z_2 \times L_2$  – зональные и локальные параметры обработки,  $W_3 \subseteq \mathbb{R}^s$  – глобальные параметры распределения вычислений,  $Y_3 = Y_{\text{облако}} \times Y_{\text{туман}} \times Y_{\text{роса}}$  – результаты обработки на трех уровнях,  $S_3(x, w_2, w_3) = (P_{\text{облако}}(x, h_3(w_3)), P_{\text{туман}}(x, h_2(w_2)), P_{\text{роса}}(x, h_1(w_2)))$  – распределенная обработка.

*Страта 4. Управление данными и их анализ.* Включает хранилища (data lakes), базы данных (SQL/NoSQL), OLAP-системы и методы Data Mining, которые превращают «сырые» данные в информацию и знания.

$S_4: X_4 \times W_3 \times W_4 \rightarrow Y_4$ , где  $X_4 = Y_3$  – распределенные данные,  $W_3 \subseteq \mathcal{M}$  – параметры моделей машинного обучения,  $W_4 \subseteq \mathbb{R}^t$  – параметры семантического описания,  $Y_4 = \mathcal{I} \times \mathcal{K}$  – информация и знания,  $S_4(x, w_3, w_4) = (\phi(x, w_3), \psi(\phi(x, w_3), w_4))$  – преобразование данных в информацию и знания.

*Страта 5. Цифровые платформы и приложения.* Представляет собой виртуальные среды для координации взаимодействия производителей и потребителей, основанные на принципах ХааS («все как сервис») и открытых API.

$S_5: X_5 \times W_4 \times W_5 \rightarrow Y_5$ , где  $X_5 = Y_4$  – информация и знания,  $W_4 \subseteq \mathcal{B}$  – бизнес-правила,  $W_5 = \{API_i\}_{i=1}^k$  – спецификации интерфейсов,  $Y_5 = \{S_j \mid S_j: \mathcal{D}_j \rightarrow \mathcal{R}_j, j = 1, \dots, m\}$  – множество сервисов,  $S_5(x, w_4, w_5) = \{f_j(x, w_4, w_5)\}_{j=1}^m$  – реализация принципа ХааS.

*Страта 6. Экосистема цифровых платформ.* Обеспечивает межплатформенное взаимодействие через «цифровой кодекс», стандарты и соглашения о совместимости.

$S_6: X_6 \times W_5 \times W_6 \rightarrow Y_6$ , где  $X_6 = Y_5$  – сервисы разных платформ,  $W_5 \subseteq \mathcal{C}$  – «цифровой кодекс» совместимости,  $W_6 \subseteq \mathbb{R}^u$  – параметры координации,  $Y_6 = \{(p_i, p_j, v_{ij}) \mid i, j \in I, v_{ij} \in \mathcal{V}\}$  – множество взаимодействий между платформами,  $S_6(x, w_5, w_6) = \cup_{i,j} \{(p_i, p_j, \theta(x_i, x_j, w_5, w_6))\}$  – межплатформенная координация.

*Страта 7. Цифровые рынки и модели деятельности.* Формирует новые бизнес-модели (например, B2C-рынки с объемом свыше \$100 млрд), где посредники заменяются алгоритмическим управлением.

$S_7: X_7 \times W_6 \rightarrow Y_7$ , где  $X_7 = Y_6$  – взаимодействия между платформами,  $W_6 \subseteq \mathcal{A}$  – алгоритмы управления рынками,  $Y_7 = \{(M_k, V_k) \mid k \in K, V_k > 10^{11}\}$  – бизнес-модели с объемами рынков,  $S_7(x, w_6) = \{(B_k(x, w_6), V(B_k))\}_{k=1}^l$  – формирование новых рыночных моделей.

Страты связаны между собой через информационные функции  $h_i: Y_i \rightarrow W_{i+1}$  распределительные функции  $c_i: Y_i \rightarrow M_{i+1}$ , обеспечивающие согласованность между уровнями, где  $M_i$  – множество модифицированных локальных целей для страты  $i$ .

Для всей системы  $S$  выполняется свойство полной стратификации:

$$\forall i, 1 \leq i \leq 7, \forall x \in X, y = S(x) \Rightarrow h_i(S_i(x_i, w_{i-1}, w_i)) = w_{i+1},$$

$$c_i(S_i(x_i, w_{i-1}, w_i)) = m_{i+1}.$$

Представленная стратификация, основанная на работах Месаровича, позволяет не только теоретически обосновать архитектурные решения, но и практически реализовать проектирование масштабируемых цифровых экосистем с предсказуемым поведением на каждом уровне абстракции.

### Метаданные как основа структурирования цифровой информации

Центральным технологическим приемом в архитектуре цифровой экономики является использование метаданных – данных о данных, которые обеспечивают идентификацию, поиск, интерпретацию и интеграцию цифровых ресурсов. Без метаданных цифровые блоки теряют контекст и становятся бесполезными для анализа.

На глобальном уровне применяются стандарты, такие как «Дублинское ядро» (Dublin Core), содержащее 15 базовых элементов описания ресурсов (автор, тема, формат и др.). На локальном уровне метаданные встраиваются непосредственно в структуру блоков данных – от секторов жесткого диска до IP-пакетов (рис. 4).

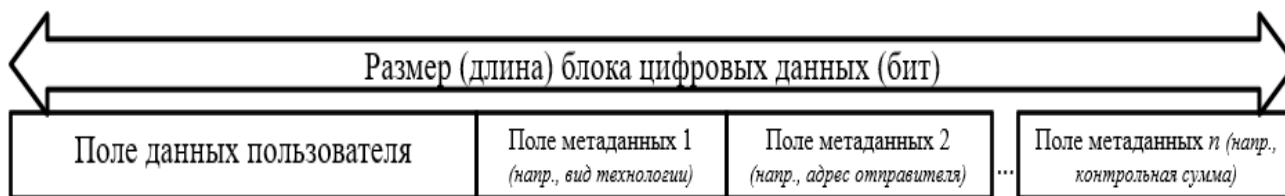


Рис. 4. Структура цифрового блока данных: данные и метаданные

Fig. 4. Digital data block structure: data and metadata

Метаданные не просто сопровождают цифровой блок данных, они формируют его информационную идентичность в киберпространстве. В рамках стратифицированной архитектуры цифровой экономики метаданные выполняют три взаимосвязанные функции, обеспечивающие целостность и смысловую насыщенность цифрового блока данных. Во-первых, они описывают структуру блока данных, указывая его формат, размер, тип кодировки, порядок следования полей, наличие контрольных сумм и другие технические характеристики, необходимые для корректной обработки на соответствующей страте архитектуры. Во-вторых, метаданные обеспечивают семантическое наполнение, фиксируя смысл данных: к какому объекту или явлению они относятся, в каком контексте были получены, какие единицы измерения используются и какова степень их достоверности. В-третьих, метаданные содержат информацию о пространственно-сетевой привязке блока данных в киберпространстве – включая IP-адрес источника, временную метку создания, идентификатор устройства, географические координаты, а также принадлежность к определенному цифровому потоку или транзакции. В совокупности эти три аспекта формируют информационную идентичность цифрового ресурса, делая его управляемым, интерпретируемым и локализуемым в распределенной цифровой среде. Без такой триады – структура, смысл, местоположение – данные теряют статус управляемого информационного ресурса и превращаются в неструктурированный цифровой «мусор», не подлежащий аналитической обработке или интеграции.

Указанный принцип особенно критичен на стыке инфраструктурных и предметно-ориентированных страт: именно метаданные обеспечивают преемственность между физическим уровнем (где фиксируется сигнал) и семантическим уровнем (где данные обретают экономическое или социальное значение).

### Эшелонированная и послонная модели управления цифровой экономикой

Помимо стратификации, архитектура цифровой экономики описывается через слои (уровни принятия решений) и эшелоны (уровни управления). В рамках государственной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» выделяются три эшелона (рис. 5).



Рис. 5. Эшелонированная модель управления цифровой трансформацией

Fig. 5. Echeloned model of digital transformation management

Пусть  $\mathcal{E} = \{E_i\}_{i=1}^3$  представляет собой эшелонированную систему управления цифровой экономикой, где каждый эшелон определен как управляемая подсистема с собственным пространством решений  $D_i$ , целевой функцией  $G_i$  и полномочиями  $A_i$ :

$$E_i = (D_i, G_i, A_i, \Phi_i),$$

где  $\Phi_i: D_i \times I_i \rightarrow D_{i-1}$  – функция передачи управляющих воздействий на нижестоящий уровень, а  $I_i$  – информационное множество входных данных эшелона.

Эшелоны организованы в иерархию приоритета действий с отношением строгого порядка  $>$ , где  $E_i > E_j$  означает приоритет действий эшелона  $E_i$  над  $E_j$  при  $i < j$ :  $E_1 > E_2 > E_3$ .

*Эшелон 1.* Технологическая среда (разработка сквозных технологий):  $E_1 = (D_1, G_1, A_1, \Phi_1)$ , где  $D_1$  – множество решений по разработке сквозных цифровых технологий,  $G_1 = \max\{T(d): d \in D_1\}$  – максимизация технологической «прорывности»,  $A_1 = \{\text{государственное финансирование, стандарты, НИОКР}\}$ .

*Эшелон 2.* Социальная среда (правовое регулирование, образование, безопасность):  $E_2 = (D_2, G_2, A_2, \Phi_2)$ , где  $D_2$  – множество решений по формированию правовой и социальной среды,  $G_2 = \max\{S(d, E_1(d)): d \in D_2\}$  – максимизация социальной устойчивости при заданных технологиях,  $A_2 = \{\text{законодательство, образование, кибербезопасность}\}$ .

*Эшелон 3.* Рынки и отрасли (инициативная цифровизация бизнеса):  $E_3 = (D_3, G_3, A_3, \Phi_3)$ , где  $D_3$  – множество бизнес-решений по цифровизации рынков и отраслей,  $G_3 = \max\{V(d, E_1(E_2^{-1}(d))), d \in D_3\}$  – максимизация экономической ценности при заданных технологических и социальных условиях,  $A_3 = \{\text{инвестиции, бизнес-модели, конкурентные стратегии}\}$ .

Координация между эшелонами осуществляется через функцию обратной связи  $\Psi: \bigcup_{i=1}^3 D_i \rightarrow \mathbb{R}^m$ , которая обеспечивает согласованность целей:

$$\Psi(d_1, d_2, d_3) = \lambda_1 G_1(d_1) + \lambda_2 G_2(d_2, d_1) + \lambda_3 G_3(d_3, d_1, d_2),$$









где  $\lambda_i$  – весовые коэффициенты значимости каждого эшелона.

Послойный подход применяется, например, в медицине (рис. 6), где услуги строятся от базовых процедур к персонализированному уходу, или в вычислениях – от росы к облаку.

### Обсуждение

Предложенная семиуровневая стратифицированная архитектурная модель цифровой экономики представляет собой не просто концептуальную схему, а методологическую основу

для системного описания и проектирования сложных цифровых экосистем. В отличие от чисто технологических или управленческих подходов, данная модель объединяет инфраструктурную, информационную, платформенную и социально-экономическую реальности в единую иерархическую структуру, где каждый уровень (страта) имеет четкое функциональное назначение и автономию описания.

| УЧАСТНИК ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ УСЛУГИ  | ВКЛАД В КЛИЕНТОЦЕНТРИЧНОСТЬ  |
|---|--|
|  Государственная Дума РФ<br> Правительство РФ | Установление прав и обязанностей врача и больного  |
|  Министерство здравоохранения РФ   | Определение, кому, от чего и как лечить данное заболевание                                       |
|  Министерство финансов РФ  | Финансирование лечения за счет бюджета   |
|  Департамент здравоохранения региона   | Предоставление лечения того вида, которое необходимо больному                                    |
|  Департамент информатизации региона   | Электронная запись к врачу   |
|  Администрация государственного учреждения здравоохранения (больницы, поликлиники)   | Предоставление квалифицированных специалистов, установление удобного графика работы              |
|  Врач  | Внимательное отношение к больному, желание помочь, использование всех имеющихся знаний и навыков |

Слои иерархии, объединяющие функциональные задачи

**Рис. 6. Пример послойного описания цифровой трансформации в здравоохранении**

**Fig. 6. An example of a layered description of digital transformation in healthcare**

Стратификация – это не произвольное деление, а следствие фундаментальных свойств сложных систем, описанных в работах Месаровича, Мако и Такахару. Принцип независимости языков описания на разных стратах позволяет избежать двух крайностей: избыточной детализации, затрудняющей управление, и чрезмерной абстракции, лишаящей модель практической применимости. Например, разработчик облачной инфраструктуры (страта 3) может не знать специфики бизнес-модели B2C-маркетплейса (страта 7), но благодаря стандартизированным интерфейсам и метаданным эти уровни взаимодействуют прозрачно и предсказуемо. Сопоставление с классическими эталонными моделями, такими как OSI/RM или MIC, показывает, что предложенная архитектура является их логическим развитием, адаптированным к условиям цифровой экономики. Если OSI описывает взаимодействие в телекоммуникационных системах, а MIC – в программных компонентах, то представленная в настоящей работе модель охватывает всю цепочку создания ценности – от физического источника данных до глобального цифрового рынка. При этом сохраняется ключевой принцип эталонных моделей: инкапсуляция и стандартизация интерфейсов между уровнями.

Особое значение обретает концепция метаданных как «клея», связывающего разнородные уровни. Без метаданных цифровые блоки теряют контекст и становятся бесполезными для анализа и принятия решений. В этом смысле метаданные выступают не просто техническим элементом, а архитектурной основой совместимости, обеспечивая семантическую согласованность между инфраструктурой и бизнес-процессами. Введение дополнительных измерений – слоев (уровней принятия решений) и эшелонов (уровней управления) – позволяет адаптировать архитектурное описание к реальным условиям функционирования цифровой экономики.

Например, трехэшелонная модель (технологическая среда – социальная среда – рынки и отрасли), заимствованная из государственной программы «Цифровая экономика Российской Федерации», демонстрирует, как архитектурный подход может быть инструментом публичной политики, обеспечивающим согласованность усилий государства, бизнеса и общества.

Тем не менее, разработанная модель имеет ограничения. Во-первых, она предполагает иерархическую стабильность, тогда как реальные цифровые экосистемы часто демонстрируют сетевые, децентрализованные или даже хаотические структуры (например, децентрализованные финансы – DeFi). Во-вторых, модель акцентирует внимание на структурной и функциональной сторонах, в меньшей степени затрагивая этические, культурные и когнитивные аспекты цифровой трансформации (например, цифровую усталость, информационные «пузыри», алгоритмическую предвзятость).

Архитектурная четкость делает модель особенно востребованной на этапе цифровой трансформации предприятий и государственных систем. Последовательное движение от анализа бизнес-процессов к выбору цифровой платформы и проектированию ИТ-инфраструктуры напрямую опирается на стратифицированное понимание цифровой экономики. Это позволяет избежать типичных ошибок трансформации: закупки технологий «впрок», игнорирования данных как стратегического актива или конфликта между унаследованными и новыми системами.

Предложенная модель не претендует на исчерпывающее описание цифровой экономики, но обеспечивает методологически устойчивый каркас, в рамках которого могут развиваться как технологические решения, так и управленческие и регуляторные стратегии. Ее главная ценность – в том, что она делает сложность управляемой, превращая цифровую трансформацию из хаотического процесса в осознанное архитектурное проектирование.

### Заключение

Архитектура цифровой экономики – не статическая схема, а динамическая, многоуровневая структура, построенная на принципах стратификации, открытости и стандартизации. Предложенная семиуровневая модель позволяет системно подходить к проектированию цифровых экосистем, обеспечивая совместимость между физическими, информационными и социально-экономическими компонентами. Ключевую роль в этой архитектуре играют метаданные, которые превращают неструктурированные данные в управляемые информационные ресурсы, а также эталонные модели (OSI, MIC, DIKW), задающие язык описания сложных взаимодействий. Практическая реализация архитектурного подхода возможна через цифровую трансформацию предприятий, основанную на выборе подходящей цифровой платформы, формировании современного портфеля приложений и развитии ИТ-инфраструктуры, совместимой с киберпространством.

Будущее цифровой экономики зависит не от скорости внедрения отдельных технологий, а от целостности и устойчивости ее архитектуры, спроектированной с учетом системной сложности, этических норм и стратегических целей развития общества.

### Библиографический список

1. **Колбанёв, М.О.** Сетевая архитектура цифровой экономики / М.О. Колбанёв, Н.А. Верзун, А.В. Омельян. – СПб.: Изд-во СПбГЭУ, 2018. – 156 с.
2. **Глазьев, С.Ю.** Теория долгосрочного технико-экономического развития / С.Ю. Глазьев. – М.: Владар, 1993. – 310 с.
3. **Саймон, Г.** Науки об искусственном / Г. Саймон. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 142 с.
4. **Месарович, М.** Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такаха. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
5. **Соснин, П.И.** Архитектурное моделирование автоматизированных систем / П.И. Соснин. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 147 с.

6. **Верзун, Н.А.** Технологическая платформа четвертой промышленной революции / Н.А. Верзун, М.О. Колбанёв, Т.М. Татарникова // Геополитика и безопасность. – 2016. – № 2 (34). – С. 73-77.
7. **Bertalanffy, L. von.** General System Theory / L. von Bertalanffy. – New York: George Braziller, 1968.
8. **Кожанов, Ю.Ф.** Интерфейсы и протоколы сетей следующего поколения / Ю.Ф. Кожанов, М.О. Колбанёв. – СПб.: ГУАП, 2009. – 258 с.
9. **Колбанёв, М.О.** Модель информационного взаимодействия для предприятий сервиса / М.О. Колбанёв, Т.М. Татарникова, С.Ю. Микадзе // Приборостроение. – 2014. – № 9. – С. 10-14.
10. **Верзун, Н.А.** Введение в инфокоммуникационные технологии и сети Future Networks / Н.А. Верзун, М.О. Колбанёв, А.В. Омелян. – СПб.: СПбГЭУ, 2016. – 51 с.
11. **ISO/IEC 7498-1:1994.** Information technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model. – 1994.

### References

1. Kolbanev M.O., Verzun N.A., Omel'yan A.V. Setevaya arkhitektura tsifrovoy ekonomiki [Network architecture of the digital economy]. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGGEU; 2018. 156 p. (in Russian).
2. Glaz'ev S.Yu. Teoriya dolgosrochnogo tekhniko-ekonomicheskogo razvitiya [Theory of long-term technical and economic development]. Moscow: VIdar; 1993. 310 p. (in Russian).
3. Saymon G. Nauki ob iskusstvennom [The sciences of the artificial]. Moscow: Editorial URSS; 2004. 142 p. (in Russian).
4. Mesarovich M., Mako D., Takakhara I. Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh system [Theory of hierarchical multilevel systems]. Moscow: Mir; 1973. 344 p. (in Russian).
5. Sosnin P.I. Arkhitekturnoe modelirovanie avtomatizirovannykh system [Architectural modeling of automated systems: a textbook]. Ul'yanovsk: UIGTU; 2008. 147 p. (in Russian).
6. Verzun N.A., Kolbanëv M.O., Tatarnikova T.M. Tekhnologicheskaya platforma chetvertoy promyshlennoy revolyutsii [Technological platform of the fourth industrial revolution]. *Geopolitika i bezopasnost'* [Geopolitics and Security]. 2016;(2(34)):73-77. (in Russian).
7. Bertalanffy L. von. General System Theory. New York: George Braziller; 1968.
8. Kozhanov Yu.F., Kolbanëv M.O. Interfeysy i protokoly setey sleduyushchego pokoleniya [Interfaces and protocols of next generation networks]. Saint Petersburg: GUAP; 2009. 258 p. (in Russian).
9. Kolbanëv M.O., Tatarnikova T.M., Mikadze S.Yu. Model' informatsionnogo vzaimodeystviya dlya predpriyatij servisa [Model of information interaction for service enterprises]. *Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2014;(9):10-14. (in Russian).
10. Verzun N.A., Kolbanëv M.O., Omel'yan A.V. Vvedenie v infokommunikatsionnye tekhnologii i seti Future Networks [Introduction to infocommunication technologies and Future Networks]. Saint Petersburg: SPbGGEU; 2016. 51 p. (in Russian).
11. ISO/IEC 7498-1:1994. Information technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model. 1994.

*Дата поступления  
в редакцию: 08.12.2025*

*Дата принятия  
к публикации: 26.03.2026*

---

**ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ**

---

УДК 621.039.53

EDN TMHEGG

**ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПОДБОРА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ДЕМПФИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ****С.А. Душев**ORCID: 0009-0009-0262-6094 e-mail: [dushev@okbm.nnov.ru](mailto:dushev@okbm.nnov.ru)АО «ОКБМ Африкантов»  
Нижний Новгород, Россия**Д.А. Лапшин**ORCID: 0009-0001-2801-1102 e-mail: [lapshin\\_da@okbm.nnov.ru](mailto:lapshin_da@okbm.nnov.ru)АО «ОКБМ Африкантов»  
Нижний Новгород, Россия**С.Н. Пичков**ORCID: 0009-0006-7251-7123 e-mail: [pichkov@okbm.nnov.ru](mailto:pichkov@okbm.nnov.ru)АО «ОКБМ Африкантов»  
Нижний Новгород, Россия**В.В. Шорохов**ORCID: 0009-0007-8939-2504 e-mail: [shorokhov\\_vv@okbm.nnov.ru](mailto:shorokhov_vv@okbm.nnov.ru)АО «ОКБМ Африкантов»  
Нижний Новгород, Россия

Описаны методы и средства, позволяющие оптимизировать и структурировать процесс подбора геометрических параметров демпфирующих устройств. Для оптимизации был использован язык сценариев APDL, значительно сокращающий время на построение конечно-элементных и расчетных моделей с учетом всех особенностей задач, связанных с высокоинтенсивными динамическими нагрузками. Использование представленного подхода позволило провести анализ большого количества данных, определяющих поглощающую способность демпфирующих устройств для транспортных упаковочных комплексов (ТУК). Представлены целевые критерии, принимающиеся во внимание при оценке эффективности демпфирующего устройства, в качестве примера рассмотрен процесс подбора характеристик демпфирующего устройства по исследуемым параметрам. Полученные с помощью комплекса макросов данные позволили детально изучить взаимное влияние геометрических параметров демпфирующего устройства на его свойства и структурировать процесс подбора данных параметров. Получен экономический эффект за счет возможного отказа от дорогостоящих натурных испытаний при проектировании и существенного сокращения времени и цифровых ресурсов при разработке изделий.

**Ключевые слова:** параметрическое моделирование; динамические воздействия высокой интенсивности; напряженно-деформированное состояние; транспортные упаковочные комплексы; демпфирующие устройства различного назначения.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Душев, С.А. Применение параметрического моделирования для оптимизации процесса подбора геометрических характеристик демпфирующих устройств / С.А. Душев, Д.А. Лапшин, С.Н. Пичков, В.В. Шорохов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 2. С. 40-56. EDN: TMHEGG

**APPLICATION OF PARAMETRIC MODELING  
FOR OPTIMIZATION OF SELECTION PROCESS  
OF DAMPING DEVICES GEOMETRIC CHARACTERISTICS**

**S.A. Dushev**

ORCID: **0009-0009-0262-6094** e-mail: **dushev@okbm.nnov.ru**

Afrikantov OKBM JSC  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**D.A. Lapshin**

ORCID: **0009-0001-2801-1102** e-mail: **lapshin\_da@okbm.nnov.ru**

Afrikantov OKBM JSC  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**S.N. Pichkov**

ORCID: **0009-0006-7251-7123** e-mail: **pichkov@okbm.nnov.ru**

Afrikantov OKBM JSC  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**V.V. Shorokhov**

ORCID: **0000-0003-0637-7004** e-mail: **shorokhov\_vv@okbm.nnov.ru**

Afrikantov OKBM JSC  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** This paper describes methods and tools for optimizing and structuring the process of selecting the geometric parameters of damping devices. The APDL scripting language was used for optimization, which significantly reduced the time for constructing finite element and computational models, taking into account all the features of problems associated with high-intensity dynamic loads. The use of the applied approach made it possible to analyze a large amount of data determining the absorption capacity of damping devices for transport packaging kits. The target criteria taken into account when assessing the effectiveness of a damping device are presented. As an example, the process of selecting damping device characteristics based on the parameters under study is considered. The data obtained using a set of macros made it possible to study in detail the mutual influence of the geometric parameters of the damping device on its properties and to structure the process of selecting these parameters. Economic effect was achieved due to the possible elimination of expensive full-scale testing during design process and a significant reduction in time and digital resources in the development of the designed products.

**Key words:** parametric modeling; high-intensity dynamic effects; stress-strain state; transport packaging kits; damping devices for various purposes.

**FOR CITATION:** Dushev S.A., Lapshin D.A., Pichkov S.N. and Shorokhov V.V. Application of parametric modeling for optimization of selection process of damping devices geometric characteristics. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 2. Pp. 40-56. EDN: TMHEGG

## Введение

Проблема обеспечения прочности и конструкционной целостности оборудования ядерных энергетических установок при эксплуатационных нагрузках является весьма актуальной. Ответственными объектами использования атомной энергетики (ОИАЭ) являются транспортные упаковочные комплекты (ТУК), предназначенные для транспортировки отработавшего ядерного топлива и радиоактивных отходов и разработанные для сбалансированного завершения ядерного топливного цикла. Согласно требованиям различных нормативных документов, они должны быть спроектированы с учетом широкого спектра различных режимов нагружения. Динамические нагрузки техногенного происхождения и высокой интенсивности зачастую являются здесь определяющими. Примером такого воздействия является падение ТУК при выполнении транспортно-технологических операций на ОИАЭ. При несоответствии проектируемых изделий условиям прочности и целостности оно может привести к серьезным нарушениям требований радиационной безопасности.

Разрабатываемое оборудование, соответственно, должно отвечать требованиям динамической прочности, что подразумевает наличие достаточной толщины конструктивных элементов, отвечающих за функционал. С другой стороны, необходимо минимизировать воздействие падающего оборудования на поверхность, с которой происходит соударение, что предполагает снижение металлоемкости падающих изделий. Для оптимизации данного противоречия может быть предложено существенное снижение перегрузок, возникающих в результате соударений, за счет эффективного демпфирования. Подбор эффективного демпфирующего устройства – сложная многоитерационная задача, требующая трудоемких исследований. При ее решении посредством натуральных экспериментов она становится ощутимо дорогостоящей. Актуальными становятся математические исследования с созданием цифровых моделей.

Точность математического анализа при создании цифровых моделей во многом зависит от применяемых методик, используемых программных комплексов и экспериментальных данных для создания расчетных геометрических моделей и моделей упругопластического поведения используемых конструкционных материалов. В работе [1] освещены основы конструкционного демпфирования, которое осуществляется за счет различных внутренних и внешних механизмов сопротивления, вызывающих потери энергии в конструкции. Конструкционное демпфирование, рассматриваемое в данной работе, относится к внутренним механизмам.

Различают конструкционное демпфирование, осуществляемое за счет поглощения энергии удара путем неупругого сопротивления материала деформируемых элементов конструкций (значительного пластического деформирования), и осуществляемое за счет поглощения энергии удара работой сил трения в сочленениях элементов. Независимо от природы энергетических потерь, основной характеристикой демпфирующих свойств механических систем принято считать относительное рассеяние энергии, также называемое коэффициентом поглощения, под которым понимают отношение необратимо рассеянной энергии за цикл нагружения к амплитудному значению энергии перемещения.

В настоящей работе рассматривается демпфирующее устройство для ТУК, осуществляющее поглощение энергии за счет неупругого сопротивления предназначенное для снижения перегрузок в транспортных упаковочных комплектах. Данный демпфер представляет собой сварную конструкцию, образованную двумя кольцевыми пластинами, между которыми должны быть размещены радиально установленные пластинчатые ребра различной высоты, выполненные с незначительным предварительным изгибом (рис. 1).

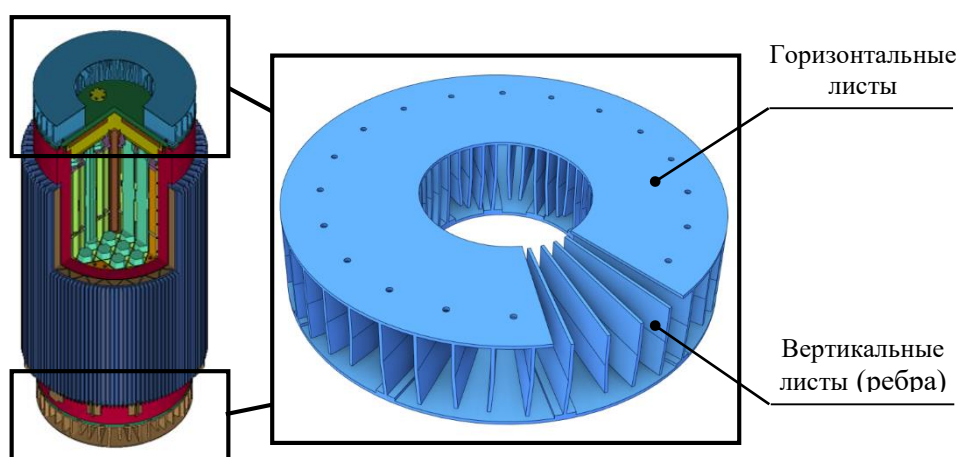


Рис. 1. Внешний вид рассматриваемого демпфирующего устройства для ТУК

Fig. 1. External appearance of the damping device under consideration for TPS

Различное оборудование имеет разные массогабаритные характеристики (форма, размеры, расположение центра масс и др.), соответственно, геометрические параметры демпфирующих устройств являются уникальными для каждой единицы оборудования и требуют подбора геометрических параметров, которые позволят демпферу выполнять свои функции наиболее эффективно. Также критериями оптимизации изделий являются их технологичность и унификация. Подбор всех параметров затруднен тем, что оптимальные размеры невозможно определить аналитическими методами из-за высокой сложности процесса деформирования демпфирующего устройства сопровождающегося нелинейными формоизменениями. Решение данных задач стало возможным при использовании программных комплексов (ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS, ЛОГОС и т.д.), основанных на численном моделировании конечно-элементными методами и позволяющих решать уравнения механики сплошной среды для определения напряженно-деформированного состояния узлов и элементов конструкций в условиях интенсивного динамического нагружения.

Задача подбора оптимальных геометрических параметров демпфера является итерационной, что подразумевает подготовку расчетных конечно-элементных моделей (КЭМ), проведение численных экспериментов и анализ результатов для большого количества демпфирующих устройств с разными геометрическими параметрами, соответственно, данный процесс занимает большое количество времени и вычислительных ресурсов. Также он затруднен тем, что при расчете нестационарных задач, связанных с высокоинтенсивным динамическим нагружением, КЭМ должна быть структурированной и обладать высоким качеством для минимизации накопления ошибки в процессе расчета. В данной работе представлено описание методов, позволяющих оптимизировать процесс подбора геометрических параметров демпфирующих устройств путем параметрического моделирования и автоматизирования со структурированным процессом анализа полученных результатов.

### **Используемый программный комплекс и модели поведения материала**

Сформулированная задача, связанная с высокоинтенсивным динамическим нагружением, отличается значительной сложностью геометрической и физической нелинейностью, локальностью силовых воздействий, а также временной неоднородностью материала. Программным комплексом, позволяющим решать нестационарные задачи, связанные с высокоинтенсивным динамическим нагружением, является ПК ANSYS/LS-DYNA. LS-DYNA – многоцелевая программа, предназначенная для решения трехмерных динамических нелинейных задач механики деформируемого твердого тела [2, 3]. В LS-DYNA реализованы эффективные методы решения задач: явный и неявный метод интегрирования конечных элементов, многокомпонентная гидродинамика, бессеточный метод, метод Галеркина. Благодаря поддержке различных методов расчета и интеграции с CAD/CAE-системами, LS-DYNA считается одним из самых гибких и универсальных решателей нелинейной динамики.

Библиотека моделей материалов LS-DYNA включает более 120 типов металлов, композитных материалов, грунтов, керамики, стекла, пенополиуретанов, жидких и газообразных сред, взрывчатых веществ в условиях термомеханического воздействия, в условиях больших давлений, скоростей деформаций и температур. Здесь представлено более 30 моделей контактно-ударных алгоритмов, которые учитывают все особенности взаимодействия контактирующих сред: скольжение, сухое и вязкое трение, тепловой контакт, отлипание, вязкое и хрупкое разрушение, пробивание, контакт абсолютно твердых тел с деформируемыми структурами и между собой, сварные, болтовые и заклепочные соединения. Данная библиотека позволяет определять реакции деформируемой механической системы на заданное возмущение. В результате решения задачи программа дает возможность определить перемещения, скорости, ускорения элементов этой системы, напряжения и деформации в них, а также производные от них величины. При решении учитываются силы инерции, а искомые величины ищутся как

функции времени. LS-DYNA включает большой набор элементов с упрощенной (одноточечной) и полной схемой интегрирования.

Задача расчета падения оборудования выполняется по явной схеме интегрирования уравнений динамики. Явный метод решения, используемый LS-DYNA, обеспечивает наиболее эффективный расчет быстротекущих процессов, высокоскоростных процессов с большими динамическими деформациями, квазистатических задач с большими деформациями и высокой нелинейностью, а также сложных задач контакта, решение которых организовано удобнее, чем в обычном ANSYS. Вместо специальных контактных элементов назначаются контактные пары (возможен и автоматический поиск контактирующих пар). Учитывается не только статический, но и динамический коэффициент трения, зависящий от относительных скоростей на поверхностях контакта. Явными методами называют методы решения уравнения динамики, не связанные с решением систем уравнений, а использующие рекуррентные соотношения, выражающие перемещения, скорости и ускорения на данном шаге через их значения на предшествующих шагах. Такая методика подразумевает малые шаги и достаточно мелкую разбивку, чтобы правильно описать диагональной матрицей распределение масс. Вместе с тем, малый шаг позволяет отследить все изменения в характеристиках конструкции и ее поведении. Поскольку вместо решения полной системы уравнений выполняется умножение на матрицы элементов, положительной определенности матрицы жесткости не требуется. Даже при распадении модели на отдельные элементы, выполнение умножения всегда удается. Срыва нелинейного решения не происходит.

Отметим еще одно важное обстоятельство. При ударе в конструкции индуцируются обычно короткие по длине волны вибрационной природы. Для их описания конечными элементами необходимо обеспечить большое число степеней свободы. Это может быть сделано или благодаря увеличению числа конечных элементов, или применением элементов с большим числом степеней свободы (в частности, узловыми скоростями и ускорениями).

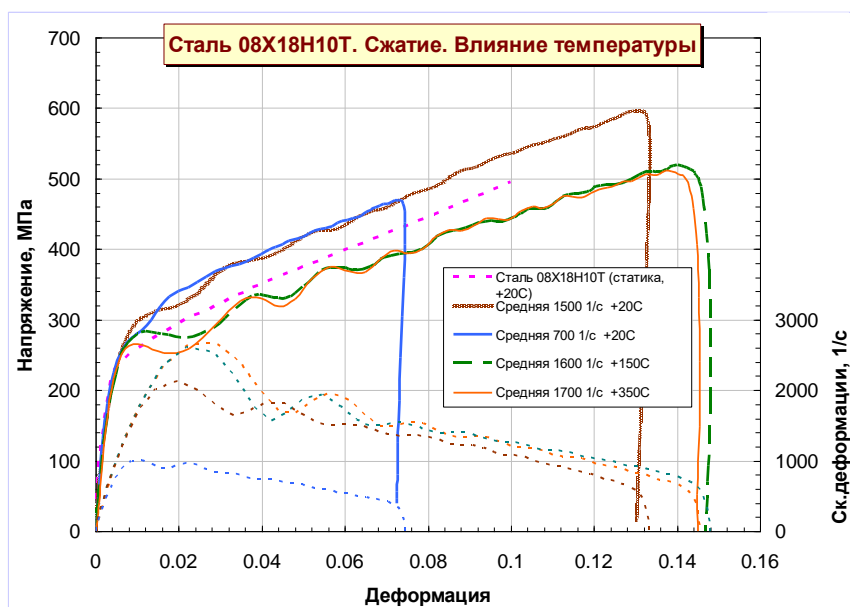


Рис. 2. Диаграммы деформирования стали 08X18N10T при сжатии при различных температурах и скоростях деформации

Fig. 2. Strain diagrams for 08Kh18N10T steel under compression at various temperatures and strain rates

Нагрузки вводятся массивами по времени и соответствуют одному шагу нагружения. Размер шага определяется скоростью звука в материале и наименьшим размером ребра элемента в модели и вычисляется автоматически. В случае высокоскоростного динамического

нагружения, сопровождающегося значительным пластическим деформированием, необходимо иметь действительные диаграммы, которые получаются на основе расчетно-экспериментальных исследований путем определения параметров математической модели деформирования материалов. В качестве конструкционного материала демпфирующего устройства принята сталь аустенитно класса 08X18H10T. При помощи экспериментальных исследований методом Кольского по схеме Николоса [4] для нее были получены диаграммы деформирования в условиях сжатия и растяжения при различных скоростях деформации и температуры (рис. 2). Подробные результаты экспериментальных исследований представлены в [5, 6].

По результатам экспериментальных исследований деформирования стали 08X18H10T при статическом и динамическом нагружениях по средствам решения оптимизационной задачи определены параметры модели *Jonson-Cook* из библиотеки LS-DYNA. Модель *Jonson-Cook* определяет напряжение текучести как функцию деформации, скорости деформации и температуры и имеет следующий вид [7]:

$$\sigma_{JC} = (A + B \cdot \varepsilon_p^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*) \cdot (1 - T^{*m}),$$

где  $A + B \cdot \varepsilon_p^n$  – статическая составляющая;  $1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^*$  – динамическая составляющая;  $1 - T^{*m}$  – температурная составляющая; A, B, C, n, m – постоянные материала;  $\varepsilon_p$  – эффективная пластическая деформация;  $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$  – безразмерная пластическая скорость деформации ( $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \frac{1}{c}$ );

$T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}$  – модифицированная гомологическая температура;  $T_0 = 293$  К и  $T_m = 1723$  К – соответственно температура окружающей среды и температура плавления материала.

Параметры, определенные по результатам исследований, заданы в соответствующей модели материала *Jonson-Cook* (A, B, n, C, C2, p, m) из библиотеки LS-DYNA.

### Параметрическое моделирование

Для оптимизации подготовки большого количества расчетных моделей демпфирующих устройств было принято решение о применении параметрического моделирования посредством языка сценариев APDL программного комплекса ANSYS. APDL (Ansys Parametric Design Language) – язык сценариев, который можно использовать для автоматизации распространенных задач и построения геометрической и КЭМ путем задания параметров (переменных, определенных пользователем) в механике твердого тела, гидро- и аэродинамике, термодинамике и др. Эта особенность позволяет получать не только решения серии задач для изменяющихся в разных диапазонах параметров, но и проводить оптимизацию конструкции, не используя специализированный модуль ANSYS. Помимо этого, в отличие от специализированного модуля ANSYS, язык сценариев APDL позволяет построить структурированную КЭМ высокого качества, релевантную для расчета нестационарных задач, связанных с высокоинтенсивным динамическим нагружением [8].

Для моделирования демпфирующих устройств при помощи языка сценариев APDL был подготовлен комплекс макросов, работа которых включает в себя следующие этапы:

- обработка исходных данных (параметров геометрии и конечно-элементной модели демпфирующего устройства, нагрузок и граничных условий) заданных пользователем;
- построение геометрической модели демпфирующего устройства;
- построение конечно-элементной сетки;
- приложение нагрузок и граничных условий;
- формирование расчетного «.k» файла.

В качестве исходных данных принимаются следующие параметры демпфирующего устройства (рис. 3):

- наружный  $D_n$  и внутренний  $D_v$  диаметр;
- толщина горизонтальных листов демпфера  $S_g$ ;
- толщина демпфирующих ребер  $S_d$ ;
- высота демпфера  $h$ ;
- количество повторяющихся сегментов ребер;
- угол наклона демпфирующих ребер  $\alpha_d$ .

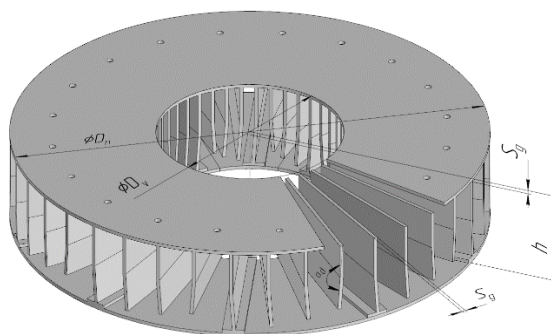


Рис. 3. Регулируемые параметры демпфирующего устройства

Fig. 3. Adjustable parameters of the damping device

Результат параметрического моделирования геометрии демпфирующих устройств с различными параметрами представлен на рис. 4.

$D_n=2.17$   
 $D_v=0.85$   
 $S_g=0.02$   
 $S_d=0.04$   
 $h=0.45$   
 $Num\_seg=6$   
 $Angd=4$

$D_n=1.9$   
 $D_v=1.1$   
 $S_g=0.04$   
 $S_d=0.02$   
 $h=0.7$   
 $Num\_seg=10$   
 $Angd=8$

$D_n=2.4$   
 $D_v=0.5$   
 $S_g=0.02$   
 $S_d=0.02$   
 $h=0.55$   
 $Num\_seg=8$   
 $Angd=2$

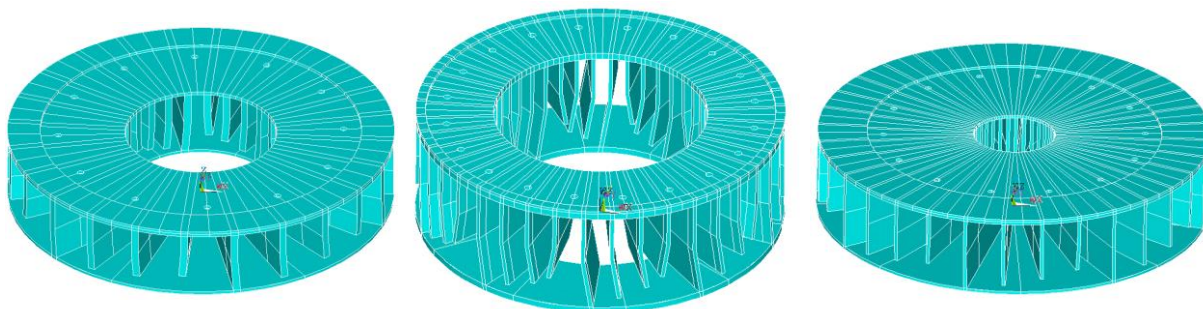
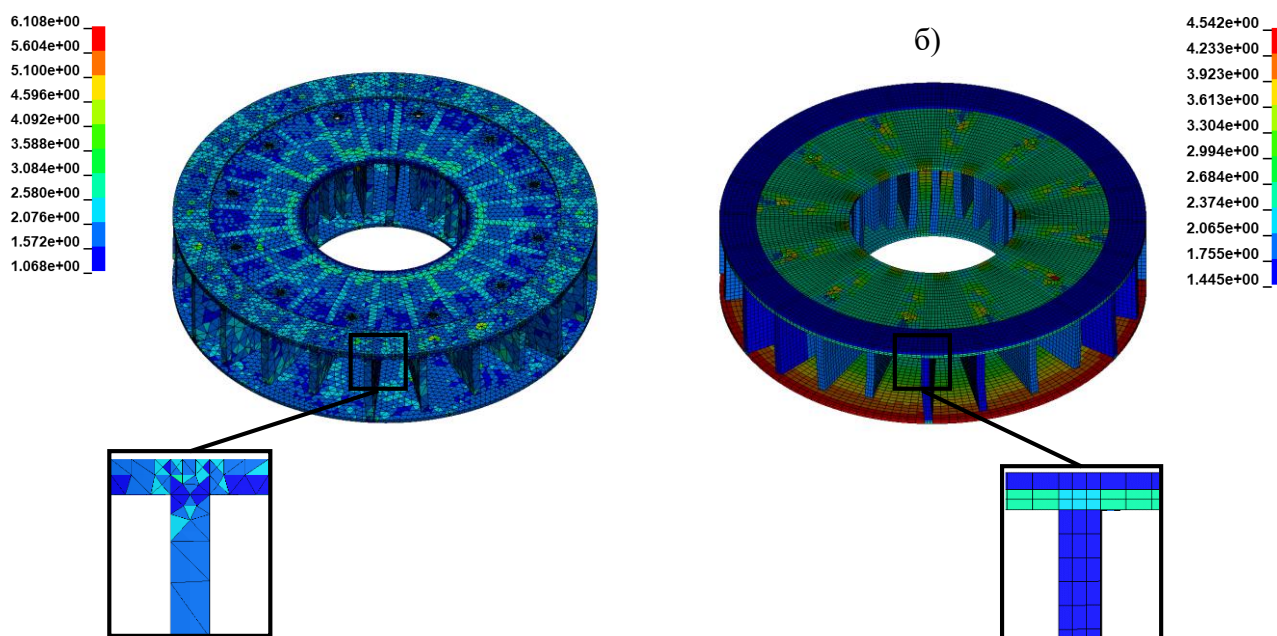


Рис. 4. Результат параметрического моделирования геометрии демпфирующих устройств

Fig. 4. Result of parametric modeling of the damping device geometry

Поскольку одним из наиболее нагруженных узлов являются элементы крепежа демпфирующего устройства, постольку существует возможность задания количества и параметров (диаметр, диаметр расположения) болтовых соединений. Помимо демпфирующего устройства, задаются параметры макета корпуса оборудования, к которому оно крепится (высота, толщина стенки, масса). После построения геометрической модели, ввиду условной симметрии конструкции, нагрузок и граничных условий для снижения затрачиваемых на расчет машинных ресурсов оставляется только половина геометрической модели. При ее построении (рис. 4) элементы конструкции разбиваются на элементарные объемы для построения регулярной структурированной КЭМ. Это способствует более точным результатам динамического расчета в сравнении с тетраэдрической КЭМ за счет снижения скорости накопления ошибки

виду более высокого качества элементов. Качество КЭМ в данном случае определяется по аспектному соотношению (aspect ratio), т.е. отношению размеров элементов относительно друг друга. На рис. 5 представлено сравнение аспектного отношения КЭМ построенных автоматически с помощью тетраэдрических элементов, а также структурированных гексагональных элементов при примерно одинаковом количестве элементов.



**Рис. 5. Сравнение аспектного отношения конечно элементных моделей:**  
*а – тетраэдрические элементы; б – структурированные гексагональные элементы*

**Fig. 5. Comparison of the aspect ratio of finite element models**  
*a – tetrahedral elements; b – structured hexagonal elements*

В данном случае аспектное соотношение тетраэдрических элементов выше, чем гексагональных. При этом очевидно, что при том же количестве элементов листы и ребра демфирующего устройства включают в себя 1-2 элемента по толщине стенки, что недопустимо при моделировании тонкостенных структур (рекомендуется минимум три элемента по толщине стенки для корректного расчета при деформациях, характеризующихся изгибом). Можно сделать вывод о необходимости построения структурированной гексагональной КЭМ. Это является трудоемким процессом, в частности, из-за необходимости разделения элементов конструкции на элементарные объемы. Логика написанных макросов решает данную проблему и автоматически устанавливает настройки КЭМ (размер элементов, количество делений определенных граней). После ее построения автоматически учитываются характеристики моделей поведения материалов, используемых в различных элементах конструкции, создаются контактные взаимодействия, а также нагрузки и граничные условия: скорость падения, ускорение свободного падения, условие симметрии, преграда с жестким соударением. В итоге создается рабочий файл, готовый к запуску на расчет без дополнительных доработок. Окончательный результат работы комплекса макросов представлен на рис. 6.

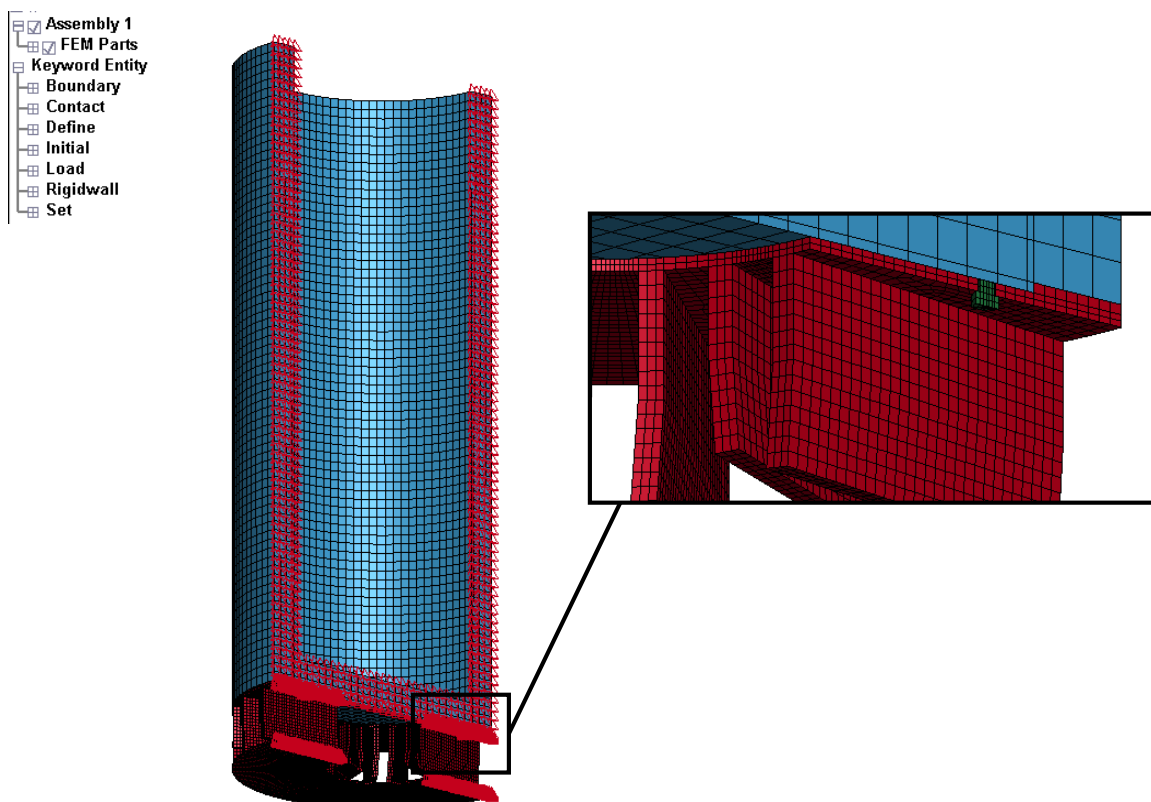


Рис. 6. Расчетная модель, созданная по средствам параметрического моделирования

Fig. 6. Computational model created using parametric modeling

### Методика подбора оптимальных параметров демпфирующих устройств

Главным назначением демпфирующих устройств механического типа является снижение нагрузок, возникающих в различном оборудовании в силу плавного поглощения кинетической энергии за счет пластического деформирования материала. Следовательно, основным критерием подбора параметров демпфирующего устройства являются ускорения, возникающие в исследуемом объекте и его внутреннем содержимом при соударении. Общий вид графика ускорений представлен на рис. 7. С точки зрения возникающих ускорений, процесс падения оборудования с рассматриваемого демпфирующего устройства можно разделить на следующие этапы, отраженные на графике: соударение демпфера с жестким основанием; накопление пластических деформаций в ребрах демпфирующего устройства; полная остановка и смена направления движения на противоположное (отскок конструкции).

График ускорения имеет два пиковых значения. Первое из них возникает за счет первичного соударения конструкции с жестким основанием и зависит в основном от жесткости демпфирующего устройства, соответственно, слишком высокая жесткость (которая, в свою очередь, определяется толщиной, количеством ребер и углом их наклона) может привести к большим перегрузкам в момент соударения с жестким основанием. Второе пиковое значение возникает при остановке демпфируемого устройства. В идеальном случае происходит плавная остановка за счет постепенного накопления пластических деформаций. Если жесткость и металлоемкость демпфирующего устройства недостаточна для поглощения необходимого количества кинетической энергии, остановка может произойти с высокими перегрузками ввиду достижения максимально возможного деформирования демпфирующих ребер. Очевидно, что для минимизации возникающих в демпфируемом оборудовании перегрузок необходимо подобрать параметры таким образом, чтобы жесткость была оптимальной, так как отклонение параметров от оптимальных значений в любом направлении приведут к увеличению ускорений.

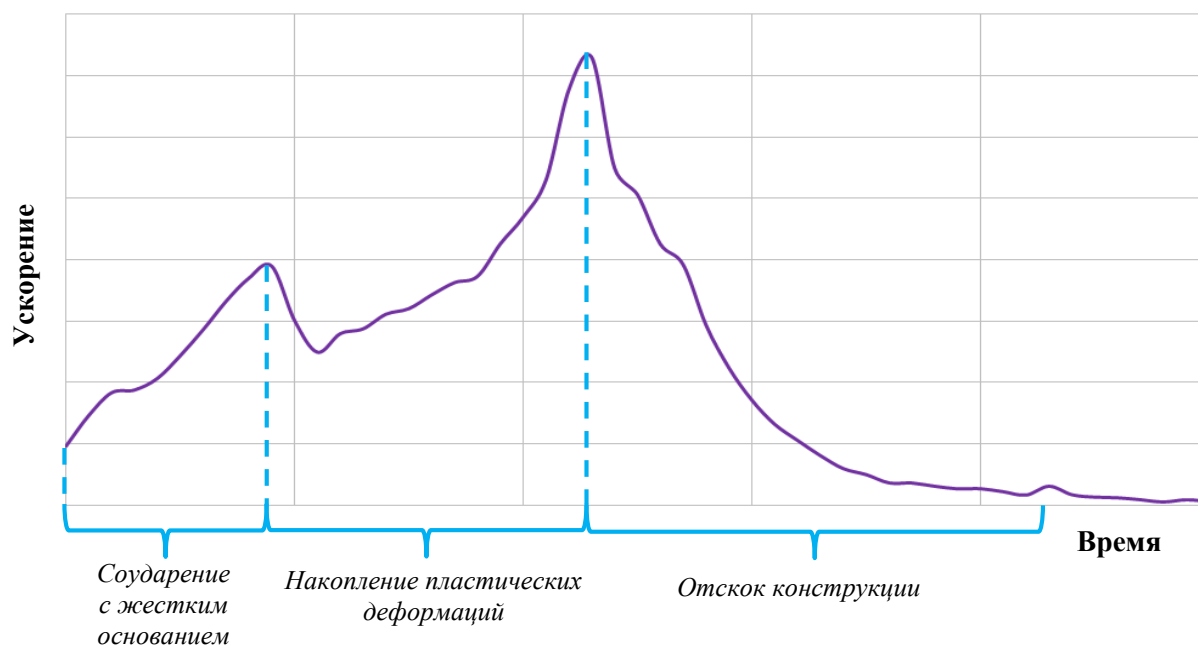


Рис. 7. Характер изменения ускорений в демпфируемом оборудовании в общем случае

Fig. 7. General character of acceleration changes in damped equipment

Помимо значения ускорений, возникающих в оборудовании, важным параметром является также относительное количество поглощенной демпфером кинетической энергии. Помимо пластических деформаций, возникают также упругие, потенциальная энергия которых переходит в кинетическую энергию при отскоке. Во-первых, отскок приводит к дополнительным соударениям, а поведение контейнера после него сложно спрогнозировать. Во-вторых, после смены направления движения корпуса демпфируемого оборудования в результате отскока, содержимое корпуса в отдельных случаях может продолжать движение по инерции в противофазе, что приводит к дополнительным перегрузкам.

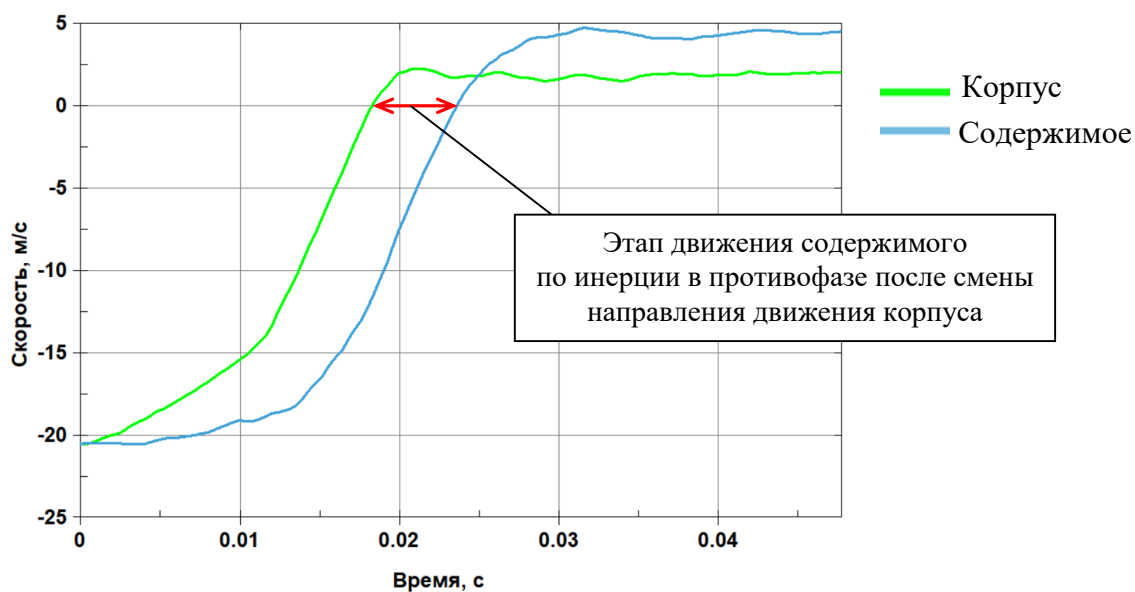


Рис. 8. Характерный случай движения корпуса и его содержимого в противофазе в процессе соударения

Fig. 8. Typical case of out-of-phase motion of the housing and its contents during impact

На рис. 8 представлены графики изменения скорости для корпуса оборудования и его содержимого для случая движения в противофазе. Исходя из этого, параметры демпфирующего устройства должны подбираться таким образом, чтобы минимизировать количество поглощенной кинетической энергии.

При проектировании демпфирующего устройства и подборе его геометрических параметров, помимо целевых критериев, необходимо также руководствоваться технологическими, номенклатурными и эксплуатационными ограничениями. Особенности технологического процесса изготовления демпфирующих устройств накладывают ограничения на минимальное расстояние между ребрами жесткости, соответственно, ограничивая их количество. Масса и высота демпфирующего устройства, в свою очередь, может зависеть от особенностей транспортно-технологических операций, которые накладывают ограничения на массогабаритные характеристики в процессе эксплуатации. Также при проведении сравнительного анализа и выборе изменяемых параметров должна учитываться номенклатура применяемого металлопроката. Указанные выше, а также специфичные для отдельных случаев ограничения необходимо учитывать при оптимизации геометрических параметров демпфирующих устройств.

### **Анализ и подбор оптимальных параметров демпфирующего устройства**

В качестве примера было рассмотрено демпфирующее устройство для оборудования, корпус которого представляет цилиндрическую обечайку со следующими параметрами:

- диаметр  $d = 2,2$  м;
- высота  $h = 4,8$  м;
- толщина стенки  $s = 0,2$  м;
- масса  $m = 50\,000$  кг.

В качестве исходного события принималось падение в вертикальном положении с высоты 9 м (скорость в момент соударения составляет 13,3 м/с). В качестве изменяемых параметров демпфирующего устройства в данном примере была выбрана толщина ребер и их количество, так как они в наибольшей степени влияют на жесткостные характеристики. Наружный диаметр демпфирующего устройства принят равным наружному диаметру корпуса. Ввиду необходимости анализа большого количества данных, влияние остальных параметров (высота демпфирующего устройства, внутренний диаметр, толщина горизонтальных листов, угол наклона ребер и др.) на характеристики демпфирующего устройства в этой работе не рассматривалось. Они были приняты с учетом опыта проектирования и оставались неизменными в процессе анализа.

В конечном счете, были рассмотрены и проанализированы демпфирующие устройства со следующими параметрами изменяемыми параметрами:

- толщина ребер демпфирующего устройства 0,015; 0,02; 0,025; 0,035; 0,040;
- количество ребер демпфирующего устройства 16, 20, 24, 28, 32 (соответственно 4, 5, 6, 7, 8 повторяющихся сегментов).

Графики изменения ускорений возникающих в корпусе в процессе падения для разных толщин ребер представлены на рис. 9. Зависимость максимальных ускорений возникающих в процессе падения от толщины ребер представлена на рис. 10. Отклонение толщины ребер от оптимального значения приводит к увеличению ускорений. Толщина ребер ниже оптимального значения (в данном случае 0,02 м) является недостаточной для поглощения необходимого количества энергии в процессе соударения. В свою очередь, при увеличении толщины ребер растет жесткость демпфера, что приводит к росту ускорений на начальном этапе соударения с жестким основанием.

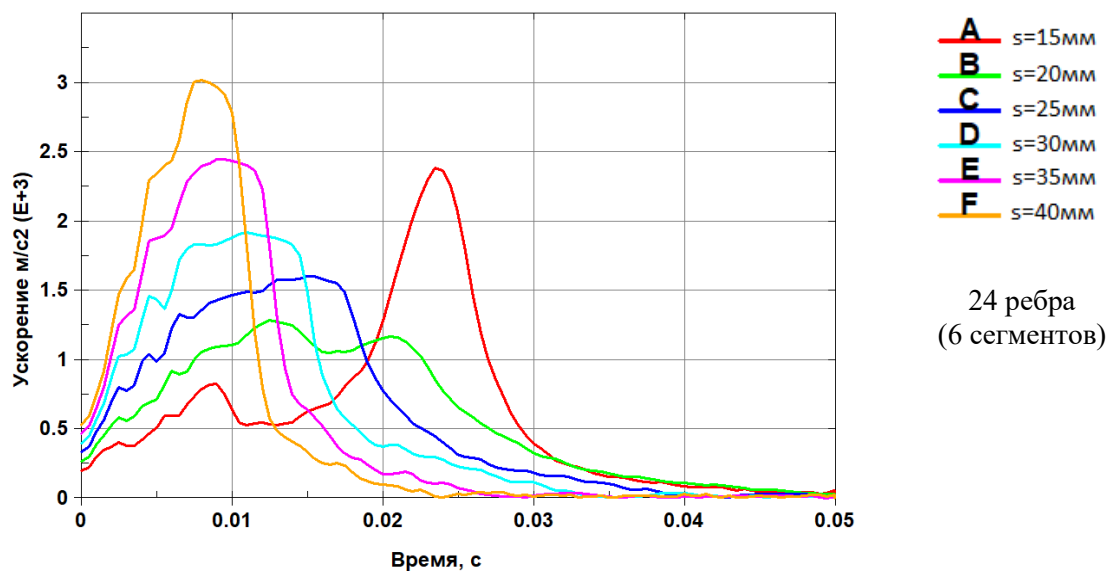


Рис. 9. Изменение ускорений возникающих в корпусе в процессе падения для разных толщин ребер

Fig. 9. Change in accelerations occurring in the housing during fall for different rib thicknesses

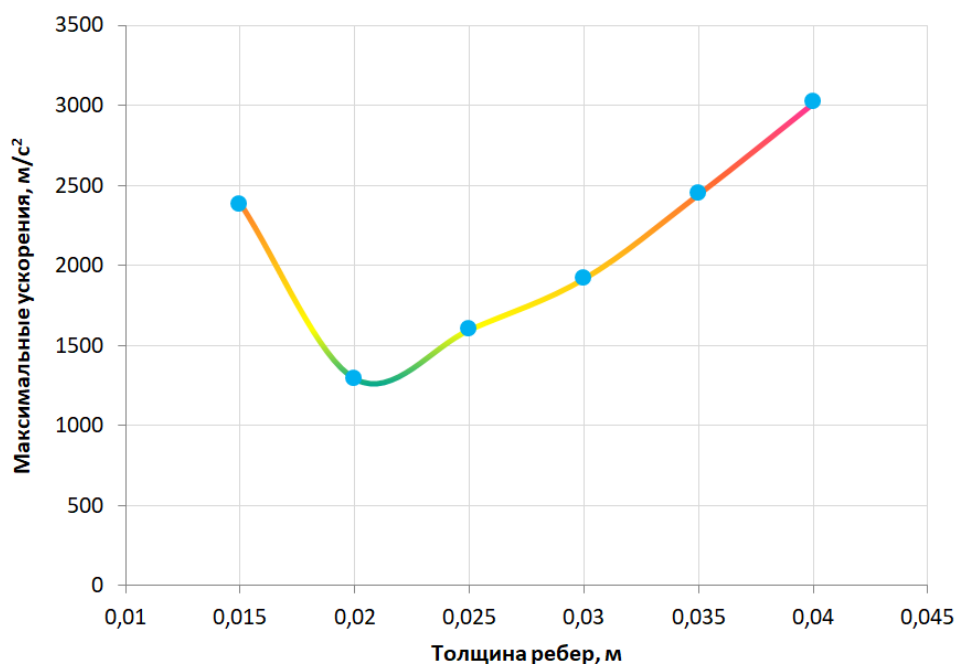


Рис. 10. Зависимость максимальных ускорений возникающих в процессе падения от толщины ребер

Fig. 10. Dependence of maximum accelerations occurring during fall on rib thickness

Графики изменения кинетической энергии в процессе падения для разных толщин ребер представлены на рис. 11. Зависимость высоты отскока от толщины ребер представлена на рис. 12.

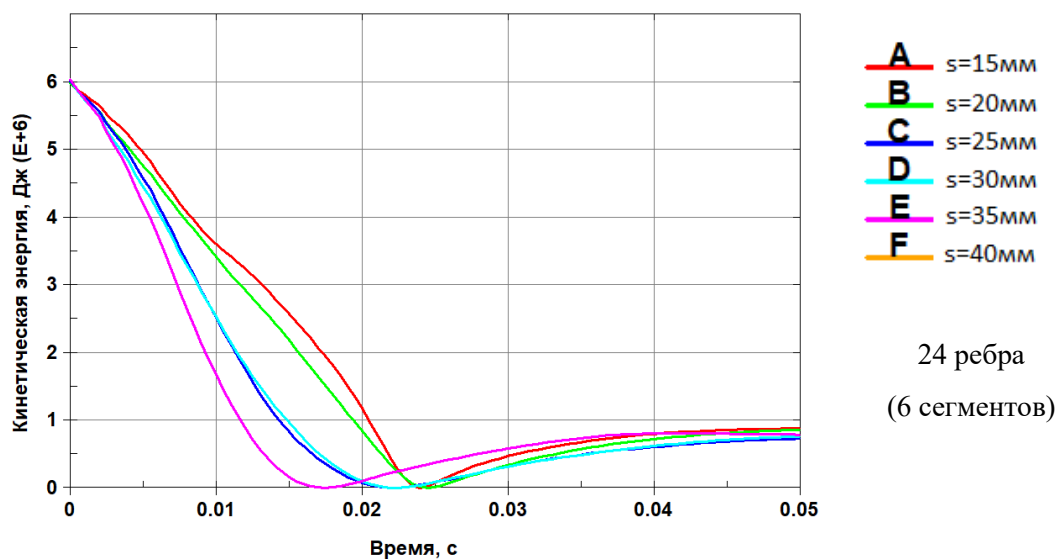


Рис. 11. Изменение кинетической энергии в процессе падения для разных толщин ребер

Fig. 11. Change in kinetic energy during fall for different fin thicknesses

Из рис. 11 видно, что увеличение толщины ребер приводит к увеличению скорости поглощения кинетической энергии и снижению количества непоглощенной кинетической энергии. Рис. 12, в свою очередь, показывает зависимость высоты отскока от толщины ребер, значение которой напрямую зависит от непоглощенной кинетической энергии. Графики изменения ускорений возникающих в корпусе в процессе падения для разного количества ребер представлены на рис. 13. Зависимость максимальных ускорений возникающих в процессе падения от толщины ребер представлена на рис. 14.

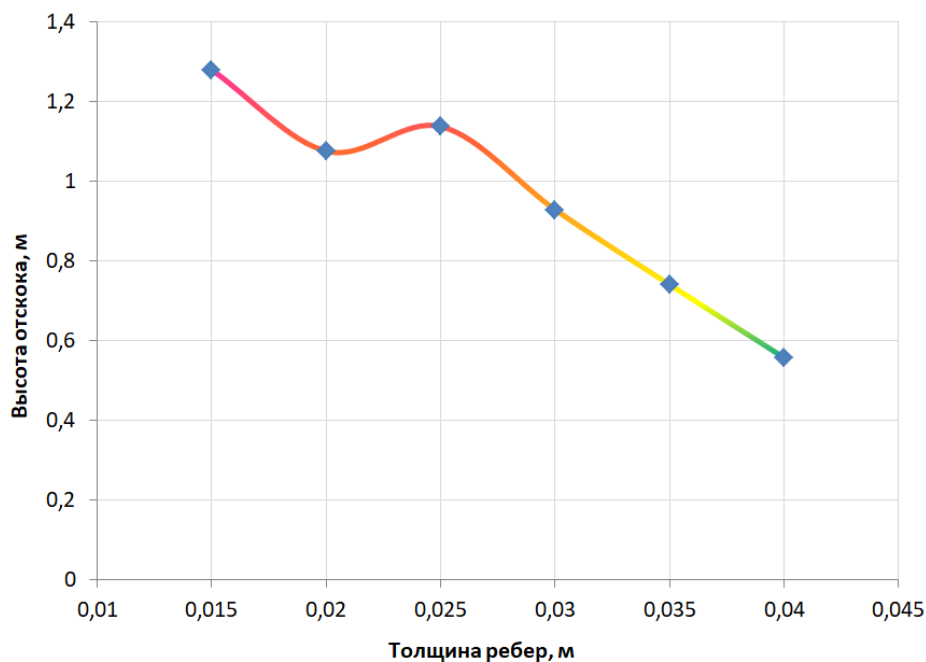
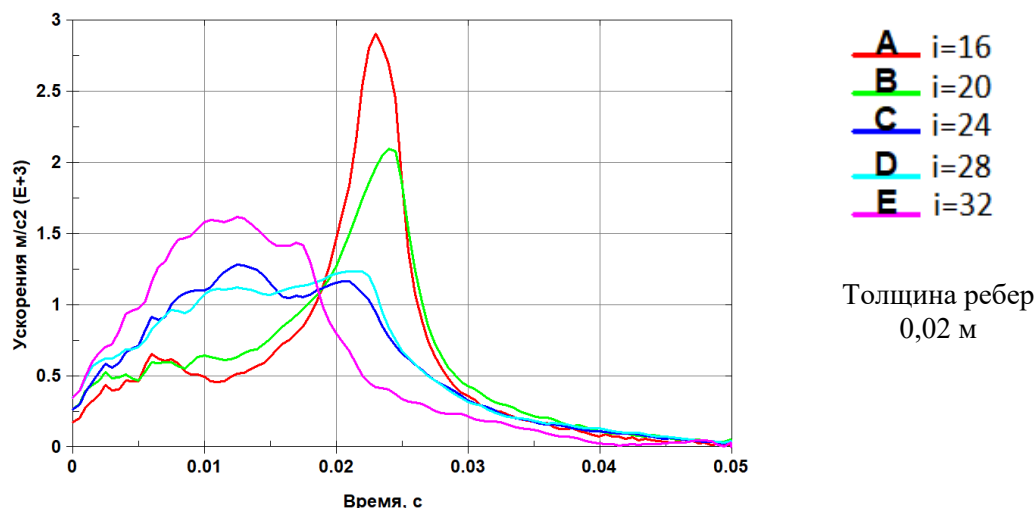


Рис. 12. Зависимость высоты отскока от толщины ребер

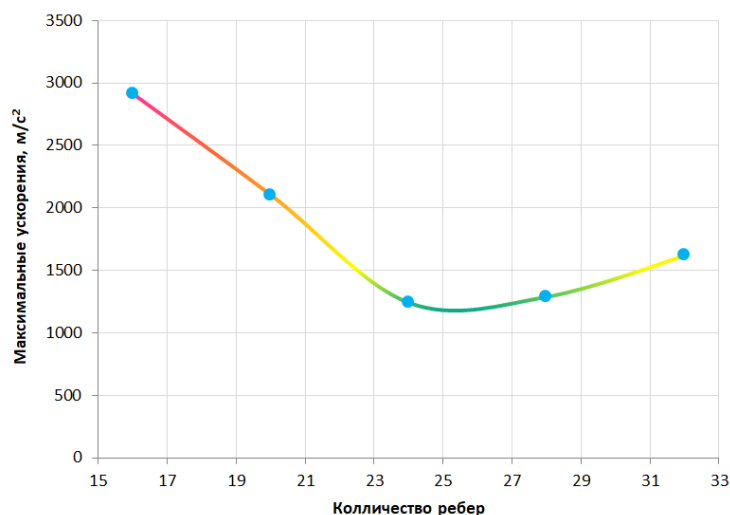
Fig. 12. Rebound height versus fin thickness



**Рис. 13. Изменение ускорений, возникающих в корпусе в процессе падения, для разного количества ребер**

**Fig. 13. Change in acceleration occurring in the body during fall for different numbers of fins**

Графики на рис. 13 и 14 показывают, что, как и в случае с толщиной ребер демпфирующего устройства, существует оптимальное значение количества ребер, при котором ускорения, возникающие в корпусе демпфируемого устройства, минимальны. Ввиду того, что рассматриваемое в данном примере демпфирующее устройство состоит из сегментов, в каждом из которых четыре ребра, наиболее оптимальным значением с точки зрения ускорений принимается демпфер, включающий в себя шесть сегментов (24 ребра). При этом демпфирующее устройство, состоящее из семи сегментов (28 ребер), показывает схожий результат.



**Рис. 14. Зависимость максимальных ускорений возникающих в процессе падения от толщины ребер**

**Fig. 14. Dependence of maximum acceleration occurring during fall on fin thickness**

Графики изменения кинетической энергии в процессе падения для разного количества ребер представлены на рис. 15. Зависимость высоты отскока от количества ребер представлена на рис. 16.

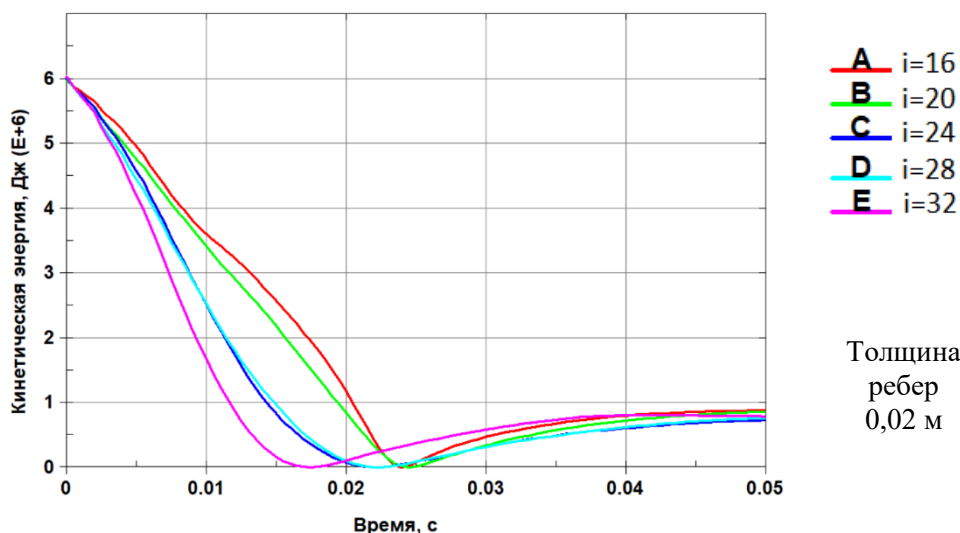


Рис. 15. Изменение кинетической энергии в процессе падения для разного количества ребер

Fig. 15. Change in kinetic energy during fall for different numbers of fins

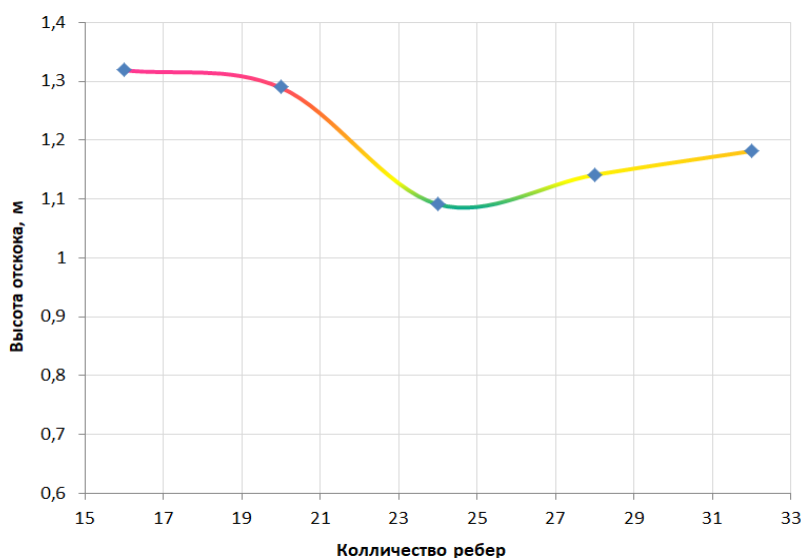


Рис. 16. Зависимость высоты отскока от количества ребер

Fig. 16. Rebound height versus number of fins

### Выводы

Анализ полученных зависимостей позволил определить зависимости основных характеристик демпфирующего устройства от толщины и количества ребер демпфера. Минимальные ускорения возникают при толщине ребер демпфирующего устройства, равной 0,02 м. Анализ влияния количества ребер, в свою очередь, показал, что наиболее оптимальным значением, с точки зрения ускорений и количества поглощенной кинетической энергии, является демпфирующее устройство, состоящее из 6 сегментов (24 ребер).

### Заключение

В работе описаны подходы, позволяющие оптимизировать и структурировать процесс подбора геометрических параметров демпфирующих устройств для ТУК. Применение пара-

метрического моделирования средствами языка сценариев APDL позволило значительно сократить время на построение конечно-элементных и расчетных моделей с учетом всех особенностей и сложностей задач, связанных с высокоинтенсивными динамическими нагрузками, а так же собрать большое количество анализируемых данных. Полученные по средствам комплекса макросов данные позволили более детально изучить взаимное влияние геометрических параметров демпфирующего устройства на его свойства и структурировать процесс подбора данных параметров. Были представлены целевые критерии, принимающиеся во внимание при оценке эффективности демпфирующего устройства, также на примере был рассмотрен процесс подбора параметров демпфирующего устройства для ТУК по целевым критериям. Изучение влияния других параметров (угол наклона ребер; направление изгиба и др.) планируется в дальнейших математических исследованиях.

Получен экономический эффект за счет отказа от натуральных дорогостоящих испытаний при подбore необходимых параметров и значительного сокращения временных затрат при разработке эффективных демпфирующих устройств для ответственного оборудования ОИАЭ, в частности, для ТУК, на стадии проектирования. Данная методика может быть отмасштабирована и применена для широко спектра оборудования ЯЭУ, подвергающегося динамическим воздействиям высокой интенсивности.

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

### Библиографический список

1. **Петрунин, В.В.** Использование расчетных методов для оценки работоспособности демпфирующих устройств при конструировании оборудования ядерных энергетических установок». В.В. Петрунин, О.Ю. Виленский, Д.А. Лапшин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы, выпуск 3. – 2018. – С. 57-85.
2. **John, O.** Hallquist. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation. – 1998.
3. LS-DYNA 960 Keyword User's Manual. Livermore Software Technology Corporation. Version 960. March 2001
4. **Кольский, Г.** Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения // Механика. 1950. – № 4. – С.108-119.
5. **Лапшин, Д.А.** Расчетно-экспериментальный анализ прочности внутриобъектовых транспортных контейнеров реакторов типа БН в авариях с падением: Дисс... канд. техн. наук. – Нижний Новгород, 2015.
6. **Митенков, Ф.М.** Экспериментальное исследование и математическое моделирование сталей марок Ст3, 20Х13 и 08Х18Н10Т в широком диапазоне скоростей деформаций и температур / Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Д.А. Лапшин [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. – 2015. – Т. 56. – № 6 (334). – С. 51-58.
7. **Johnson, G.R.** A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures / G.R. Johnson, W.H. Cook // Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistic. Hague, Netherlands, 19-21.04.1983. – 1983. – P. 541-547.
8. **Кравчук, А.С.** Параметрическое моделирование физических процессов средствами ANSYS APDL: монография / А.С. Кравчук, А.И. Кравчук. – СПб.: Научно-технологические технологии, 2025. – 164 с. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://publishing.intelgr.com/archive/Parametricheskoe-modelirovanie-fizicheskikhprotsessov-sredstvami-ANSYS-APDL.pdf>. (дата обращения 15.08.2025).

### References

1. Petrunin V.V., Vilenskiy O.Yu., Lapshin D.A., et al. Ispol'zovanie raschetnykh metodov dlya otsenki rabotosposobnosti dempfiroyushchikh ustroystv pri konstruirovaniy oborudovaniya yadernykh energeticheskikh ustanovok [Use of calculation methods for evaluating the performance of damping devices in the design of nuclear power plant equipment]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Yaderno-reaktornye konstanty* [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Reactor Constants] 2018;(3):57-85. (in Russian).
2. John O. Hallquist. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation; 1998.

3. LS-DYNA 960 Keyword User's Manual. Version 960. Livermore Software Technology Corporation; 2001.
4. Kol'skiy G. Issledovanie mekhanicheskikh svoystv materialov pri bol'shikh skorostyakh nagruzheniya [Investigation of mechanical properties of materials at high strain rates]. *Mekhanika* [Mechanics] 1950;(4):108-119. (in Russian).
5. Lapshin D.A. Raschetno-eksperimental'nyy analiz prochnosti vnutriob"ektovykh transportnykh konteynerov reaktorov tipa BN v avariyyakh s padeniem [Computational and experimental strength analysis of in-vessel transport containers for BN-type reactors in drop accidents]. Diss. cand. tech. sci. Nizhniy Novgorod; 2015. (in Russian).
6. Mitenkov F.M., Kaydalov V.B., Lapshin D.A., et al. Eksperimental'noe issledovanie i matematicheskoe modelirovanie staley marok St3, 20Kh13 i 08Kh18N10T v shirokom diapazone skorostey deformatsiy i temperatur [Experimental study and mathematical modeling of St3, 20Kh13 and 08Kh18N10T steels over a wide range of strain rates and temperatures]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Applied Mechanics and Technical Physics] 2015;56(6):51-58. (in Russian).
7. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In: Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistic; 1983 Apr 19-21; Hague, Netherlands. 1983. p. 541-547.
8. Kravchuk A.S., Kravchuk A.I. Parametricheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov sredstvami ANSYS APDL [Parametric modeling of physical processes using ANSYS APDL]. St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii; 2025. 164 p. Available from: <https://publishing.intelgr.com/archive/Parametricheskoe-modelirovanie-fizicheskikhprotsessov-sredstvami-ANSYS-APDL.pdf>. [accessed 2026 Aug 8 2025]. (in Russian).

**Дата поступления  
в редакцию: 01.02.2026**

**Дата принятия  
к публикации: 08.04.2026**

УДК 621.039

EDN XLUEIK

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
ВЫБОРА МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ  
ДЛЯ АНАЛИЗА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДОВ  
В ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЕ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА**

**Д.Д. Курицин**

ORCID: 0000-0001-9384-6950 e-mail: kuritsin.dd@nntu.ru

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

**Д.В. Доронков**

ORCID: 0000-0003-0668-4215 e-mail: doronkov.dv@nntu.ru

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

**Д.С. Николаев**

ORCID: 0000-0003-2244-4780 e-mail: nikolaev.ds@nntu.ru

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

**А.В. Рязанов**

ORCID: 0000-0002-4951-8930 e-mail: riazanov.av@nntu.ru

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

**Д.Н. Солнцев**

ORCID: 0000-0002-1756-2363 e-mail: solntsev@nntu.ru

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

**М.А. Легчанов**

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

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

**Д.А. Кудряшов**

ORCID: 0009-0001-1189-0788 e-mail: kud1904@rambler.ru

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

Представлены результаты валидации моделей турбулентности k-epsilon, SST и BSL RSM применительно к моделированию течения теплоносителя в геометрии, характерной для призматической активной зоны высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР). Исследования выполнены на экспериментальном стенде, воспроизводящем центральное продольное сечение топливной колонны с каналом ПС СУЗ, пятью каналами охлаждения и двумя межблочными зазорами. Измерения полей скорости проводились методом лазерной доплеровской анемометрии в диапазоне  $Re = 17500-27000$ . Численное моделирование выполнялось в ANSYS CFX v.22. Установлено, что распределение расхода по каналам модели не зависит от режима течения: доля расхода через

межблочные зазоры составляет 2,0-2,2 %, через канал ПС СУЗ – 27-28 %, через каждый из пяти каналов охлаждения не превышает 14 %. Модели SST и BSL RSM показали удовлетворительное согласование с экспериментом: отклонения в межблочных зазорах не превышают 7-8 %, в каналах охлаждения – 3 %. Модель k-epsilon систематически завышает байпасный расход на 14-16%.

**Ключевые слова:** высокотемпературный газоохлаждаемый реактор; призматическая активная зона; байпасное течение; межблочный радиальный зазор; CFD-моделирование; валидация моделей турбулентности; лазерная доплеровская анемометрия.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Курицин, Д.Д. Расчетно-экспериментальное обоснование выбора модели турбулентности для анализа перераспределения расходов в призматической активной зоне высокотемпературного газоохлаждаемого реактора / Д.Д. Курицин, Д.В. Доронков, Д.С. Николаев, А.В. Рязанов, Д.Н. Солнцев, М.А. Легчанов, Д.А. Кудряшов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 2. С. 57-69. EDN XLUEIK

## COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL VALIDATION OF TURBULENCE MODELS FOR FLOW DISTRIBUTION ANALYSIS IN A PRISMATIC CORE OF HIGH TEMPERATURE GAS COOLED REACTOR

**D.D. Kuritsin**

ORCID: 0000-0001-9384-6950 e-mail: kuritsin.dd@nntu.ru  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**D.V. Doronkov**

ORCID: 0000-0003-0668-4215 e-mail: doronkov.dv@nntu.ru  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**D.S. Nikolaev**

ORCID: 0000-0003-2244-4780 e-mail: nikolaev.ds@nntu.ru  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.V. Ryazanov**

ORCID: 0000-0002-4951-8930 e-mail: riazanov.av@nntu.ru  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**D.N. Solntsev**

ORCID: 0000-0002-1756-2363 e-mail: solntsev@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*

**D.A. Kudryashov**

ORCID: 0009-0001-1189-0788 e-mail: kud1904@rambler.ru  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

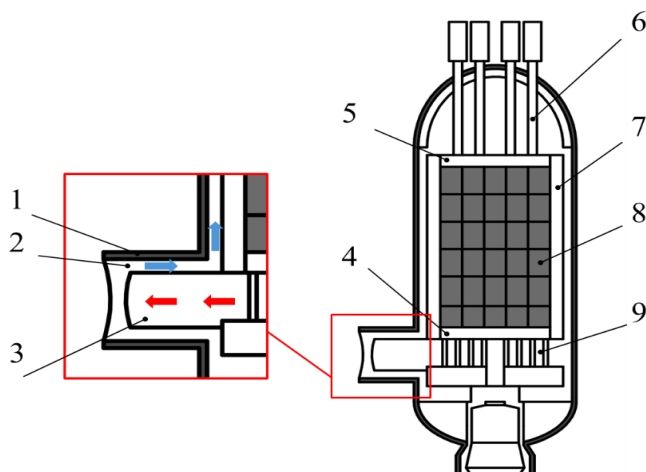
**Abstract.** The paper presents validation results for the  $k$ -epsilon, SST, and BSL RSM turbulence models applied to coolant flow simulation in a geometry typical of a prismatic core of a high-temperature gas-cooled reactor (HTGR). Experimental studies were carried out on a planar aerodynamic test bench representing the central longitudinal section of a fuel column with a control rod channel, five cooling channels, and two bypass gaps. Velocity field measurements were performed using laser Doppler anemometry within the Reynolds number range of 17,500-27,000. Numerical simulations were conducted in ANSYS CFX v.22. The flow distribution among the model channels was found to be independent of the flow regime: the flow fraction through the bypass gaps was 2.0-2.2 %, through the control rod channel – 27-28%, and through each of the five cooling channels – approximately 14 %. The SST and BSL RSM models demonstrated satisfactory agreement with the experiment: deviations in the bypass gaps did not exceed 7-8 %, and in the cooling channels – 3 %. The  $k$ -epsilon model systematically overestimated the bypass flow rate by 14-16 %.

**Key words:** high-temperature gas-cooled reactor; prismatic core; bypass flow; bypass gap; CFD modeling; turbulence model validation; laser Doppler anemometry.

**FOR CITATION:** D.D. Kuritsin, D.S. Nikolaev, A.V. Ryazanov, D.N. Solntsev, M.A. Legchanov and D.A. Kudryashov. Computational and experimental validation of turbulence models for flow distribution analysis in a prismatic core of high temperature gas cooled reactor. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 2. Pp. 57-69. EDN XLUEIK

## Введение

В условиях перехода мировой энергетики к низкоуглеродной модели и роста требований к надежности и воспроизводимости энергоснабжения атомная отрасль рассматривается как одна из немногих, способных обеспечить долгосрочную устойчивость энергетических систем. При этом ее развитие все в большей степени связывается не только с традиционной выработкой электроэнергии, но и с созданием ядерных установок, ориентированных на интеграцию с энергоемкими промышленными и химико-технологическими процессами, требующих высокопотенциального тепла, включая системы производства водорода. В этом отношении высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) представляют собой перспективный тип реакторных установок, характеризующихся высокой температурой гелиевого теплоносителя на выходе из активной зоны (до 900-1000 °С) [1]. Однако использование ВТГР в составе атомных энерготехнологических станций предъявляет повышенные требования к обоснованию теплотехнической надежности активной зоны.



**Рис. 1. Принципиальная схема реакторной установки ВТГР:**

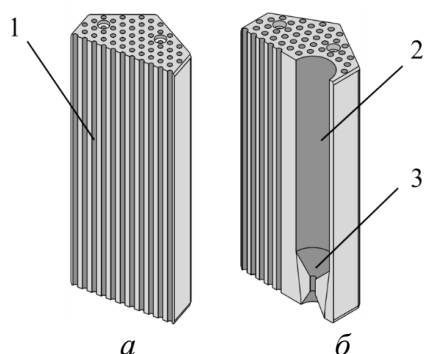
1 – соединительный корпус; 2 – кольцевой газоход; 3 – центральный горячий газоход; 4 – нижний заменяемый отражатель; 5 – верхний заменяемый отражатель; 6 – система управления и защиты; 7 – незаменяемый боковой отражатель; 8 – активная зона; 9 – нижний собирающий коллектор

**Fig. 1. Schematic diagram of the HTGR:**

1 – reactor vessel outer wall; 2 – annular space gas duct; 3 – tube-side gas duct; 4 – lower replaceable reflector; 5 – upper replaceable reflector; 6 – control assembly; 7 – permanent side reflector; 8 – reactor core; 9 – lower plenum coolant volume

## Постановка проблемы

Активная зона (рис. 1) ВТГР формируется из графитовой кладки, состоящей из вертикальных колонн тепловыделяющих сборок (ТВС) и отражателей, собранных из отдельных призматических графитовых блоков. Ее проект предусматривает наличие как стандартных ТВС (рис. 2, а), содержащих только каналы охлаждения 1, так и сборок, предназначенных для размещения поглощающих стержней системы управления и защиты (ПС СУЗ) (рис. 2, б). В последнем случае в графитовых блоках предусматривается канал увеличенного диаметра 2, что приводит к изменению гидравлического сопротивления колонн ТВС, которое компенсируется установкой дросселирующих устройств 3 в их нижней части. Подача гелиевого теплоносителя осуществляется через кольцевой газоход, расположенный между соединительным корпусом и горячим газоходом, с последующим движением потока через активную зону в направлении сверху вниз в нижний собирающий коллектор и отводом нагретого гелия через центральный горячий газоход.



**Рис. 2. Типы топливных блоков активной зоны ВТГР:**

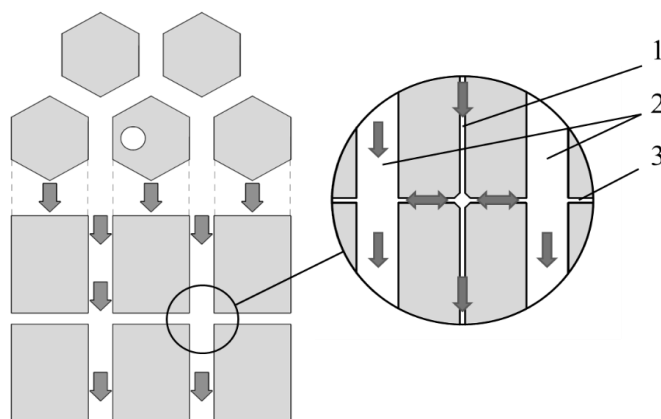
*а) без канала ПС СУЗ; б) с каналом ПС СУЗ;*

*1 – каналы охлаждения; 2 – канал ПС СУЗ; 3 – дросселирующее устройство*

**Fig. 2. Types of fuel blocks in the HTGR core:**

*(a) without rod channel of the neutron control system; (b) with rod channel of the neutron control system;*

*1 – cooling channels; 2 – control rod channel; 3 – throttling device*



**Рис. 3. Перераспределение потока теплоносителя в графитовой кладке ВТГР:**

*1 – межблочный радиальный зазор; 2 – канал охлаждения топливного блока; 3 – поперечный зазор*

**Fig. 3. Coolant flow distribution in the graphite masonry of the HTGR:**

*1 – bypass gap; 2 – cooling channel; 3 – crossflow gap*

В процессе эксплуатации активной зоны в графитовой кладке формируются зазоры как по высоте колонн, так и между соседними колоннами (рис. 3). Величины этих зазоров определяются совокупным влиянием проектных допусков при изготовлении и сборке,

температурных деформаций, радиационно-индуцированных изменений размеров и формы графита [2] и возможных механических смещений в процессе эксплуатации. В зависимости от взаимного расположения блоков различают поперечные зазоры, возникающие между блоками одной колонны, и межблочные радиальные зазоры, образующиеся между блоками смежных колонн. Их наличие приводит к формированию обходных путей течения (т.н. «байпасных»), по которым часть гелиевого теплоносителя проходит в обход каналов охлаждения и каналов размещения ПС СУЗ. При этом процесс сопровождается перераспределением расхода теплоносителя в активной зоне, снижением эффективности теплообмена в отдельных ее участках, а также колебаниями температуры теплоносителя на выходе из активной зоны, приводящими к росту температурной неоднородности в нижнем собирающем коллекторе [3-4].

В настоящее время теплогидравлические характеристики потока в призматической активной зоне ВТГР все чаще изучаются с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD). В работах [5-6] выполнено трехмерное расчетное моделирование гидродинамики теплоносителя для модели 1/12 сектора призматической топливной колонны реактора GT-MHR в программном пакете ANSYS Fluent. Проводилось сравнение различных двухпараметрических моделей турбулентности при ширине межблочного радиального зазора 3 мм. Показано, что выбор модели турбулентности оказывает существенное влияние на гидравлические характеристики течения. Модель  $k$ - $\omega$  давала примерно на 10 % более высокий массовый расход через расчетную область по сравнению с  $k$ - $\epsilon$  из-за недооценки трения в охлаждающих каналах. При этом сопоставление с эмпирическими зависимостями для коэффициента трения подтвердило, что именно модель  $k$ - $\epsilon$  обеспечивает более корректное воспроизведение гидравлического сопротивления как в каналах, так и в зазорах, напрямую влияя на перераспределение расходов.

Комплекс работ [7-8] проводился в пакете ANSYS CFX с моделью турбулентности SST. Геометрия включала 7 топливных колонн (по 4 ТВС в каждой). Рассматривались ширины межблочных радиальных зазоров 2, 4 и 6 мм, а также вариант неравномерного распределения зазора по высоте, имитирующий состояние активной зоны к концу топливной кампании. Результаты показали, что доля байпасного расхода резко возрастает с увеличением ширины зазора — от 8,5 % при 2 мм до 44,5 % при 6 мм. По мере продвижения потока к выходу доля байпасного расхода уменьшается за счет перераспределения между радиальными зазорами и охлаждающими каналами. В работах [9-10] проведено сопоставление результатов численного моделирования, выполненного в программе STAR-CCM+ с экспериментальными данными. Экспериментальная модель включала 3 упрощенных призматических блока реактора GT-MHR с межблочным радиальным зазором 2,7, 4,4 и 6,1 мм. Сравнивались модели  $k$ - $\epsilon$ ,  $k$ - $\omega$  и RSM. Различия между двухпараметрическими моделями ( $k$ - $\epsilon$  и  $k$ - $\omega$ ) по доле байпасного расхода и перепаду давления оказались минимальны (не более 0,5 %). Модель RSM относительно них давала отклонения до 2 %. Сопоставление с экспериментом показало хорошее согласование для зазоров 4,4 и 6,1 мм (отклонения по байпасному расходу не более 3 %). Однако для минимального зазора 2,7 мм все модели систематически завышали долю байпасного потока на 5-7 %. В работе [11] выполнен кросс-верификационный анализ теплогидравлических характеристик колонны активной зоны ВТГР с использованием ANSYS CFX, ANSYS Fluent и FlowVision. В ANSYS CFX и Fluent применялась модель SST, в FlowVision —  $k$ - $\epsilon$ . Сопоставление показало удовлетворительное качественное и количественное согласование по ключевым параметрам: температуре графита, температуре теплоносителя на выходе и величине его подогрева в активной зоне.

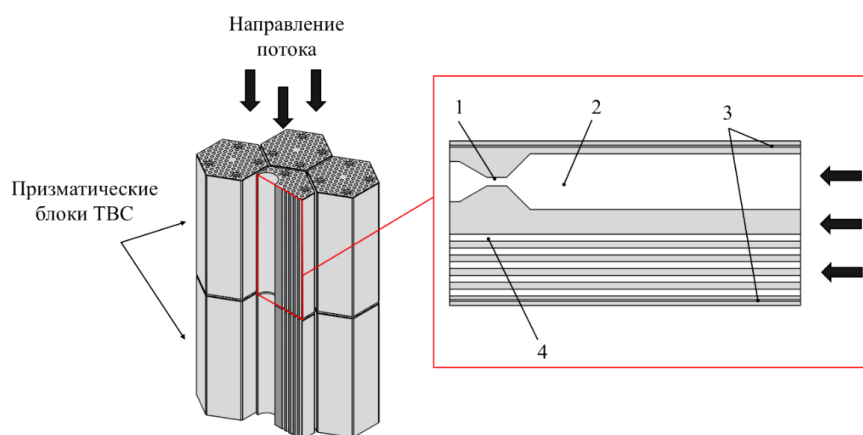
Анализ показывает, что одним из факторов, влияющих на теплогидравлические характеристики призматической активной зоны ВТГР, является формирование байпасного потока в межблочных радиальных зазорах. Представленные расчеты демонстрируют, что доля байпасного расхода существенно зависит от геометрии зазоров и может достигать 4-7 % от расхода через активную зону. Такое перераспределение потока приводит к снижению расхода тепло-

носителя в охлаждающих каналах топлива и формированию температурных неравномерностей в графитовой кладке. Поэтому при обосновании теплотехнической надежности активной зоны ВТГР учет байпасного течения является необходимым элементом теплогидравлического расчета. В то же время анализ работ показал отсутствие универсальной модели турбулентности, позволяющей с достаточной точностью описывать гидродинамику теплоносителя в каналах графитовой кладки ВТГР. Сопоставление с экспериментальными данными демонстрирует, что в узких межблочных зазорах и при переходных режимах течения стандартные RANS-модели демонстрируют систематические отклонения, достигающие нескольких процентов по доле байпасного расхода. Таким образом, применяемые модели турбулентности требуют дальнейшей валидации и уточнения параметров на основе экспериментальных данных, полученных для геометрий и режимов течения, характерных для призматических активных зон ВТГР.

### Описание исследовательского стенда и методики экспериментальных исследований

Для подтверждения достоверности расчетных моделей в ядерной энергетике валидационные исследования проводят на геометрически упрощенных моделях с применением прецизионных методов измерения гидродинамических характеристик потока [12-13].

В настоящей работе в качестве объекта исследования выбран фрагмент активной зоны ВТГР. Упрощение геометрии в экспериментальной модели заключалось в переходе от исходной трехмерной конфигурации к плоской геометрии центрального продольного сечения блока ТВС топливной колонны. В модели, показанной на рис. 4, воспроизведены пять каналов охлаждения 4.



**Рис. 4. Схема экспериментальной модели:**

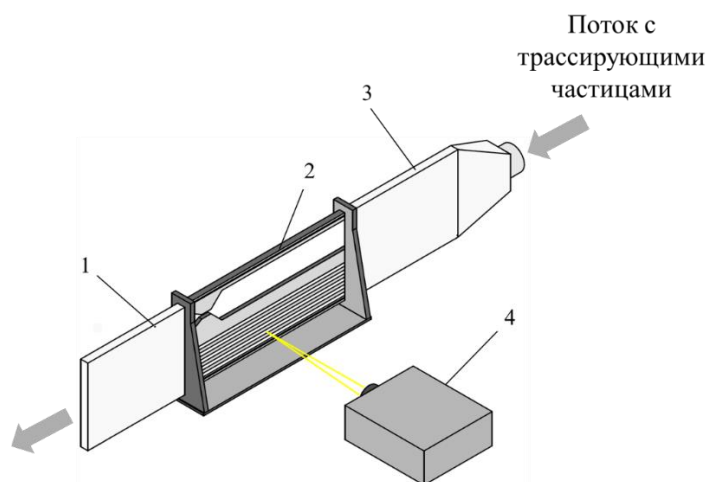
*1 – дросселирующее устройство; 2 – канал для размещения поглотяющего стержня системы управления и защиты; 3 – межблочный зазор; 4 – каналы охлаждения*

**Fig. 4. Schematic diagram of the experimental model:**

*1 – throttling device; 2 – control rod channel; 3 – bypass gap; 4 – cooling channels*

В силу особенностей конструкции их поперечное сечение имеет прямоугольную форму, при этом линейный размер соответствует диаметру канала охлаждения топливного блока. Кроме того, в модели был учтен канал размещения поглотяющего стержня системы управления и защиты (ПС СУЗ) 2, дросселирующее устройство нижней части колонны было представлено сужением 1. Для воспроизведения межблочного радиального течения предусмотрены два продольных зазора 3 в верхней и нижней части модели, имитирующие радиальные зазоры между соседними колоннами ТВС. Габаритные размеры модели составили: длина — 800 мм, ширина – 360 мм, толщина проточной части – 16 мм.

Исследовательский стенд (рис. 5) представлял собой разомкнутый аэродинамический контур, в котором с помощью напорного вентилятора обеспечивалась прокачка воздуха при температуре 25 °С. Перед входом в экспериментальную модель был предусмотрен участок, обеспечивающий формирование равномерного входного профиля скорости.



**Рис. 5. Схематический вид исследовательского стенда:**

1 – выходной участок; 2 – экспериментальная модель; 3 – стабилизирующий участок;  
4 – лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС)

**Fig. 5. Schematic view of the experimental setup:**

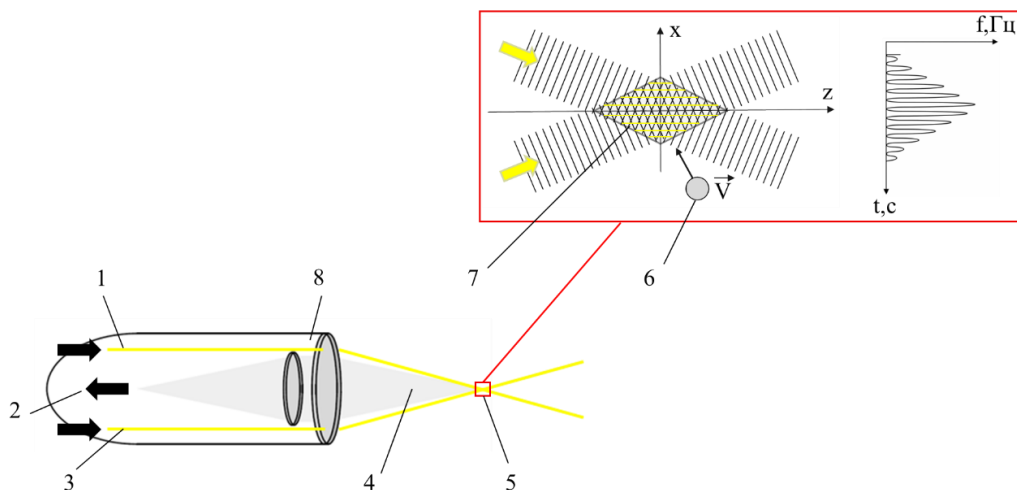
1 – outlet section; 2 – experimental model; 3 – stabilizing section;  
4 – laser Doppler anemometry system (LDA)

Измерения поля скоростей течения рабочей среды выполнялись с использованием лазерной доплеровской измерительной системы (ЛДИС) «ЛАД-08А», обеспечивающей бесконтактное определение локальных компонент скорости с высокой пространственной и временной разрешающей способностью. Погрешность измерения скорости не превышала  $\pm 0,5\%$ . Принцип измерений данного прибора основан на анализе доплеровского сдвига частоты лазерного излучения, рассеянного движущимися трассирующими частицами (рис. 6). Лазерный пучок разделяется на два когерентных пучка равной интенсивности, которые сводятся в измерительном объеме. В области их пересечения образуется система прямых интерференционных полос. Трассирующие частицы, пересекая эти полосы, рассеивают свет, который собирается объективом, а затем фильтруется и регистрируется фотодетектором. В результате частота рассеянного света будет прямо пропорциональна скорости движущейся частицы.

Засев потока осуществлялся с помощью генератора аэрозольного дыма, установленного на входе вентилятора. В качестве трассирующих частиц выступали аэрозольные частицы диаметром до 5 мкм, формируемые из содержащей глицерин жидкости. Для повышения качества оптических измерений и снижения влияния паразитных отражений задняя стенка имела черную матовую поверхность. Дополнительно отраженные от передней стенки лучи экранировались путем частичного перекрытия главного объектива светопоглощающим материалом, что позволило снизить уровень фоновых оптических помех [14].

### Описание методики численного моделирования

В настоящей работе численное моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS CFX v.22. Использовались три модели турбулентности RANS: k-epsilon модель, Shear Stress Transport (SST) – модель Ментера и Baseline Reynolds Stress (BSL RSM) модель. Выбор указанных моделей турбулентности обусловлен необходимостью сопоставления подходов различной степени сложности: от двухпараметрических моделей до более физически детализированной модели на основе уравнений напряжений Рейнольдса [15]. Расчетная область точно воспроизводила геометрию экспериментальной модели. Моделирование проводилось в стационарной постановке для изотермического течения несжимаемой жидкости. На входной границе задавался массовый расход, соответствующий экспериментальным режимам; на выходе — статическое давление, равное нулю.



**Рис. 6. Принцип работы ЛДИС:**

1 – опорный пучок; 2 – выход на фотоэлектронный умножитель; 3 – частотно-сдвинутый пучок; 4 – обратное рассеяние; 5 – измерительный объем; 6 – трассирующая частица; 7 – интерференционные полосы; 8 – система объективов

**Fig. 6. Operating principle of the LDA system:**

1 – unshifted beam; 2 – output to photomultiplier tube; 3 – shifted beam; 4 – backscattered light; 5 – measurement volume; 6 – seeding particle; 7 – interference fringes; 8 – lens system

Генерация расчетной сетки выполнялась методом протягивания (sweep). Такой подход позволил построить структурированную сетку путем последовательного протягивания элементов вдоль оси, совпадающей с основным направлением движения потока среды. Предусматривалось сгущение ячеек в зонах входа и выхода потока. Для реализации контролируемого сгущения использовалась опция *sweep bias*. Она задает степень неравномерности при протягивании, определяя геометрическую прогрессию изменения линейных размеров ячеек вдоль выбранного направления. Благодаря этому, размер ячеек изменялся монотонно, что позволило создать области сгущения без резких скачков размеров элементов. Параметры сетки подбирались по результатам исследования сеточной независимости решения. В ходе последовательного сгущения сетки было установлено, что стабилизация гидравлических характеристик достигается при количестве элементов порядка 7,5 млн. При этом минимальный размер ячейки составлял 0,25 мм (в межблочном зазоре), а максимальный – 1 мм (в канале ПС СУЗ). Пристеночный слой разрешался с учетом требований применяемых моделей турбулентности. Для *k-epsilon* модели значение  $y^+$  поддерживалось в диапазоне 30-100. Для SST и RSM моделей обеспечивалось разрешение вязкого подслоя ( $y^+ \leq 1$ ).

### Обоснование расхода через экспериментальную модель

Для корректного моделирования гелиевого теплоносителя необходимо выполнять равенство критерия Рейнольдса (Re) между штатной конструкцией и экспериментальной моделью. В данной работе в качестве моделируемой была взята ТВС с каналом ПС СУЗ со следующими параметрами: массовый расход через ТВС  $G = 1,62$  кг/с, температура гелия на входе  $T_1 = 330^\circ\text{C}$ , температура на выходе  $T_2 = 858^\circ\text{C}$ .

Теплофизические свойства гелия определялись по следующим формулам [16].

Плотность,  $\text{кг/м}^3$  :

$$\rho = 48,14 \cdot \frac{p}{T} \cdot \left( 1 + 0,4446 \cdot \frac{p}{T^{1,2}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $p$  – давление, бар;  $T$  – температура, К.

Динамическая вязкость, Па·с :

$$\mu = 3,674 \cdot 10^{-7} \cdot T^{0,7} \quad (2)$$

где  $T$  – температура, К.

Таким образом, можно записать критерий  $Re$  как:

$$Re = \frac{W_{cp} \cdot \rho \cdot d_{гид}}{\mu} = \frac{Q}{f_{пр}} \cdot \frac{\rho \cdot d_{гид}}{\mu}, \quad (3)$$

где  $W_{cp}$  – среднерасходная скорость через ТВС, м/с;  $Q$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с;  $d_{гид}$  – характерный размер, м;  $f_{пр}$  – проходное сечение через ТВС с учетом зазора  $h = 4$  мм с соседними ТВС, м<sup>2</sup>.

Площадь проходного сечения теплоносителя через ТВС вместе с зазором составляет  $f_{пр} = 0,02964$  м<sup>2</sup>. В качестве характерного размера был выбран диаметр канала охлаждения  $d_{гид} = 0,016$  м. В табл. 1 показаны параметры в характерных сечениях ТВС, полученные согласно представленным формулам.

**Таблица 1.**  
Характеристики теплоносителя при прохождении через ТВС

**Table 1.**  
Coolant characteristics during flow through the fuel assembly

| Температура,<br>°С | Плотность,<br>кг/м <sup>3</sup> | Динамическая<br>вязкость,<br>10 <sup>-5</sup> Па·с | Массовый<br>расход,<br>кг/с | Объемный<br>расход,<br>м <sup>3</sup> /с | Среднерасходная<br>скорость,<br>м/с | Re    |
|--------------------|---------------------------------|--|-----------------------------|--|-------------------------------------|-------|
| 330                | 3,167                           | 3,25   | 1,62                        | 0,51                                     | 17,26                               | 27000 |
| 858                | 1,696                           | 5,04   | 1,62                        | 0,96                                     | 32,23                               | 17500 |

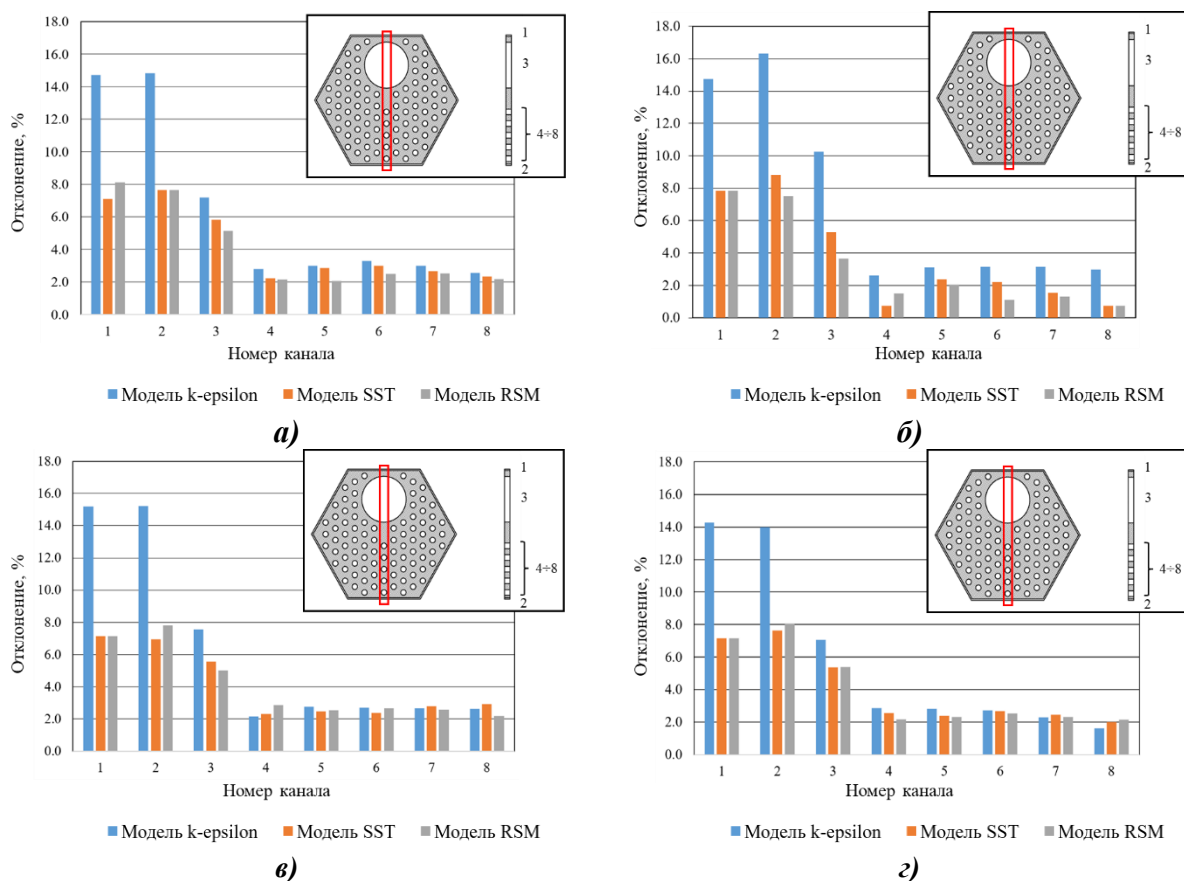
На основании полученного диапазона штатных значений критерия Рейнольдса ( $Re$ ) был определен необходимый расход воздуха через экспериментальную модель. Эксперименты проводились при температуре воздуха 25 °С и атмосферном давлении ( $\rho = 1,185$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu = 18,35 \cdot 10^{-6}$  Па·с). Площадь проходного сечения экспериментальной модели составляет  $f_{пр} = 0,00347$  м<sup>2</sup>. В соответствии с уравнением (3), в диапазоне значений критерия  $Re$  от 17500 до 27000 требуемый массовый расход воздуха через экспериментальную модель составил 0,07-0,11 кг/с.

### Результаты численных и экспериментальных исследований

Эксперименты показали, что в исследуемом диапазоне  $Re = 17500-27000$  перераспределение потока среды между каналами модели не зависит от режима течения. Для всех режимов доля расхода через верхний и нижний продольные зазоры стабильно составляла 2,0-2,2 % от общего расхода, через канал ПС СУЗ – 27-28 %. Распределение расхода между пятью каналами охлаждения было практически равномерным: расход через каждый канал не превышал 14 % от общего расхода, а относительные отклонения между ними не превышали 5 %. Количественное сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными выполнено по относительному отклонению расчетного расхода через каждый канал от экспериментально измеренного (рис. 7):

$$\delta = \frac{G_{расч} - G_{эксп}}{G_{эксп}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $G_{расч}$ ,  $G_{эксп}$  – расчетное и экспериментальное значение массового расхода через канал.



**Рис. 7. Относительные отклонения расчетных значений расхода теплоносителя от экспериментальных данных по каналам модели:**

1-2 – межблочные зазоры; 3 – канал ПС СУЗ; 4-8 – каналы охлаждения:  
а)  $Re = 17500$ , б)  $Re = 21000$ , в)  $Re = 24500$ , г)  $Re = 27000$

**Fig. 7. Relative deviations (%) of the computed mass flow rates from experimental values across the channels of the model:**

1-2 – bypass gaps; 3 – control rod channel; 4-8 – cooling channels:  
а)  $Re = 17500$ , б)  $Re = 21000$ , в)  $Re = 24500$ , г)  $Re = 27000$

Во всех режимах наибольшие отклонения наблюдались в каналах, имитирующих межблочные зазоры (каналы 1 и 2). Модель k-epsilon систематически завышала расход через эти каналы на 14-16 %. Модели SST и BSL RSM давали более точные результаты — отклонения не превышали 7-8 % и практически совпадали между собой. В канале ПС СУЗ (канал 3) все модели выглядели заметно точнее: отклонения модели k-epsilon составляли порядка 5-10 %, а SST и RSM – 4-6 %. В пяти каналах охлаждения (4-8) отклонения не превышали 3 % вне зависимости от выбираемой модели турбулентности (рис. 7).

Более существенные отклонения в зазорах и канале ПС СУЗ по сравнению с каналами охлаждения были обусловлены особенностями течения в этих областях. Узкие межблочные зазоры характеризовались локально низкими числами Рейнольдса (4000-7000) и вероятным переходным характером течения, где стандартные RANS-модели испытывают трудности из-за ограниченной точности пристеночных функций. В канале ПС СУЗ наличие дросселирующего устройства и значительное изменение поперечного сечения создают структуру потока с участками ускорения, что также усложняет моделирование.

## Заключение

Полученные результаты демонстрируют применимость моделей SST и BSL RSM для моделирования гидродинамики течения в геометрии, характерной для призматической активной зоны ВТГР. Вместе с тем, выявленные отклонения расчетных данных от эксперимента в межблочных радиальных зазорах указывают на ограниченную точность стандартных RANS-подходов. Это подчеркивает необходимость дальнейшего совершенствования математических моделей турбулентности, в частности, уточнения параметров и коэффициентов, входящих в данные модели.

На следующем этапе целесообразны экспериментальные исследования на полномасштабной модели топливной колонны с фиксированным межблочным зазором. Это позволит провести полноценную валидацию расчетного кода с использованием моделей SST и BSL RSM, показавших наилучшее согласие с экспериментом в настоящей работе, и подтвердить масштабируемость полученных результатов на геометрию штатной топливной сборки. Также представляется важным исследовать влияние ширины радиальных межблочных зазоров на перераспределение расхода теплоносителя в диапазоне от 2 до 6 мм, что соответствует различному напряженно-деформированному состоянию элементов активной зоны в различные моменты топливной кампании реактора.

Для повышения точности воспроизведения байпасного течения также рекомендуется проведение комплекса дополнительных экспериментальных исследований, включающего детальное изучение структуры потока в межблочных радиальных зазорах с учетом реальной геометрии, в том числе, наличия ромбовидного стыка между торцевыми гранями призматических блоков.

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

## Библиографический список

1. **Фатеев, С.А.** Развитие технологий атомно-водородной энергетики в госкорпорации «Росатом» / С.А. Фатеев, В.В. Петрунин, Г.Н. Кодочигов, И.В. Маров // Атомная энергия. – 2022. – Т. 133, вып. 5-6. – С. 243-250.
2. **Панюков, С.В.** Теория радиационно-индуцированного формоизменения графита / С.В. Панюков, А.В. Субботин // Атомная энергия. – 2008. – Т. 105, вып. 1. – С. 25-32.
3. **Петрунин, В.В.** Ядерные энергетические установки с высокотемпературными модульными газоохлаждаемыми реакторами: в 2 т. / В.В. Петрунин, Н.Г. Кодочигов, С.М. Дмитриев [и др.]; под общ. ред. Н. Н. Пономарева-Степного. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2017. – 745 с.
4. **Olson, H.G.** The Fort St. Vrain high temperature gas-cooled reactor: X. Core temperature fluctuations / H.G. Olson, H.L. Brey, D.W. Waremburg // Nuclear Engineering and Design. – 1982. – Т. 72, № 2. – С.125-137.
5. **Sato, H.** Computational fluid dynamic analysis of core bypass flow phenomena in a prismatic VHTR / H. Sato, R. Johnson, R. Schultz // Annals of Nuclear Energy. – 2010. – Т. 37, № 11. – С. 1172-1185.
6. **Tung, Y.-H.** Effects of graphite surface roughness on bypass flow computations for an HTGR / Y.-H. Tung, R. W. Johnson, H. Sato // Nuclear Engineering and Design. – 2012. – Т. 252. – С. 78-87.
7. **Yoon, S.-J.** Study on the flow distribution in prismatic VHTR core with a multi-block experiment and CFD analysis / S.-J. Yoon, C.-Y. Jin, J.-H. Lee, M.-H. Kim, G.-C. Park // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Т. 241, вып. 12. – С. 5174-5182.
8. **Yoon, S.-J.** The effects of crossflow gap and axial bypass gap distribution on the flow characteristics in prismatic VHTR core / S.-J. Yoon, J.-H. Lee, M.-H. Kim, G.-C. Park // Nuclear Engineering and Design. – 2012. – Т. 250. – С. 648-655.

9. **Johnson, R.W.** Pre-Test CFD Calculations for a Bypass Flow Standard Problem. Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2011), Denver, Colorado, USA, November 11–17, 2011. – New York: ASME, 2011. – Т. 10: Heat and Mass Transport Processes. – С. 1179-1187.
10. **Kanjanakijkasem, W.** Experimental and CFD studies of the bypass flow in a prismatic core of VHTR using a small-scale model / W. Kanjanakijkasem, H. Wang, E. Dominguez-Ontiveros, Y.A. Hassan // Progress in Nuclear Energy. – 2016. – Т. 91. – С. 223-235.
11. **Диденко, Д.В.** Кросс-верификационные расчеты теплогидравлических характеристик активной зоны высокотемпературного газоохлаждаемого реактора / Д.В. Диденко, Д.Е. Балуев, О.Л. Никаноров, С.А. Рогожкин, А.С. Лубина, А.А. Седов, А.А. Фролов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2025. – № 4. – С. 250-259.
12. **Фомичев, М.С.** Экспериментальная гидродинамика ЯЭУ / М.С. Фомичев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 248 с.
13. **Курицин, Д.Д.** Расчетно-экспериментальные исследования струйного смешения в упрощенной геометрии нижнего собирающего коллектора ВТГР / Д.Д. Курицин, А.А. Добров, Д.В. Доронков [и др.] // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2025. – № 4 (151). – С. 68-78.
14. **Рахманов, В.В.** Подходы к улучшению качества оптического сигнала в гидродинамическом эксперименте при использовании ЛДА с МКП-ФЭУ / В.В. Рахманов, М.В. Кашкарова, В.Г. Меледин, И.К. Кабардин // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2024. – Т. 8, № 1. – С. 165-172.
15. **Menter, F.R.** Best Practice: RANS Turbulence Modeling in Ansys CFD. Version 1.0 / F.R. Menter, R. Lechner, A. Matyushenko. – ANSYS, Inc., 2021. – 95 с.
16. **Petersen, H.** The properties of helium: Density, specific heats, viscosity, and thermal conductivity at pressures from 1 to 100 bar and from room temperature to about 1800 K. – Roskilde: Risø National Laboratory, 1970. – 42 с. – (Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R; № 224).

### References

1. Fateev S.A., Petrunin V.V., Kodochigov N.G., Marov I.V. Development of Nuclear-Hydrogen Power Technologies in the Rosatom State Corporation. Atomnaya Energiya [Atomic Energy]. 2022;133(5-6):243-250. (in Russian).
2. Panyukov S.V., Subbotin A.V. Theory of Radiation-Induced Dimensional Changes in Graphite. Atomnaya Energiya [Atomic Energy]. 2008;105(1):25-32. (in Russian).
3. Petrunin V.V., Kodochigov N.G., Dmitriev S.M., et al. Yadernye energeticheskie ustanovki s vysokotemperaturnymi modul'nymi gazoohlazhdaemymi reaktorami: v 2 t. [Nuclear Power Plants with High-Temperature Modular Gas-Cooled Reactors: in 2 vols.]. Ponomarev-Stepnoy N.N., editor. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev Publ.; 2017. 745 p. (in Russian).
4. Olson H.G., Brey H.L., Waremburg D.W. The Fort St. Vrain High Temperature Gas-Cooled Reactor: X. Core Temperature Fluctuations. Nuclear Engineering and Design. 1982;72(2):125-137.
5. Sato H., Johnson R., Schultz R. Computational Fluid Dynamic Analysis of Core Bypass Flow Phenomena in a Prismatic VHTR. Annals of Nuclear Energy. 2010;37(11):1172-1185.
6. Tung Y.-H., Johnson R.W., Sato H. Effects of Graphite Surface Roughness on Bypass Flow Computations for an HTGR. Nuclear Engineering and Design. 2012;252:78-87.
7. Yoon S.-J., Jin C.-Y., Lee J.-H., Kim M.-H., Park G.-C. Study on the Flow Distribution in Prismatic VHTR Core with a Multi-Block Experiment and CFD Analysis. Nuclear Engineering and Design. 2011;241(12):5174-5182.
8. Yoon S.-J., Lee J.-H., Kim M.-H., Park G.-C. The Effects of Crossflow Gap and Axial Bypass Gap Distribution on the Flow Characteristics in Prismatic VHTR Core. Nuclear Engineering and Design. 2012;250:648-655.
9. Johnson R.W. Pre-Test CFD Calculations for a Bypass Flow Standard Problem. In: Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2011); 2011 Nov 11-17; Denver, Colorado, USA. New York: ASME; 2011;10:179-1187.
10. Kanjanakijkasem W., Wang H., Dominguez-Ontiveros E., Hassan Y.A. Experimental and CFD Studies of the Bypass Flow in a Prismatic Core of VHTR Using a Small-Scale Model. Progress in Nuclear Energy. 2016;91:223-235.

11. Didenko D.V., Baluev D.E., Nikanorov O.L., Rogozhkin S.A., Lubina A.S., Sedov A.A., Frolov A.A. Cross-Verification Calculations of Thermal-Hydraulic Characteristics of the Core of a High-Temperature Gas-Cooled Reactor. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Yaderno-reaktornye konstanty* [Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Reactor Constants]. 2025;(4):250-259. (in Russian).
12. Fomichev M.S. *Ekspperimental'naya gidrodinamika YaEU* [Experimental Hydrodynamics of Nuclear Power Plants]. Moscow: Energoatomizdat Publ.; 1989. 248 p. (in Russian).
13. Kuritsin D.D., Dobrov A.A., Doronkov D.V., et al. Computational and Experimental Studies of Jet Mixing in a Simplified Geometry of the Lower Plenum of a HTGR. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2025;(4(151)):68-78. (in Russian).
14. Rakhmanov V.V., Kashkarova M.V., Meledin V.G., Kabardin I.K. Approaches to Improving the Quality of the Optical Signal in a Hydrodynamic Experiment Using LDA with MCP-PMT. *Interexpo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia]. 2024;8(1):165-172. (in Russian).
15. Menter F.R., Lechner R., Matyushenko A. Best Practice: RANS Turbulence Modeling in Ansys CFD. Version 1.0. ANSYS, Inc.; 2021. 95 p.
16. Petersen H. The Properties of Helium: Density, Specific Heats, Viscosity, and Thermal Conductivity at Pressures from 1 to 100 bar and from Room Temperature to about 1800 K. Roskilde: Risø National Laboratory; 1970. 42 p. (Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R; no. 224).

*Дата поступления  
в редакцию: 14.04.2026*

*Дата принятия  
к публикации: 18.05.2026*

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 62-713

EDN WWDWJU

### СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕМ ТЯГОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

**Д.О. Бутарович**

ORCID: 0000-0003-4539-0463 e-mail: buta73@bmstu.ru

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

ORCID: 0009-0002-0814-2313 e-mail: bruy.d@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
*Москва, Россия***Р.И. Гараев**

ORCID: 0009-0003-3857-8131 e-mail: graagaraev@yandex.ru

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

Исследованы современные системы управления термостатированием литий-ионной тяговой аккумуляторной батареи электромобиля. Рассмотрены двухпозиционное управление, ПИД-регулирование, модельно-предиктивное управление и интеллектуальное модельно-предиктивное управление с прогнозированием скорости движения и самоадаптивным выбором целевой температуры батареи. Метод исследования основан на сравнительном анализе опубликованных научных работ, посвященных алгоритмам управления системами термостатирования тяговых аккумуляторных батарей электромобилей. Показано, что традиционные стратегии управления обладают ограниченными возможностями при работе в условиях переменной тепловой нагрузки, тогда как модельно-предиктивные и интеллектуальные стратегии позволяют учитывать будущие режимы движения, снижать энергопотребление исполнительных механизмов и обеспечивать более рациональный температурный режим батареи. Практическая значимость работы заключается в систематизации современных подходов к управлению системой термостатирования тяговой аккумуляторной батареи и определении наиболее перспективных стратегий с точки зрения энергоэффективности.

**Ключевые слова:** система управления; тяговая аккумуляторная батарея; система термостатирования; электромобиль; контроллер; энергоэффективность; модельно-предиктивное управление; нейронная сеть.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Бутарович, Д.О. Современные энергоэффективные системы управления термостатированием тяговой аккумуляторной батареи электромобиля / Д.О. Бутарович, Д.А. Бруй, Р.И. Гараев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 2. С. 70-83. EDN WWDWJU

### MODERN ENERGY-EFFICIENT THERMAL MANAGEMENT SYSTEMS FOR ELECTRIC VEHICLE TRACTION BATTERY

**D.O. Butarovich**

ORCID: 0000-0003-4539-0463 e-mail: buta73@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University  
*Moscow, Russia*

**D.A. Bruy**

ORCID: 0009-0002-0814-2313 e-mail: bruy.d@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University

*Moscow, Russia*

**R.I. Garaev**

ORCID: 0009-0003-3857-8131 e-mail: graagaraev@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University

*Moscow, Russia*

**Abstract.** The paper considers modern thermal management system for lithium-ion traction battery of an electric vehicle. On/off control, PID control, model predictive control, and intelligent model predictive control with speed prediction and self-adaptive selection of the battery target temperature are considered. The research method is based on a comparative analysis of scientific papers devoted to control algorithms for electric vehicle traction battery thermal management systems. It is shown that conventional control strategies have limited capabilities under variable thermal load conditions, whereas model predictive and intelligent control strategies make it possible to take into account future driving conditions, reduce the energy consumption of actuators, and provide a more rational battery temperature regime. The practical significance lies in the systematization of modern approaches to the control of traction battery thermal management systems and in identifying the most promising strategies in terms of energy efficiency.

**Key words:** control system; traction battery; thermal management system; electric vehicle; controller; energy efficiency; model predictive control; neural network.

**FOR CITATION:** D.O. Butarovich, D.A. Bruy, R.I. Garaev. Modern energy-efficient thermal management systems for electric vehicle traction battery. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 2. Pp. 70-83. EDN WWDWJU

## Введение

Развитие электромобилей и гибридных транспортных средств сопровождается повышением требований к энергоэффективности, безопасности и долговечности тяговых аккумуляторных батарей. В настоящее время наиболее распространенным источником питания для электромобилей являются литий-ионные тяговые аккумуляторные батареи, эксплуатационные характеристики которых существенно зависят от температурного режима [1, 2]. Отклонение температуры аккумуляторной батареи от допустимого или оптимального диапазона может приводить к снижению доступной мощности, ускорению деградиационных процессов, увеличению температурной неравномерности между ячейками и модулями, а также к ухудшению работоспособности транспортного средства в целом. Для обеспечения требуемого температурного режима применяется система термостатирования тяговой аккумуляторной батареи, включающая исполнительные элементы нагрева и охлаждения, насосное оборудование, датчики температуры и электронную систему управления [3, 4]. При этом система управления должна не только поддерживать температуру батареи в заданном диапазоне, но и обеспечивать минимально возможное энергопотребление исполнительных механизмов. Данное требование особенно важно для электромобилей, поскольку энергия, расходуемая системой термостатирования, непосредственно влияет на запас хода и общую энергетическую эффективность транспортного средства.

Актуальность работы обусловлена тем, что традиционные стратегии управления системами термостатирования, включая двухпозиционное управление и ПИД-регулирование, не всегда позволяют обеспечить рациональный баланс между точностью поддержания температуры, равномерностью температурного поля, энергопотреблением и сохранением ресурса тяговой аккумуляторной батареи [5]. В современных исследованиях все большее внимание уделяется модельно-предиктивному управлению, а также интеллектуальным стратегиям, использующим прогнозирование скорости движения, адаптацию целевой температуры и учитывающим будущую тепловую нагрузку [6-9]. Несмотря на большое число работ, посвященных отдельным алгоритмам управления системами термостатирования, отсутствует их со-

поставление с точки зрения энергоэффективности и обеспечения работоспособности тяговой аккумуляторной батареи.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ современных стратегий управления системами термостатирования тяговых аккумуляторных батарей электромобилей. Для достижения данной цели в работе решаются следующие задачи: рассматриваются основные типы систем управления термостатированием тяговых аккумуляторных батарей; анализируются особенности двухпозиционного управления, ПИД-регулирования, модельно-предиктивного управления и интеллектуального модельно-предиктивного управления; сопоставляются их преимущества и ограничения; оценивается влияние рассматриваемых стратегий на энергопотребление системы термостатирования, температурный режим и работоспособность аккумуляторной батареи.

В основе исследования – сравнительный анализ работ, посвященных системам управления термостатированием тяговых аккумуляторных батарей электромобилей, в результате которого систематизированы преимущества, ограничения и энергетические показатели рассматриваемых стратегий.

Классификация применяемых систем управления термостатированием тяговых аккумуляторных батарей в электромобилях включает: 1) ПИД-регулятор; 2) двухпозиционное управление; 3) управление на основе правил; 4) модельно-предиктивное управление; 5) интеллектуальное модельно-предиктивное управление [1]. Двухпозиционное управление, ПИД-регулирование и модельно-предиктивное управление относятся к основным стратегиям управления термостатированием тяговых аккумуляторных батарей. Развитие нейросетевых методов и интеллектуальных систем управления привело к повышению интереса к интеллектуальному модельно-предиктивному управлению, позволяющему учитывать прогнозируемые режимы движения и адаптировать целевые параметры системы термостатирования.

### **Стратегии управления термостатированием тяговых аккумуляторных батарей**

Для эффективной эксплуатации ячеек тяговой аккумуляторной батареи применяются системы контроля заряда, датчики температуры и состояния батареи, а также алгоритмы управления системой термостатирования [2, 3]. Это связано с тем, что работоспособность, долговечность и энергетическая эффективность аккумуляторной батареи существенно зависят от ее температурного состояния.

#### **Двухпозиционное управление**

Система двухпозиционного управления термостатированием тяговой аккумуляторной батареи электромобиля имеет два основных состояния, при которых исполнительный механизм получает команды включения или выключения [3]. В простейшем случае такая система может включать нагреватель, привод, термостат и элементы коммутации. Термостат измеряет температуру рабочей среды или аккумуляторной батареи и активирует исполнительный механизм при необходимости нагрева или охлаждения. Преимуществом является простота реализации и низкая требовательность к вычислительным ресурсам. Вместе с тем, данный подход не позволяет заранее учитывать изменение тепловой нагрузки и может приводить к колебаниям температуры около заданных порогов. В системах термостатирования тяговых аккумуляторных батарей также может применяться переключение электромагнитных клапанов, обеспечивающее циркуляцию жидкости в контуре без работы нагревателя или охладителя для более равномерного распределения температуры между батарейными модулями и ячейками [4].

#### **ПИД-регулирование**

ПИД-регулятор является одним из наиболее распространенных механизмов управления техническими системами [5]. В системе термостатирования батареи электромобиля он формирует управляющее воздействие по отклонению текущей температуры от заданного значения с учетом пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих.

ПИД-регулирование позволяет реализовать непрерывное управление и стабилизировать температуру батареи в заданном диапазоне. Однако его эффективность ограничена при изменяющихся режимах движения электромобиля и переменной тепловой нагрузке. Данный подход не учитывает будущие условия эксплуатации, не прогнозирует изменение тепловыделения батареи и требует корректной настройки коэффициентов регулятора для различных режимов работы.

### Модельно-предиктивное управление

Модельно-предиктивное управление (МПК) представляет собой стратегию, основанную на использовании математической модели объекта и оптимизации управляющих воздействий на заданном горизонте прогнозирования [6, 7]. В отличие от двухпозиционного управления и ПИД-регулирования, МПК позволяет учитывать ограничения по температуре, управляющему воздействию, массовому расходу охлаждающей жидкости и скорости изменения управляющего сигнала [6-8]. Стратегия управления МПК-контроллера системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи электромобиля включает две основные части: наблюдатель и оптимизатор [6, 8]. На временном шаге  $k$  наблюдатель в горизонте прогнозирования  $p$  может быть представлен следующими выражениями:

$$x(k+i|k) = Ax(k+i-1|k) + B_u u(k+i-1|k) + B_v v(k+i-1|k); \quad (1)$$

$$y(k+i|k) = Cx(k+i-1|k), \quad (2)$$

где  $i$  – последовательный временной шаг, изменяющийся от 1 до  $p$ ;  $x$  – вектор переменных состояния тепловой системы батареи;  $u$  – вектор управляющих переменных;  $v$  – вектор входных возмущений;  $A$ ,  $B_u$  и  $B_v$  – матрицы, определяемые на основе текущего состояния, управляющих переменных и возмущений;  $y$  – вектор прогнозируемых выходных параметров;  $C$  – матрица связи между состоянием системы и выходными параметрами.

Вектор состояния может быть представлен в виде формулы:

$$x = [T, SOC, SOH, P_{pump}, T_{cool}]. \quad (3)$$

где  $T$  – температура батареи;  $SOC$  – степень заряда батареи;  $SOH$  – показатель состояния работоспособности батареи;  $P_{pump}$  – мощность насоса;  $T_{cool}$  – температура охлаждающей жидкости.

Управляющая переменная может быть задана как массовый расход охлаждающей жидкости:

$$u = \dot{m}_{cool}, \quad (4)$$

где  $\dot{m}_{cool}$  – массовый расход охлаждающей жидкости.

Вектор возмущений может быть представлен в виде формулы:

$$v = [v_{car}, T_{air}]^T. \quad (5)$$

где  $v_{car}$  – скорость транспортного средства;  $T_{air}$  – температура окружающей среды.

Выходная переменная оценщика определяется по формуле:

$$y = T. \quad (6)$$

Температура батареи  $T$  соответствует контролируемой температуре батарейного модуля в стратегии управления. Согласно формуле (6), выходная переменная оценки состояния используется для управления температурой батареи и снижения энергопотребления системы термостатирования. Оптимизатор в МПК определяет управляющее воздействие путем минимизации функции затрат. Целевая функция может включать три составляющие:

$$J(Z_k) = J_y(Z_k) + J_u(Z_k) + J_{\Delta u}(Z_k), \quad (7)$$

где  $J_y(Z_k)$  – составляющая, характеризующая отклонение температуры батареи от заданного значения;  $J_u(Z_k)$  – составляющая, связанная с энергопотреблением исполнительных механизмов;  $J_{\Delta u}(Z_k)$  – составляющая, ограничивающая скорость изменения управляющего воздействия.

Составляющая  $J_y(Z_k)$  в контрольном горизонте с определяется формулой:

$$J_y(Z_k) = \sum_{j=1}^{n_y} \sum_{i=1}^c \{\omega_{i,j}^y [r_j(k+i|k) - y_j(k+i|k)]\}^2, \quad (8)$$

где  $r_j(k+i|k)$  – заданное значение  $i$ -го выходного параметра на  $i$ -м шаге горизонта прогнозирования;  $y_j(k+i|k)$  – прогнозируемое значение  $j$ -го выходного параметра;  $\omega_{i,j}^y$  – весовой коэффициент.

Составляющая  $J_u(Z_k)$  определяется формулой:

$$J_u(Z_k) = \sum_{j=1}^{n_u} \sum_{i=1}^c \{\omega_{i,j}^u [u_j(k+1|k)]\}^2, \quad (9)$$

где  $u_j(k+1|k)$  – значение  $i$ -го управляющего воздействия;  $\omega_{i,j}^u$  – весовой коэффициент, характеризующий значимость ограничения управляющего воздействия.

Составляющая  $J_{\Delta u}(Z_k)$  определяется формулой:

$$J_{\Delta u}(Z_k) = \sum_{j=1}^{n_u} \sum_{i=1}^c \{\omega_{i,j}^{\Delta u} [u_j(k+i|k) - u_j(k+i-1|k)]\}^2, \quad (10)$$

где  $\omega_{i,j}^{\Delta u}$  – весовой коэффициент, характеризующий ограничение скорости изменения управляющего воздействия.

Ограничения для системы управления могут быть заданы в виде формулы:

$$\frac{0L}{min} \leq m_{cool} \leq \frac{42L}{min}, \quad 15 \leq T \leq 35^\circ\text{C}, \quad (11)$$

$$\Delta T_{diff_{max}} < 5^\circ\text{C}.$$

В неравенствах (11)  $\Delta T_{diff_{max}}$  соответствует максимальной разнице температур между аккумуляторными модулями в батарее. Решение задачи оптимизации методом квадратичного программирования формирует последовательность управляющих воздействий на горизонте управления:

$$Z_k^T = [u(k|k)^T, u(k+1|k)^T, \dots, u(k+c|k)^T]. \quad (12)$$

В формуле (12) только первый элемент последовательности, т.е.  $u(k|k)$ , используется в качестве фактического управляющего воздействия МПК на текущем шаге. На следующем шаге расчет повторяется, что обеспечивает динамическую коррекцию управления в режиме реального времени [6, 8].

### Интеллектуальное модельно-предиктивное управление

Интеллектуальное модельно-предиктивное управление является развитием традиционного МПК и дополняет его средствами прогнозирования режимов движения и адаптации целевой температуры батареи [8, 9]. На рис. 1 представлена принципиальная схема стратегии интеллектуального управления для системы термостатирования батареи [8]. Она включает контроллер МПК, систему прогнозирования скорости автомобиля, самоадаптер определения заданной температуры аккумулятора и модель производительности системы термостатирования.

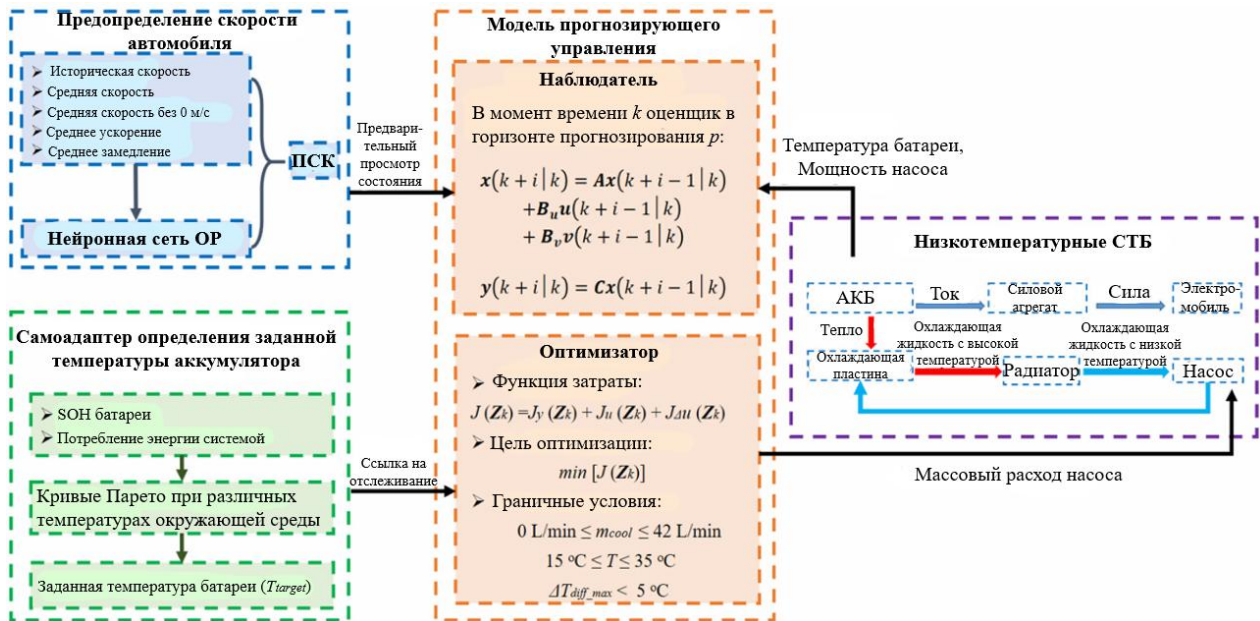


Рис. 1. Стратегия интеллектуального управления для системы термостатирования батарей

Fig. 1. Intelligent control strategy for the battery thermal management system

Нейронная сеть обратного распространения ошибки используется для формирования системы предварительного просмотра скорости электромобиля, которая помогает насосу регулировать массовый расход охлаждающей жидкости с учетом будущей тепловой нагрузки [8]. Входные данные нейронной сети включают параметры, характеризующие историческую скорость движения, среднюю скорость, среднюю скорость без учета холостого хода, среднее ускорение и замедление за последние 60 сек. На выходе нейронная сеть прогнозирует скорость движения на ближайший временной интервал. Нейронная сеть обратного распространения для системы прогнозирования скорости показана на рис. 2.

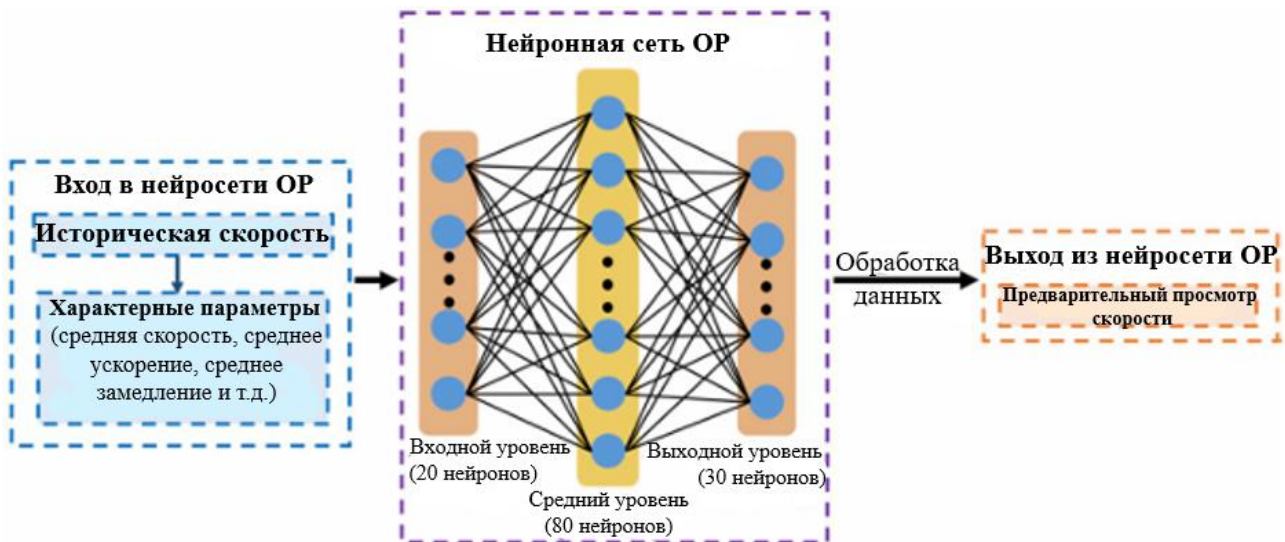


Рис. 2. Нейронная сеть обратного распространения для прогнозирования скорости движения

Fig. 2. Backpropagation neural network for vehicle speed prediction

Прогнозируемая скорость электромобиля близка к фактической. Для ездовых циклов NEDC и WLTC коэффициенты регрессии составляют соответственно 0,889 и 0,884 [8], что подтверждает возможность использования нейросетевого прогнозирования скорости для управления системой термостатирования.

Срок службы батареи и энергопотребление системы термостатирования зависят от целевой температуры батареи и температуры окружающей среды. Более низкая целевая температура может способствовать увеличению срока службы батареи, но одновременно повышает энергопотребление системы термостатирования. Поэтому для интеллектуального управления необходимо определять сбалансированную целевую температуру, обеспечивающую компромисс между энергопотреблением и ресурсом батареи. Для анализа такого компромисса могут использоваться границы Парето [10]. Закон Парето формулируется как принцип, согласно которому ограниченная часть факторов может обеспечивать значительную долю результата. В задачах оптимизации данный подход позволяет выделять рациональные решения, при которых дальнейшее улучшение одного критерия приводит к существенному ухудшению другого.

По результатам анализа данных для различных ездовых циклов установлено, что сбалансированная целевая температура составляет 22 °С. При сравнении с температурой, ориентированной на энергосбережение и равной 27 °С, снижение SOH для сбалансированной температуры составляет 10,8, 12,2, 12,7 и 12,2 % для циклов WLTC, NEDC, HWFET и MVEGA соответственно, тогда как средняя мощность увеличивается на 17,3, 17,5, 21 и 18 Вт. При сравнении с целевой, ориентированной на длительный срок службы и равной 20 °С, сбалансированная температура снижает потребление энергии на 45,1, 56,7, 43,2 и 56,2 % для тех же циклов, а значение SOH увеличивается на 1,3, 2,6, 1,7 и 2,6 %. Результаты представлены в табл. 1 [8].

Таблица 1.

**Влияние выбора целевой температуры на SOH и энергопотребление при различных ездовых циклах**

Table 1.

**Effect of target temperature selection on SOH and energy consumption under different driving cycles**

| Показатель  | WLTC  | NEDC  | HWFET | MVEGA |
|---|-------|-------|-------|-------|
| При сравнении с $T_r = 27$ °С: $\Delta\text{SOH}$ , % | -10,8 | -12,2 | -12,7 | -12,2 |
| При сравнении с $T_r = 27$ °С: $\Delta N_{cp}$ , Вт   | +17,3 | +17,5 | +21,0 | +18,0 |
| При сравнении с $T_r = 20$ °С: $\Delta\text{SOH}$ , % | +1,3  | +2,6  | +1,7  | +2,6  |
| При сравнении с $T_r = 20$ °С: $\Delta E_{потр}$ , %  | -45,1 | -56,7 | -43,2 | -56,2 |

Из данных табл. 1 следует, что тип ездового цикла оказывает ограниченное влияние на значение сбалансированной целевой температуры батареи. При этом температура окружающей среды оказывает более существенное влияние, так как она определяет условия теплообмена и охлаждающую способность системы термостатирования.

При температуре окружающей среды 25 °С и сбалансированной целевой температуре 27 °С снижение SOH по сравнению с температурой, основанной на энергосбережении и равной 32 °С, составляет 12,6 %, а средняя мощность увеличивается на 20 Вт [8]. При сравнении с целевой температурой, ориентированной на длительный срок службы и равной 25 °С, температура 27 °С снижает потребление энергии на 62,5 %, при этом снижение SOH составляет 2,2 %. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2.

**Влияние целевой температуры на SOH и энергопотребление при температуре окружающей среды 25 °С**

Table 2.

**Effect of target temperature on SOH and energy consumption at 25 °С ambient temperature**

| Показатель             | $T_r = 32$ °С | $T_r = 25$ °С |
|------------------------|---------------|---------------|
| $\Delta\text{SOH}$ , % | -12,6         | -2,2          |
| $\Delta N_{cp}$ , Вт   | +20           | -             |
| $\Delta E_{потр}$ , %  | -             | -62,5         |

Таким образом, значение температуры окружающей среды, увеличенное на 2 °С, может использоваться как самоадаптируемая целевая температура для системы термостатирования батареи [8].

### Сравнительный анализ интеллектуальных стратегий управления системой термостатирования

На основании рассмотренных данных можно сделать вывод, что двухпозиционное управление и ПИД-регулирование обладают ограниченной эффективностью при работе в условиях переменной тепловой нагрузки. Более высокие возможности имеют традиционное МПК, МПК с прогнозированием скорости и интеллектуальное МПК с самоадаптивной целевой температурой. В рассматриваемых исследованиях сравнивается стратегия интеллектуального МПК с контроллером двухпозиционного управления, традиционным МПК и МПК с прогнозированием скорости [8]. Поскольку самоадаптер определения заданной температуры аккумулятора может автоматически определять целевую температуру батареи, в расчетах учитывается изменение температуры окружающей среды (рис. 3).

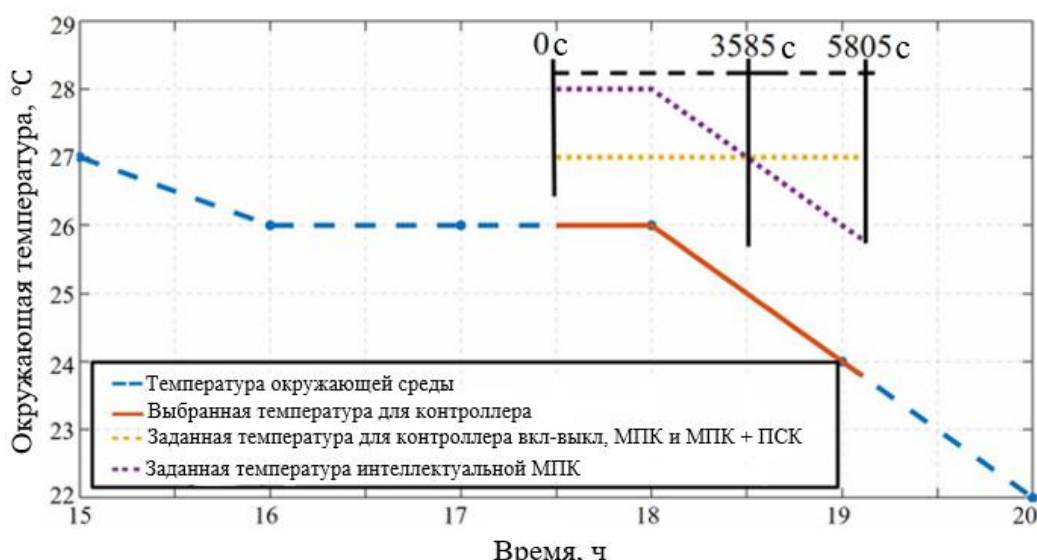


Рис. 3. Температура окружающей среды и целевая температура батареи

Fig. 3. Ambient temperature and battery target temperature

Средняя температура окружающей среды в рассматриваемый период составляет приблизительно 25 °С. На основании метода определения сбалансированной целевой температуры для двухпозиционного управления, традиционного МПК и МПК с прогнозированием скорости выбирается целевая температура 27 °С. Для интеллектуального МПК используется изменяющаяся заданная температура. Граничные условия приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Граничные условия для сравнения стратегий управления системой термостатирования

Table 3.

Boundary conditions for comparison of thermal management control strategies

| Ездовой цикл | Температура окружающей среды | Начальная температура батареи | Начальная температура охлаждающей жидкости | Начальный SOC | Начальный SOH |
|--------------|------------------------------|-------------------------------|--|---------------|---------------|
| NEDC         | По рис. 3                    | 26 °C                         | 26 °C                                      | 100 %         | 100 %         |

Для контроллера двухпозиционного управления верхний и нижний температурные пороги устанавливаются равными 27,5 и 26,5 °С соответственно. На рис. 4 показан массовый расход насоса при различных стратегиях управления.

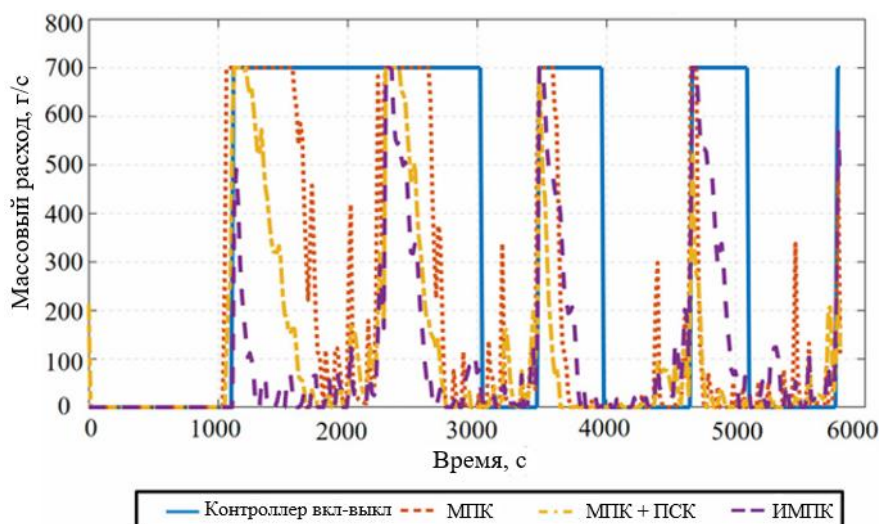


Рис. 4. Массовый расход насоса при различных стратегиях управления

Fig. 4. Pump mass flow rate under different control strategies

Согласно результатам моделирования, насос, управляемый по принципу включения и выключения, работает при массовом расходе 700 г/с, что приводит к значительному потреблению энергии. МПК с прогнозированием скорости характеризуется меньшим временем работы при высоком расходе и меньшими колебаниями, что указывает на снижение энергопотребления. Интеллектуальное МПК, имея целевую температуру выше 27 °С до момента времени 3585 с, также позволяет экономить энергию по сравнению с другими стратегиями. После достижения целевой температуры интеллектуальное МПК увеличивает расход охлаждающей жидкости, что может приводить к дополнительному энергопотреблению. В период высокой теплоотдачи, соответствующий интервалу 4515-4680 с, интеллектуальное МПК запускает насос на высокой скорости со средним расходом 334 г/с. При этом традиционное МПК и МПК с прогнозированием скорости имеют более низкие средние расходы, составляющие 260,8 г/с и 155,6 г/с соответственно [8]. На рис. 5 показана динамика температуры батареи при различных стратегиях управления.

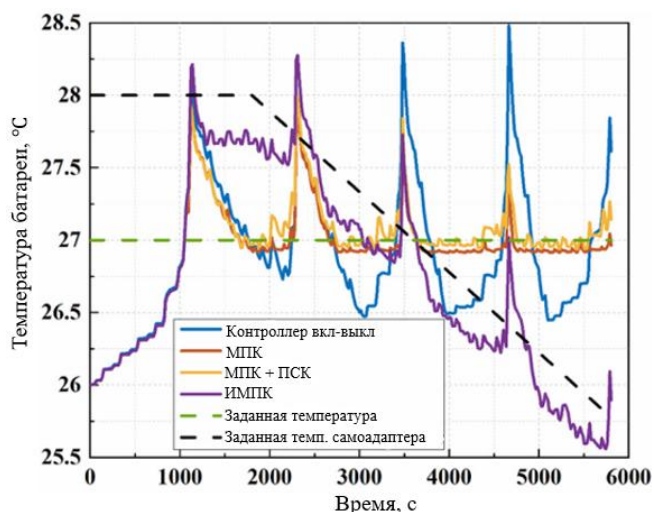


Рис. 5. Температура батареи при различных стратегиях управления

Fig. 5. Battery temperature under different control strategies

Среди рассмотренных контроллеров наибольшие колебания температуры батареи наблюдаются при двухпозиционном управлении: температура изменяется в диапазоне от 26,47 до 28,49 °С. МПК с прогнозированием скорости имеет более высокие колебания температуры батареи, чем традиционное МПК, однако различие между ними является незначитель-

ным. До момента времени 3585 с, поскольку заданная температура интеллектуального МПК превышает 27 °С, температура батареи обычно выше, чем при использовании других стратегий. После момента 3585 с температура батареи снижается вследствие уменьшения целевой температуры. Самоадаптивная настройка заданной температуры помогает интеллектуальному МПК продлить срок службы батареи по сравнению с другими стратегиями управления. Согласно рис. 6, SOH при интеллектуальном МПК в конце цикла движения составляет 98,814 %, что на 0,016, 0,012 и 0,008 % выше, чем у контроллера двухпозиционного управления, традиционного МПК и МПК с прогнозированием скорости соответственно [8].

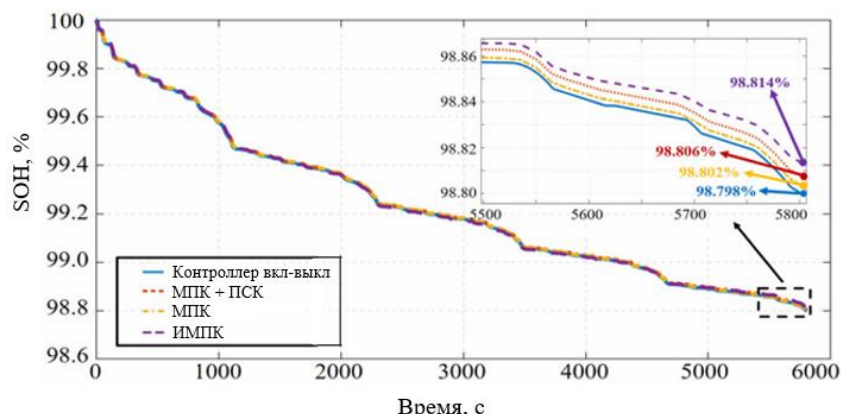


Рис. 6. SOH аккумуляторной ячейки при различных стратегиях управления

Fig. 6. Battery cell SOH under different control strategies

Максимальная и средняя разница между температурой батареи при интеллектуальном МПК и заданной температурой составляют 0,66 и 0,26 °С соответственно [8]. Это свидетельствует о высокой точности контроля температуры батареи интеллектуальным МПК. Следовательно, интеллектуальное МПК с самоадаптивной целевой температурой может обеспечивать более длительный срок службы батареи по сравнению с другими стратегиями управления. На рис. 7 показано энергопотребление системы термостатирования электромобиля при работе с различными стратегиями управления.

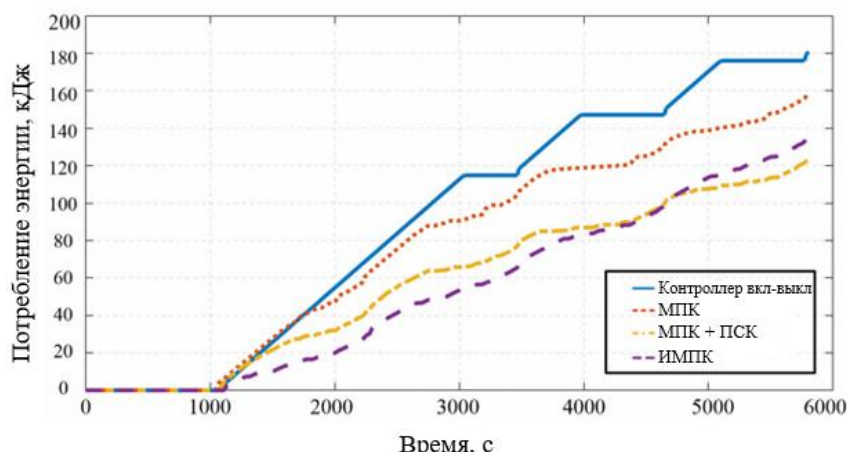


Рис. 7. Энергопотребление системы термостатирования при различных стратегиях управления

Fig. 7. Energy consumption of the thermal management system under different control strategies

Контроллер двухпозиционного управления потребляет больше энергии из-за длительной работы насоса при высоком массовом расходе. Интеллектуальное МПК, имея более высокую целевую температуру до 3585 с, демонстрирует наименьшее энергопотребление на начальном участке: 53,4 кДж за 3000 с, что на 52,6, 41,0 и 18,8 % ниже, чем у контроллера двухпозиционного управления, традиционного МПК и МПК с прогнозированием скорости соответственно [8].

После 3585 с целевая температура интеллектуального МПК становится ниже 27 °С, что приводит к увеличению расхода насоса и, соответственно, к росту энергопотребления. При 4730 с энергопотребление интеллектуального МПК становится сопоставимым с МПК с прогнозированием скорости, но затем интеллектуальное МПК начинает потреблять больше энергии для поддержания заданной температуры. В конце цикла движения энергопотребление интеллектуального МПК составляет 136,4 кДж, что на 9,7 % выше, чем у МПК с прогнозированием скорости, но на 24,5 и 14,1 % ниже, чем у двухпозиционного управления и традиционного МПК соответственно [8]. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4.

**Сравнение энергопотребления интеллектуального МПК с другими стратегиями управления**

Table 4.

**Comparison of energy consumption of intelligent MPC with other control strategies**

| Этап цикла                                       | Двухпозиционное управление | Традиционное МПК | МПК с прогнозированием скорости |
|--|----------------------------|------------------|---------------------------------|
| Начало цикла, снижение энергопотребления ИМПК, % | 52,6                       | 41,0             | 18,8                            |
| Конец цикла, снижение энергопотребления ИМПК, %  | 24,5                       | 14,1             | -9,7                            |

Отрицательное значение в табл. 4 означает, что в конце цикла интеллектуальное МПК потребляет больше энергии, чем МПК с прогнозированием скорости. Это связано с изменением целевой температуры и необходимостью более интенсивной работы насоса для поддержания требуемого температурного режима батареи. Несмотря на это, интеллектуальное МПК обеспечивает лучший баланс между энергопотреблением системы термостатирования и сохранением ресурса аккумуляторной батареи.

#### Обобщенное сравнение стратегий управления

На основании рассмотренных данных работ [3, 5-9] можно выполнить обобщенное сопоставление стратегий управления системой термостатирования тяговой аккумуляторной батареи. Сравнение целесообразно проводить по нескольким критериям: сложности реализации, способности учитывать будущую тепловую нагрузку, влиянию на энергопотребление системы термостатирования, точности поддержания температуры и применимости для электромобилей с переменными режимами движения. Результаты сопоставления представлены в табл. 5.

Таблица 5.

**Сравнение стратегий управления системой термостатирования тяговой аккумуляторной батареи**

Table 5.

**Comparison of control strategies for the traction battery thermal management system**

| Стратегия управления       | Учет прогноза и адаптации   | Энергетический эффект   | Основное ограничение  |
|----------------------------|---|---|---|
| 1                          | 2   | 3   | 4   |
| Двухпозиционное управление | Не учитывает прогноз тепловой нагрузки; управление выполняется по температурным порогам       | Наименее энергоэффективный вариант среди рассмотренных стратегий; характеризуется длительной работой насоса при высоком расходе | Повышенные колебания температуры и нерациональные режимы работы исполнительных механизмов |
| ПИД-регулирование          | Не учитывает будущую тепловую нагрузку; управление основано на текущем отклонении температуры | Потенциально эффективнее двухпозиционного управления, но уступает МПК-стратегиям при переменных режимах движения                | Необходимость настройки коэффициентов и ограниченная адаптация к изменяющимся условиям    |

Окончание табл. 5.  
Сравнение стратегий управления системой термостатирования  
тяговой аккумуляторной батареи

*Table 5 termination.*  
**Comparison of control strategies for the traction battery thermal management system**

| <i>1</i>                         | <i>2</i>  | <i>3</i>  | <i>4</i>  |
|----------------------------------|---|---|---|
| Модельно-предиктивное управление | Учитывает модель объекта, ограничения и горизонт прогнозирования        | Обеспечивает снижение энергопотребления по сравнению с простыми стратегиями управления; в конце цикла уступает ИМПК на 14,1 %   | Требует математической модели объекта и повышенных вычислительных ресурсов  |
| МПК с прогнозированием скорости  | Учитывает прогнозируемую скорость движения и будущую тепловую нагрузку  | По сравнению с традиционным МПК снижает энергопотребление на 2,5 %, 5,6 % и 6,0 % при времени работы 4000, 5000 и 5805 с соответственно   | Эффективность зависит от точности прогноза скорости движения  |
| Интеллектуальное МПК             | Учитывает прогноз скорости и самоадаптивную целевую температуру батареи | На начальном участке снижает энергопотребление на 52,6 %, 41,0 % и 18,8 % по сравнению с двухпозиционным управлением, МПК и МПК с прогнозированием скорости соответственно; в конце цикла снижает энергопотребление на 24,5 % и 14,1 % по сравнению с двухпозиционным управлением и МПК | Может потреблять на 9,7 % больше энергии, чем МПК с прогнозированием скорости, если требуется более интенсивное поддержание целевой температуры |

Из табл. 5 следует, что двухпозиционное управление и ПИД-регулирование целесообразны преимущественно для простых систем термостатирования, в которых отсутствуют высокие требования к прогнозированию тепловой нагрузки и оптимизации энергопотребления. Модельно-предиктивное управление является более эффективным подходом, позволяющим учитывать ограничения системы и прогнозируемое изменение ее состояния. Применение прогнозирования скорости движения дополнительно снижает энергопотребление за счет более рационального управления массовым расходом охлаждающей жидкости.

Наиболее универсальной стратегией является интеллектуальное модельно-предиктивное управление [8, 9], так как оно обеспечивает баланс между энергопотреблением системы термостатирования и сохранением ресурса тяговой аккумуляторной батареи. При этом минимальное энергопотребление в отдельных режимах может обеспечиваться МПК с прогнозированием скорости, что необходимо учитывать при выборе алгоритма управления.

### Выводы

1. Проведен сравнительный анализ современных стратегий управления системами термостатирования тяговых аккумуляторных батарей электромобилей: двухпозиционного управления, ПИД-регулирования, модельно-предиктивного управления, модельно-предиктивного управления с прогнозированием скорости движения и интеллектуального модельно-предиктивного управления.

2. Установлено, что двухпозиционное управление удобно, однако наименее энергоэффективно за счет повышенных колебаний температуры и длительной работе исполнительных механизмов при высоких значениях массового расхода охлаждающей жидкости.

3. ПИД-регулирование позволяет реализовать непрерывное управление температурой батареи, однако его эффективность ограничена при переменных режимах движения электромобиля. Данный подход не учитывает будущую тепловую нагрузку и поэтому уступает модельно-предиктивным стратегиям по возможностям оптимизации энергопотребления.

4. Модельно-предиктивное управление является более эффективной стратегией для систем термостатирования тяговых аккумуляторных батарей, поскольку позволяет учиты-

вать ограничения по температуре, массовому расходу охлаждающей жидкости и скорости изменения управляющего воздействия. Применение прогнозирования скорости движения в составе МПК позволяет снизить энергопотребление по сравнению с традиционным МПК на 2,5, 5,6 и 6,0 % при времени работы 4000, 5000 и 5805 с соответственно.

5. Интеллектуальное модельно-предиктивное управление с самоадаптивной целевой температурой обеспечивает выраженный энергетический эффект на начальном участке цикла. При времени работы 3000 с энергопотребление ИМПК составляет 53,4 кДж, что на 52,6 % ниже, чем при двухпозиционном управлении, на 41,0 % ниже, чем при традиционном МПК, и на 18,8 % ниже, чем при МПК с прогнозированием скорости.

6. В конце цикла движения энергопотребление интеллектуального МПК составляет 136,4 кДж. Это на 24,5 % ниже, чем при двухпозиционном управлении, и на 14,1 % ниже, чем при традиционном МПК. При этом энергопотребление ИМПК на 9,7 % выше, чем при МПК с прогнозированием скорости, что связано с необходимостью более интенсивного поддержания заданного температурного режима батареи.

7. Показано, что выбор целевой температуры батареи существенно влияет на энергопотребление системы термостатирования. При использовании сбалансированной целевой температуры 22 °С снижение энергопотребления по сравнению с температурой, ориентированной на увеличение срока службы батареи, составляет 45,1, 56,7, 43,2 и 56,2 % для ездовых циклов WLTC, NEDC, HWFET и MVEGA соответственно. При температуре окружающей среды 25 °С выбор целевой температуры 27 °С позволяет снизить энергопотребление на 62,5 % по сравнению с целевой температурой 25 °С.

8. Наиболее перспективны для повышения энергоэффективности системы термостатирования тяговой аккумуляторной батареи модельно-предиктивные стратегии управления. Если приоритетом является минимизация энергопотребления в отдельных режимах, целесообразно применение МПК с прогнозированием скорости. Баланс между энергопотреблением, точностью поддержания температуры и сохранением ресурса батареи обеспечит интеллектуальное модельно-предиктивное управление с самоадаптивной целевой температурой.

9. Интеллектуальные стратегии управления зависят от точности прогнозных данных. Так, прогнозирование скорости движения транспортного средства может усложниться при наличии случайных дорожных факторов. Развитие коммуникационных технологий, включая V2V и V2I, может повысить точность прогноза режимов движения и эффективность интеллектуальных систем управления термостатированием тяговых аккумуляторных батарей [11].

### Библиографический список

1. **Ylä-Himanka, L.** Electro-Thermal Modeling and Nonlinear Temperature Control of Lithium-Ion Batteries : Master of Science Thesis. – Tampere: Tampere University, 2024. – 73 p.
2. **Omariba, Z.** Parameter Identification and State Estimation of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles with Vibration and Temperature Dynamics / Z. Omariba, L. Zhang, H. Kang [et al]. // World Electric Vehicle Journal. – 2020. – Vol. 11, № 3. – P. 50. – DOI: 10.3390/wevj11030050.
3. **Li, J.** Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles: Master's Thesis / J. Li, Z. Zhu. – Göteborg: Chalmers University of Technology, 2014. – 79 p.
4. **Стручков В.С.** Разработка перспективной системы термостатирования для электромобильного транспорта / В.С. Стручков, Р.Х. Курмаев // Труды НАМИ. – 2019. – № 1. – С. 29-35.
5. **Ang, К.Н.** PID control system analysis, design, and technology / К.Н. Ang, G. Chong, Y. Li // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2005. – Vol. 13, № 4. P. 559-576.
6. **Xie, Y.** An improved intelligent model predictive controller for cooling system of electric vehicle / Y. Xie, Z. Liu, P. Wang [et al]. // Applied Thermal Engineering. – 2021. – Vol. 182. – P. 116084. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116084.
7. **Деменков, Н.П.** Управление с прогнозированием : учебное пособие / Н.П. Деменков.– Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 65 с.
8. **Lu, P.** Numerical Calculation Method of Model Predictive Control for Integrated Vehicle Thermal Management Based on Underhood Coupling Thermal Transmission / P. Lu, Q. Gao, L. Lv [et al]. // Energies. – 2019. – Vol. 12, № 2. – P. 259. – DOI: 10.3390/en12020259.

9. **Wan Ramli, W.R.** Organic Rankine Cycle Waste Heat Recovery for Passenger Hybrid Electrical Vehicles / W.R. Wan Ramli, A. Pesyridis, D. Gohil [et al]. // *Energies*. 2020. – Vol. 13, № 17. – P. 4532. – DOI: 10.3390/en13174532.
10. **Barlow, T.J.** A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions / T.J. Barlow, S. Latham, I.S. McCrae [et al].– Berkshire: TRL Limited, 2009. – 212 p.
11. **Hardy, M.** Pareto's Law / M. Hardy // *The Mathematical Intelligencer*. – 2010. – Vol. 32, № 3. – P. 38-43. – DOI: 10.1007/s00283-010-9159-2.
12. **Ma, Y.** Two-level optimization strategy for vehicle speed and battery thermal management in connected and automated EVs / Y. Ma, Q. Ma, Y. Liu [et al]. // *Applied Energy*. – 2024. – Vol. 361. – P. 122928. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.122928.
13. **Yuan, X.H.** MPC-based thermal management for water-cooled proton exchange membrane fuel cells / X.H. Yuan, G. Wu, J.G. Zhou [et al]. // *Energy Reports*. – 2022. – Vol. 8. – P. 338-348.
14. **Sanguesa, J.A.** Sensing Traffic Density Combining V2V and V2I Wireless Communications / J.A. Sanguesa, J. Barrachina, M. Fogue [et al]. // *Sensors*. – 2015. – Vol. 15, № 12. – P. 31794-31810. – DOI: 10.3390/s151229889.

### References

1. Ylä-Himanka L. Electro-Thermal Modeling and Nonlinear Temperature Control of Lithium-Ion Batteries [master's thesis]. Tampere: Tampere University; 2024. 73 p.
2. Omariba Z., Zhang L., Kang H., Sun D. Parameter Identification and State Estimation of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles with Vibration and Temperature Dynamics. *World Electric Vehicle Journal*. 2020;11(3):50. doi: 10.3390/wevj11030050.
3. Li J, Zhu Z. Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles [master's thesis]. Göteborg: Chalmers University of Technology; 2014. 79 p.
4. Struchkov V.S., Kurmaev R.H. Razrabotka perspektivnoy sistemy termostatirovaniya dlya elektromobil'nogo transporta [Development of a Promising Thermal Management System for Electric Vehicles]. *Trudy NAMI* [Proceedings of NAMI]. 2019;(1):29-35. (in Russian).
5. Ang KH, Chong G, Li Y. PID Control System Analysis, Design, and Technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2005;13(4):559-576.
6. Xie Y., Liu Z., Wang P., Li K., Wang X., Wu C., et al. An Improved Intelligent Model Predictive Controller for Cooling System of Electric Vehicle. *Applied Thermal Engineering*. 2021;182:116084. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116084.
7. Demenkov N.P. Upravlenie s prognozirovanie: uchebnoe posobie [Predictive Control: A Textbook]. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Bauman; 2020. 65 p. (in Russian).
8. Lu P, Gao Q, Lv L, Xue X, Wang Y. Numerical Calculation Method of Model Predictive Control for Integrated Vehicle Thermal Management Based on Underhood Coupling Thermal Transmission. *Energies*. 2019;12(2):259. doi: 10.3390/en12020259.
9. Wan Ramli WR, Pesyridis A, Gohil D, Alshammari F. Organic Rankine Cycle Waste Heat Recovery for Passenger Hybrid Electrical Vehicles. *Energies*. 2020;13(17):4532. doi: 10.3390/en13174532.
10. Barlow T.J., Latham S., McCrae I.S., Boulter P.G. A Reference Book of Driving Cycles for Use in the Measurement of Road Vehicle Emissions. Berkshire: TRL Limited; 2009.
11. Hardy M. Pareto's Law. *The Mathematical Intelligencer*. 2010;32(3):38-43. doi: 10.1007/s00283-010-9159-2.
12. Ma Y., Ma Q., Liu Y., Gao J., Chen H. Two-Level Optimization Strategy for Vehicle Speed and Battery Thermal Management in Connected and Automated EVs. *Applied Energy*. 2024;361:122928. doi: 10.1016/j.apenergy.2024.122928.
13. Yuan X.H., Wu G., Zhou J.G., Xiong X, Wang YP. MPC-Based Thermal Management for Water-Cooled Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Energy Reports*. 2022;8:338-348.
14. Sanguesa J.A., Barrachina J., Fogue M., Garrido P., Martinez F.J., Cano J.C., et al. Sensing Traffic Density Combining V2V and V2I Wireless Communications. *Sensors*. 2015;15(12):31794-31810. doi: 10.3390/s151229889.

**Дата поступления  
в редакцию: 17.11.2025**

**Дата принятия  
к публикации: 18.04.2026**

## ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИЙ ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕДАЧИ

**В.Б. Кобзаренко**

ORCID: 0009-0009-8514-9608 e-mail: kobzarenko\_vb@bmstu.ru

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

**Я.Ю. Левенков**

ORCID: 0000-0001-6556-3232 e-mail: levenkov\_yy@bmstu.ru

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

Рассмотрены методы улучшения эксплуатационных характеристик эвольвентной зубчатой передачи путем модификации геометрических параметров зубьев, а также проведен сравнительный анализ их влияния на плавность и шум. Определены рациональные значения параметров продольной и поперечной модификации зубьев. Расчеты проводились при помощи программного обеспечения KISSsoft. Выявлены модификации, позволяющие минимизировать шум и вибрации, а также кинематическую погрешность максимально эффективным образом.

**Ключевые слова:** зубчатые колеса; эксплуатационные характеристики; модификация зубчатых колес; KISSsoft; модернизация трансмиссии.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Кобзаренко, В.Б. Влияние модификаций зубчатого зацепления на эксплуатационные характеристики передачи / В.Б. Кобзаренко, Я.Ю. Левенков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2026. № 2. С. 84-95. EDN ZBEROH

## THE EFFECT OF GEAR MODIFICATIONS ON THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF A GEAR TRAIN

**V.B. Kobzarenko**

ORCID: 0009-0009-8514-9608 e-mail: kobzarenko\_vb@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russia

**Ya.Yu. Levenkov**

ORCID: 0000-0001-6556-3232 e-mail: levenkov\_yy@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russia

**Abstract.** This article discusses methods for improving the performance of an evolved gear train by modifying the geometric parameters of the teeth, as well as a comparative analysis of their effect on smoothness and noise. The purpose of the work is to determine the rational values of the parameters of the longitudinal and transverse modification of the teeth. The calculations were performed using KISSsoft software. As result of the study, modifications were identified that minimize noise and vibration, as well as kinematic error in the most efficient way.

**Key words:** gears; performance characteristics; gear modification; KISSsoft; transmission modernization.

**FOR CITATION:** V.B. Kobzarenko, Ya. Yu. Levenkov. The effect of gear modifications on the operational characteristics of a gear train. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 2. Pp. 84-95. EDN ZBEROH

## Введение

Зубчатые передачи получили широкое распространение в конструкциях силовых установок транспортных средств для передачи мощности от двигателя к движителю за счет своих преимуществ [1], которая осуществляется через контактное взаимодействие между рабочими поверхностями зубьев. Наибольшее распространение в автомобилестроении получил профиль зубьев в виде эвольвенты [2]. Зубчатые зацепления характеризуются рядом ключевых эксплуатационных показателей, среди которых особое значение имеют коэффициент полезного действия (КПД), уровень шума и технологичность изготовления. КПД отражает эффективность передачи механической энергии, уровень шума определяет акустический комфорт эксплуатации механизмов, а технологичность влияет на себестоимость производства и ремонтпригодность изделий.

Выход зубчатого зацепления из строя оказывает весьма негативное воздействие на работу механизма. Это может привести к снижению производительности транспортно-технологических средств, увеличению затрат на обслуживание и ремонт, а также аварийным ситуациям. Поломка и дефекты зубьев вызывают нарушение кинематической точности передачи движения, повышают уровня вибрации и шума, негативно сказываясь на работе сопряженных узлов и агрегатов. Наиболее частыми являются следующие причины отказов.

1. *Усталостное разрушение.* Возникает вследствие многократного нагружения зуба, приводящего к появлению трещин и сколов. Причинами служат неправильный подбор материалов, недостаточная твердость поверхности или чрезмерные нагрузки.

2. *Износ рабочих поверхностей.* Проявляется в форме абразивного износа, возникающего из-за попадания посторонних частиц в зону контакта зубьев, либо адгезионного износа, вызванного недостаточной смазкой или перегревом.

3. *Пластическое деформирование.* Наблюдается при перегрузках, особенно при запуске или остановке машин, когда зубья испытывают повышенные ударные нагрузки, что приводит к деформации и потере геометрической формы профиля зуба.

Существует множество различных методов улучшения эксплуатационных характеристик зубчатого зацепления, наиболее эффективным из которых является модификация [1]. Ее главная цель – минимизировать вибрацию и шум, а также обеспечить большую надежность и продолжительный срок службы.

### Влияние модификаций на показатели надежности и эффективности зубчатых колес

Существует несколько видов модификации зубчатого зацепления, каждый из которых направлен на улучшение определенных характеристик передачи – снижения шума, увеличения нагрузочной способности, увеличения КПД передачи или компенсации деформаций:

- модификация линии зуба;
- модификация профиля зуба;
- комбинированные модификации зубьев.

Модифицированный исходный контур характеризуется рядом преимуществ: увеличенные или асимметричные углы обеспечивают повышенную контактную прочность зубьев; наличие приграничной зоны и притупленной вершины исключает интерференцию кромок и снижает концентрацию напряжений; также контролируется толщина вершины. В качестве оценочных показателей эффективности модификаций приняты кинематическая погрешность, коэффициенты запаса прочности ножки и боковой поверхности и коэффициенты перекрытия. Основные параметры продольной модификации зубчатого зацепления представлены в табл. 1. В зависимости от условий работы и изготовления зубчатого зацепления могут применяться различные наборы параметров модификации. Для уменьшения влияния погрешностей профиля зубьев на плавность работы цилиндрических зубчатых передач и для компенсации колебаний упругой податливости зубьев рекомендуется применять исходный контур с модификацией профиля зуба.

**Таблица 1.**  
**Параметры продольной модификации**  
**Table 1.**  
**Parameters of the longitudinal modification**

| Параметр       | Обозначение   | Единицы измерения |
|----------------|---|-------------------|
| b              | Ширина венца  | мм                |
| $b_x$          | Исходная ширина                                       | мм                |
| $b_c$          | Ширина продольной модификации                         | мм                |
| $b_f$          | Рабочая ширина продольной модификации                 | мм                |
| $C_{\beta I}$  | Глубина продольной модификации на левой стороне зуба  | мм                |
| $C_{\beta II}$ | Глубина продольной модификации на правой стороне зуба | мм                |
| r              | Радиус продольной модификации                         | мм                |
| $r_I$          | Радиус продольной модификации на левой стороне зуба   | мм                |
| $r_{II}$       | Радиус продольной модификации на правой стороне зуба  | мм                |
| $L_{CI}$       | Длина продольной модификации на левой стороне зуба    | мм                |
| $L_{CII}$      | Длина продольной модификации на правой стороне зуба   | мм                |

Глобально схемы модификации исходного контура можно разделить на два типа: с прямой и с параболической линиями модификации. Значение этих и других параметров модификации профиля устанавливаются либо экспериментальным путем, либо расчетом, учитывающим степень точности колеса, статические характеристики типичных геометрических и монтажных погрешностей, упругую податливость зубьев, зависящих от метода производства [3]. Обозначения параметров модификаций представлены в табл. 2.

**Таблица 2.**  
**Параметры модификации исходного контура**  
**Table 2.**  
**Parameters for modifying the original contour**

| Параметр            | Обозначение                                 | Единицы измерения |
|---------------------|---|-------------------|
| $\Delta_q$          | Глубина модификации головки зуба            | мм                |
| $\Delta_g$          | Глубина модификации ножки зуба              | мм                |
| $\Delta_{\alpha q}$ | Нормальная глубина модификации головки зуба | мм                |
| $\Delta_{\alpha g}$ | Нормальная глубина модификации ножки зуба   | мм                |
| $h_q$               | Высота модификации головки зуба             | мм                |
| $h_g$               | Высота модификации ножки зуба               | мм                |
| $\alpha_t$          | Угол модификации                            | градус            |

В технически обоснованных случаях допускается применять модификацию профиля комбинированного типа [3-5]. Также эффективность профильной модификации подтверждается данными [6].

### Оценка влияния модификации зубьев на эксплуатационные характеристики зубчатой передачи

В качестве зубчатого зацепления был выбран планетарный колесный редуктор моста трактора (табл. 3).

Таблица 3.  
 Параметры зубчатых колес

Table 3.  
 Gears parameters

| Параметр                           | Солнце       | Сателлиты | Эпицикл |
|------------------------------------|--------------|-----------|---------|
| Зубчатое зацепление                | Эвольвентное |           |         |
| Модуль, мм                         | 3            | 3         | 3       |
| Число зубьев                       | 12           | 23        | 60      |
| Угол наклона, °                    | 0            | 0         | 0       |
| Угол профиля, °                    | 25           | 25        | 25      |
| Коэффициент высоты головки         | 1            | 1         | 1       |
| Коэффициент высоты ножки           | 1,25         | 1,25      | 1,25    |
| Коэффициент смещения по ГОСТ 16531 | 0,34         | 0,5752    | 0,4121  |
| Делительный диаметр                | 36           | 69        | 180     |
| Степень точности                   | 8            | 8         | 8       |

Проверка влияния модификации может быть проведена только с использованием контактного анализа под нагрузкой. Чаще всего данная задача решается численными методами с использованием метода конечных элементов и соответствующих программных пакетов, что является довольно трудоемким с точки зрения временных затрат и затрат ресурсов ЭВМ [7]. Однако KISSsoft позволяет проводить данные расчеты с помощью встроенное в данное ПО аналитической модели Вебера-Банашека [8]. Преимущества данного подхода в том, что возможно исследовать различные варианты модификаций за короткое время.

Результаты данного расчета предоставляют важные для дальнейшей оптимизации и оценки шума параметры:

- ошибка передачи;
- амплитудный спектр ошибки передачи;
- возбуждающая сила.

Амплитудный спектр ошибки зубчатой передачи представляет собой графическое отображение распределения амплитуд колебаний зубчатых колес относительно определенных частот. Этот метод применяется для диагностики состояния зубчатых передач путем выявления характерных дефектов и оценки уровня вибрации, возникающей при работе механизма. Возбуждающая сила в зубчатых зацеплениях – это динамическая нагрузка, возникающая в результате взаимодействия зубьев шестерен. Она проявляется как периодический импульс силы, создаваемый контактами зубьев при вращении колес. Самым важным параметром для понижения уровня шума является ошибка передачи. Она описывает отклонение теоретической точки контакта от реальной с учетом деформации зуба.

Рассмотрим влияние на эксплуатационные характеристики зубчатых передач следующих модификаций.

*Скругление кончика зуба.* Данная модификация уменьшает концентрацию напряжений и снижает риск разрушения зубьев при эксплуатации, способствуя также снижению уровня шума и уменьшению износа контактирующих поверхностей благодаря плавному взаимодействию зубьев.

*Срез кромок зуба.* Заключается в специальной обработке острых краев зуба зубчатого колеса с целью уменьшения концентрации напряжений, снижения риска повреждения поверхности и предотвращения образования микротрещин.

*Линейная модификация головки с переходным радиусом.* Это способ изменения профиля зуба зубчатого колеса, при котором вершина зуба имеет небольшую закругленную форму, плавно соединенную с основной поверхностью зуба посредством линейного перехода. Цель модификации заключается в снижении концентрации напряжений, повышении прочности зуба и улучшении условий контакта зубьев.

**Бочкообразность.** Представляет из себя форму модифицированного профиля зуба зубчатого колеса, при которой поверхность зуба слегка выпуклая вдоль своей длины. Такой профиль создает равномерное распределение давления по всей длине контакта зубьев, снижая нагрузку на отдельные участки и предотвращая преждевременный износ.

**Твист.** Тип модификации профиля зубчатого зацепления, при котором ось симметрии зуба отклоняется от прямой линии, образуя спиральную или винтовую конфигурацию. Такое изменение профиля позволяет равномерно распределять нагрузку по ширине зуба.

### Результаты расчета

**Скругление кончика зуба.** В качестве первой модификации профиля для рассмотрения была выбрана – скругление кончика зуба. Для всех зубчатых колес были заданы одинаковые параметры этой модификации, а именно радиус скругления. Ниже приведены результаты расчета (табл. 4). На рис. 1-3 приведены лучшие результаты и результаты расчета без модификации.

Таблица 4.  
Результаты расчета

Table 4.  
Calculation results

| Значение радиуса модификации $r$ , мкм | Запас прочности ножки зуба |       |       | Запас прочности боковой поверхности зуба |       |       | Перекрытия, солнечное колесо – сателлиты | Перекрытия, сателлиты – эпицикл |
|--|----------------------------|-------|-------|--|-------|-------|--|---------------------------------|
|  | Сол.                       | Сат.  | Эп.   | Сол.                                     | Сат.  | Эп.   |  |                                 |
| 0                                      | 5,004                      | 4,435 | 2,426 | 1,448                                    | 1,867 | 3,322 | 1,495/1,495                              | 2,095/2,095                     |
| 50                                     | 4,991                      | 4,460 | 2,453 | 1,444                                    | 1,864 | 3,322 | 1,495/1,495                              | 2,095/2,095                     |
| 150                                    | 4,963                      | 4,512 | 2,509 | 1,436                                    | 1,860 | 3,322 | 1,474/1,474                              | 2,074/2,074                     |
| 250                                    | 4,935                      | 4,570 | 2,566 | 1,429                                    | 1,855 | 3,322 | 1,463/1,463                              | 2,067/2,064                     |

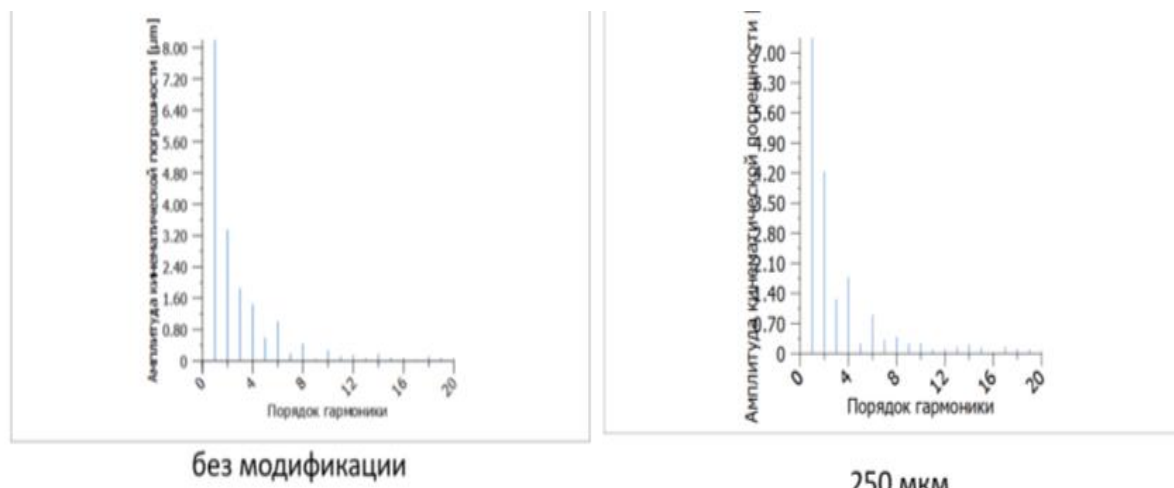


Рис. 1. Изменение амплитудного спектра кинематической погрешности

Fig. 1. Change in the amplitude spectrum of the kinematic error

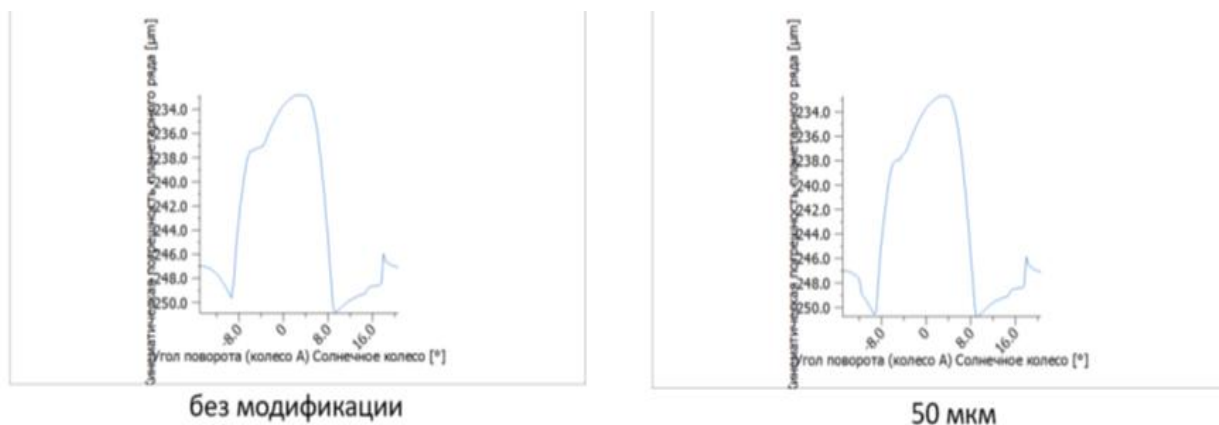


Рис. 2. Изменение кинематической погрешности

Fig. 2. Change in kinematic error

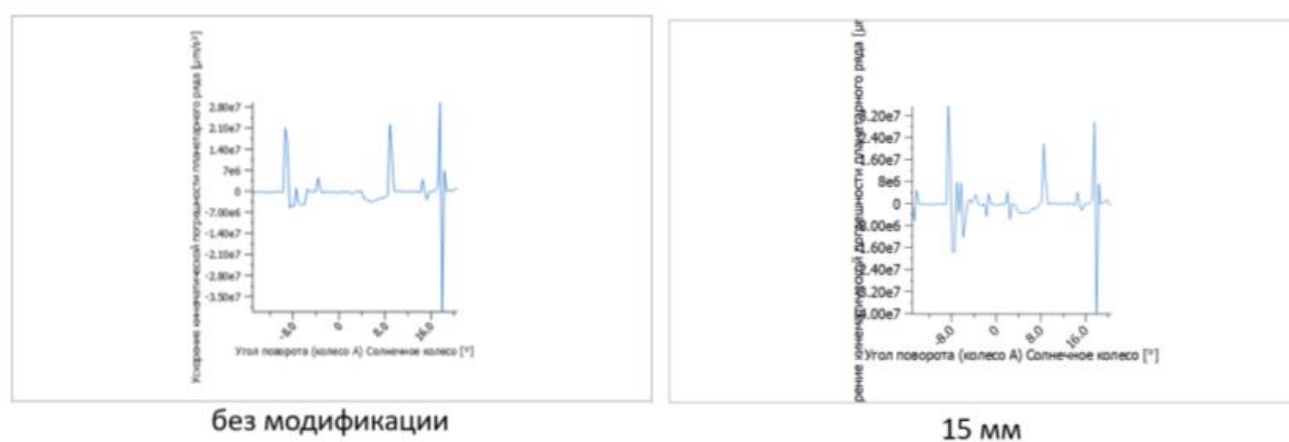


Рис. 3. Изменение ускорений кинематической погрешности

Fig. 3. Change in acceleration of kinematic error

*Срез кромок зуба.* В качестве следующей модификации профиля для рассмотрения была выбрана – срез кромок зуба. Для всех зубчатых колес были заданы одинаковые параметры этой модификации, а именно высота и угол наклона. Ниже приведены результаты расчета (табл. 5). На рис. 4-6 приведены лучшие результаты и результаты расчета без модификации.

Таблица 5.  
Результаты расчета

Table 5.  
Calculation results

| Значение величины модификации $h$ , мкм | Запас прочности ножки зуба |       |       | Запас прочности боковой поверхности зуба |       |       | Перекрытия, солнечное колесо – спутники | Перекрытия, спутники – эпицикл |
|---|----------------------------|-------|-------|--|-------|-------|---|--------------------------------|
|   | Сол.                       | Сат.  | Эп.   | Сол.                                     | Сат.  | Эп.   |   |                                |
| 0                                       | 5,004                      | 4,435 | 2,426 | 1,448                                    | 1,867 | 3,322 | 1,495/1,495                             | 2,095/2,095                    |
| 100                                     | 4,935                      | 4,549 | 2,525 | 1,426                                    | 1,854 | 3,322 | 1,463/1,463                             | 2,107/2,107                    |
| 200                                     | 4,867                      | 4,679 | 2,631 | 1,404                                    | 1,842 | 3,343 | 1,442/1,442                             | 2,064/2,064                    |
| 300                                     | 4,796                      | 4,669 | 2,747 | 1,381                                    | 1,830 | 3,398 | 1,410/1,410                             | 1,946/1,946                    |

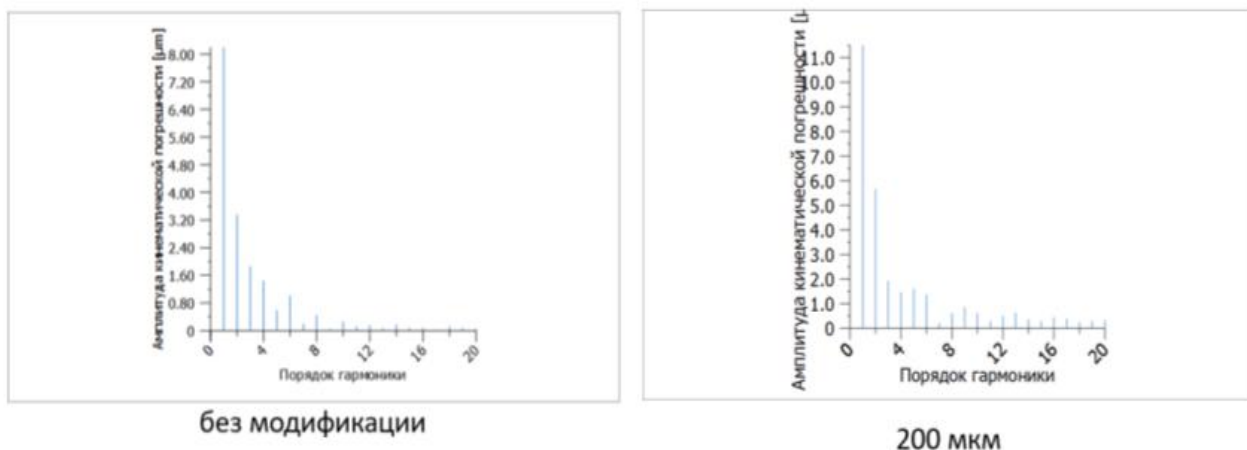


Рис. 4. Изменение амплитудного спектра кинематической погрешности

Fig. 4. Change in the amplitude spectrum of the kinematic error

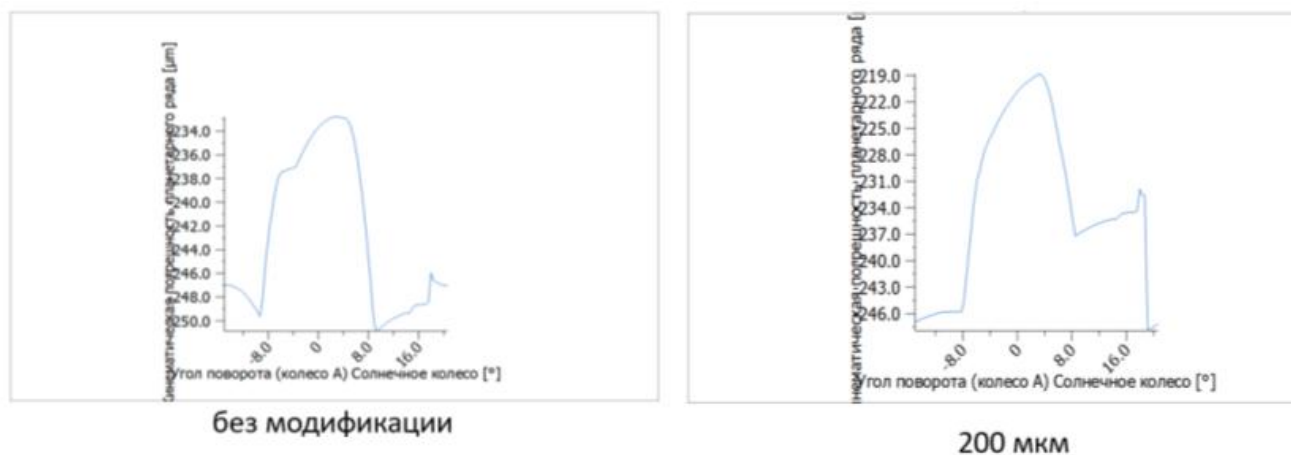


Рис. 5. Изменение кинематической погрешности

Fig. 5. Change in kinematic error

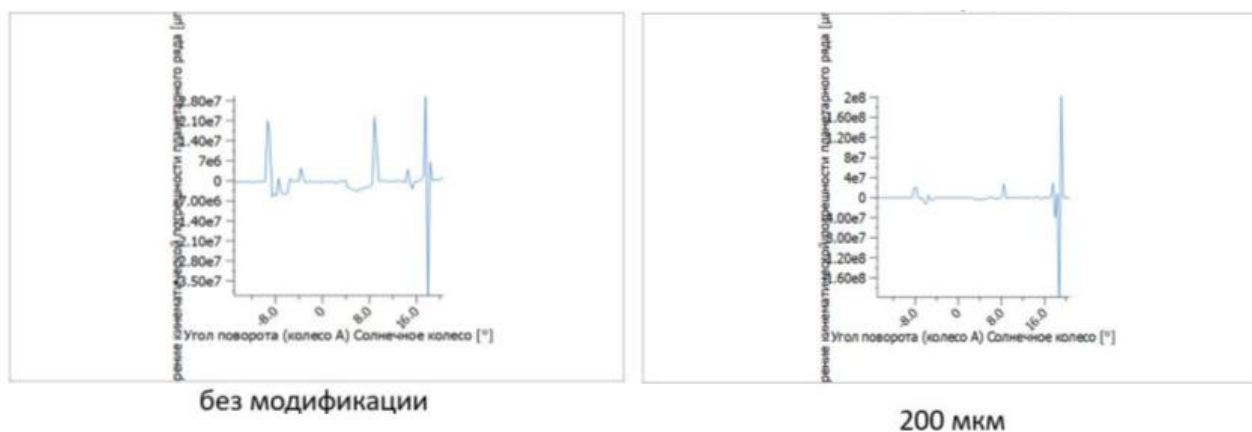


Рис. 6. Изменение ускорений кинематической погрешности

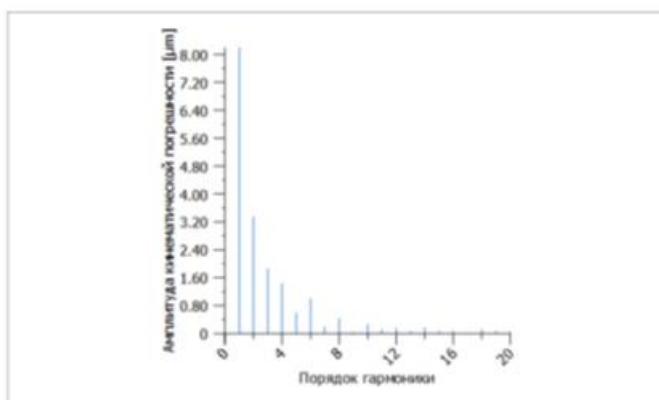
Fig. 6. Change in acceleration of kinematic error

*Линейная модификация головки с переходным радиусом.* Рассмотрено влияние модификации – линейная модификация головки с переходным радиусом. Ниже приведены результаты расчета (табл. 6). На рис. 7-9 приведены лучшие результаты и результаты расчета без модификации.

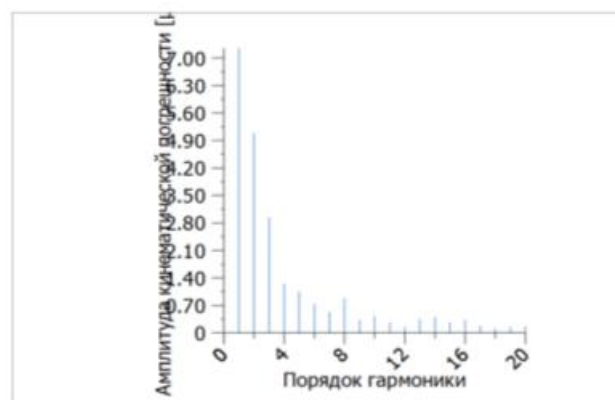
Таблица 6.  
Результаты расчета

Table 6.  
Calculation results

| Значение толщины модификации, мкм | Запас прочности ножки зуба |       |       | Запас прочности боковой поверхности зуба |       |       | Перекрытия, солнечное колесо – спутники | Перекрытия, спутники – эпицикл |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|-------|--|-------|-------|---|--------------------------------|
|                                   | Сол.                       | Сат.  | Эп.   | Сол.                                     | Сат.  | Эп.   |   |                                |
| 0                                 | 5,004                      | 4,435 | 2,426 | 1,448                                    | 1,867 | 3,322 | 1,495/1,495                             | 2,095/2,095                    |
| 5                                 | 5,004                      | 4,435 | 2,426 | 1,448                                    | 1,867 | 3,322 | 1,484/1,484                             | 2,084/2,084                    |
| 10                                | 5,004                      | 4,435 | 2,426 | 1,448                                    | 1,867 | 3,322 | 1,484/1,484                             | 2,084/2,084                    |
| 15                                | 5,004                      | 4,435 | 2,426 | 1,448                                    | 1,867 | 3,322 | 1,484/1,484                             | 2,074/2,074                    |



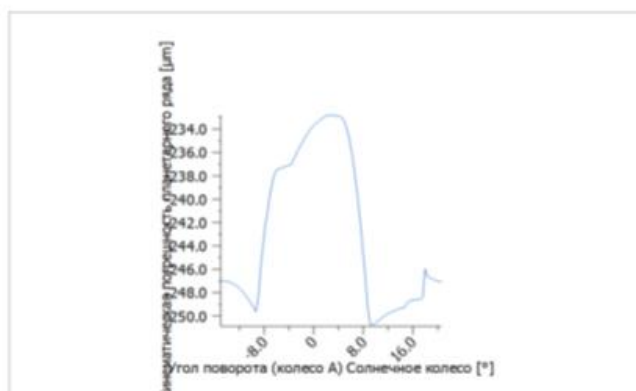
без модификации



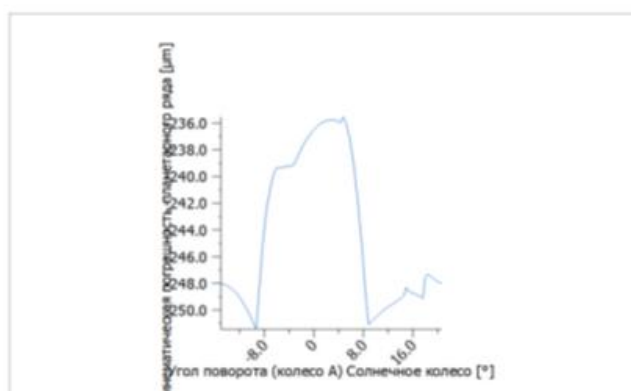
15 мкм

Рис. 7. Изменение амплитудного спектра кинематической погрешности

Fig. 7. Change in the amplitude spectrum of the kinematic error



без модификации



5 мкм

Рис. 8. Изменение кинематической погрешности

Fig. 8. Change in kinematic error

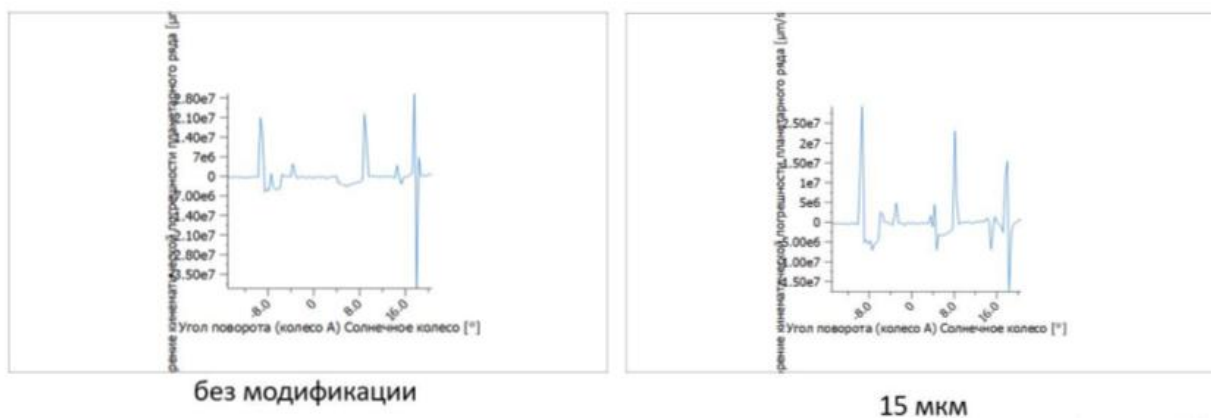


Рис. 9. Изменение ускорений кинематической погрешности

Fig. 9. Change in acceleration of kinematic error

*Бочкообразность.* В качестве первой продольной модификации для рассмотрения была выбрана – бочкообразность. Для всех зубчатых колес была задана одинаковая высота модификации. Ниже приведены результаты расчета (табл. 7). На рис. 10-12 приведены лучшие результаты и результаты расчета без модификации.

Таблица 7.  
Результаты расчетаTable 7.  
Calculation results

| Значение высоты модификации $h_g$ , мкм | Запас прочности ножки зуба |       |       | Запас прочности боковой поверхности зуба |       |       | Перекрытия, солнечное колесо – спутники | Перекрытия, спутники – эпицикл |
|---|----------------------------|-------|-------|--|-------|-------|---|--------------------------------|
|   | Сол.                       | Сат.  | Эп.   | Сол.                                     | Сат.  | Сол.  |   |                                |
| 0                                       | 5,004                      | 4,435 | 2,426 | 1,448                                    | 1,867 | 3,322 | 1,495/1,495                             | 2,095/2,095                    |
| 5                                       | 4,422                      | 4,029 | 2,204 | 1,340                                    | 1,726 | 3,009 | 1,495/1,495                             | 2,116/2,116                    |
| 15                                      | 3,608                      | 3,366 | 1,841 | 1,183                                    | 1,523 | 2,649 | 1,495/1,495                             | 2,149/2,149                    |
| 25                                      | 3,133                      | 2,922 | 1,598 | 1,089                                    | 1,402 | 2,440 | 1,516/1,516                             | 2,181/2,181                    |

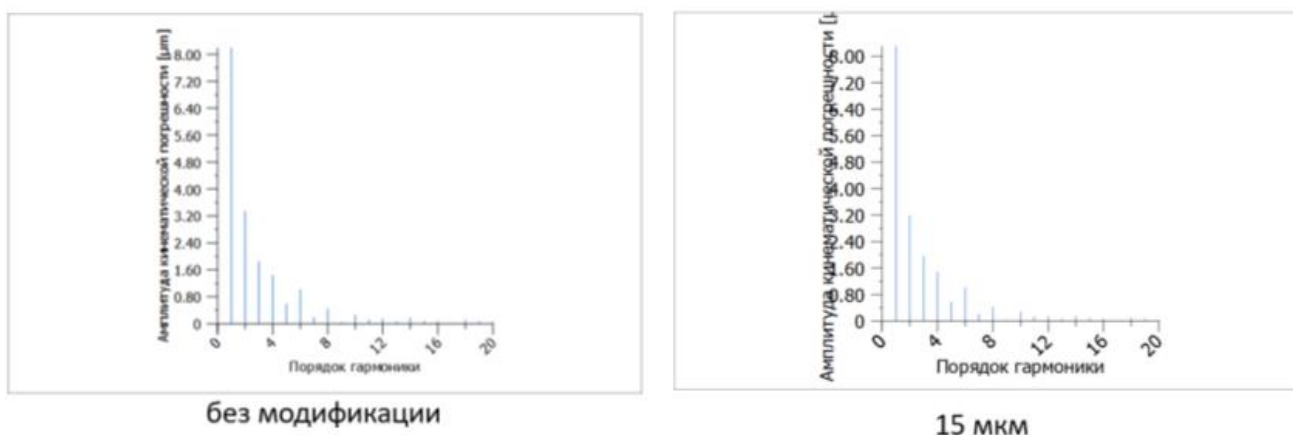


Рис. 10. Изменение амплитудного спектра кинематической погрешности

Fig. 10. Change in the amplitude spectrum of the kinematic error

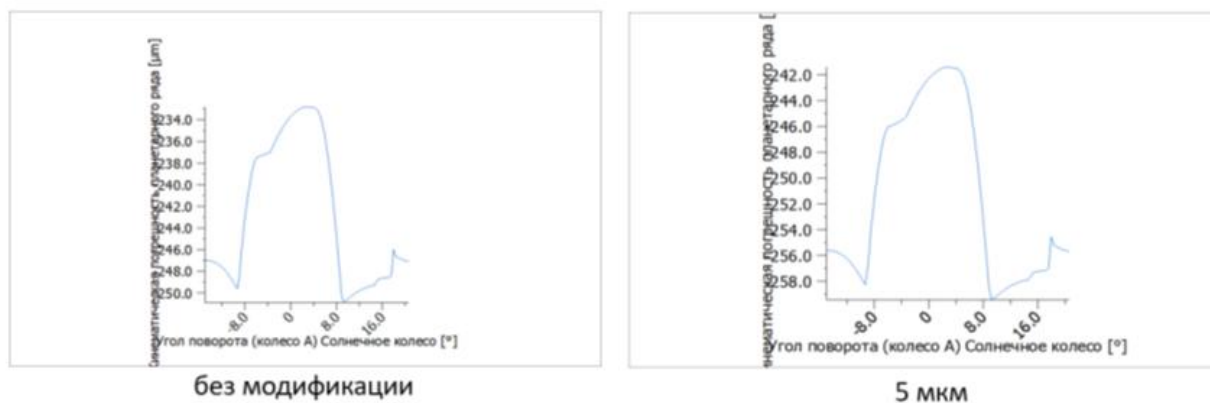


Рис. 11. Изменение кинематической погрешности

Fig. 11. Change in kinematic error

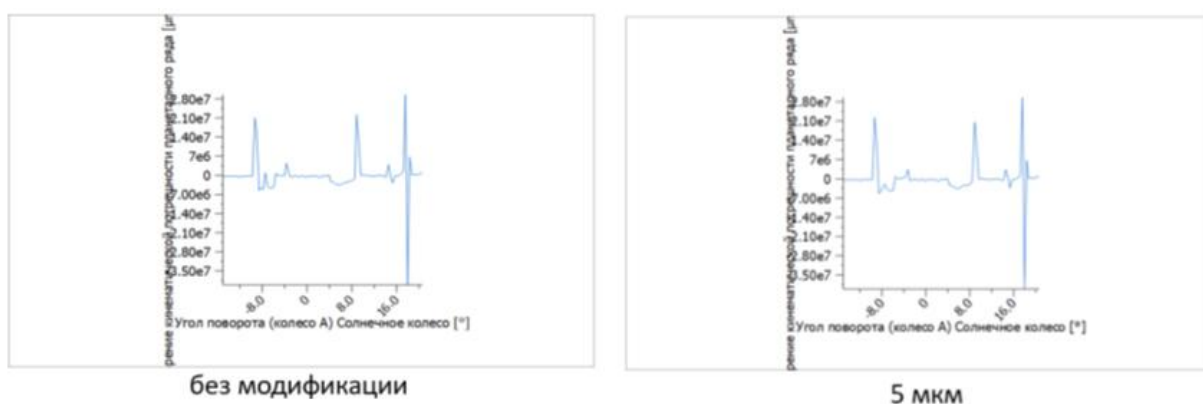


Рис. 12. Изменение ускорений кинематической погрешности

Fig. 12. Change in acceleration of kinematic error

*Твист.* В качестве следующей продольной модификации для рассмотрения была выбрана модификация под названием – твист. Для всех зубчатых колес была задана одинаковая толщина модификации. Ниже приведены результаты расчета (табл. 8). На рис. 13-15 приведены лучшие результаты и результаты расчета без модификации.

Таблица 8.  
Результаты расчета

Table 8.  
Calculation results

| Значение толщины модификации, мкм | Запас прочности ножки зуба |       |       | Запас прочности боковой поверхности зуба |       |       | Перекрытия, солнечное колесо – сателлиты | Перекрытия, сателлиты – эпицикл |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|-------|--|-------|-------|--|---------------------------------|
|                                   | Сол.                       | Сат.  | Эп.   | Сол.                                     | Сат.  | Сол.  |  |                                 |
| 0                                 | 5,004                      | 4,435 | 2,426 | 1,448                                    | 1,867 | 3,322 | 1,495/1,495                              | 2,095/2,095                     |
| 5                                 | 5,004                      | 4,435 | 2,426 | 1,448                                    | 1,867 | 3,322 | 1,495/1,495                              | 2,127/2, 127                    |
| 10                                | 5,004                      | 4,435 | 2,426 | 1,448                                    | 1,867 | 3,322 | 1,495/1,495                              | 2,106/2,106                     |
| 15                                | 5,004                      | 4,435 | 2,426 | 1,448                                    | 1,867 | 3,322 | 1,495/1,495                              | 2,106/2,106                     |



Рис. 13. Изменение амплитудного спектра кинематической погрешности

Fig. 13. Change in the amplitude spectrum of the kinematic error

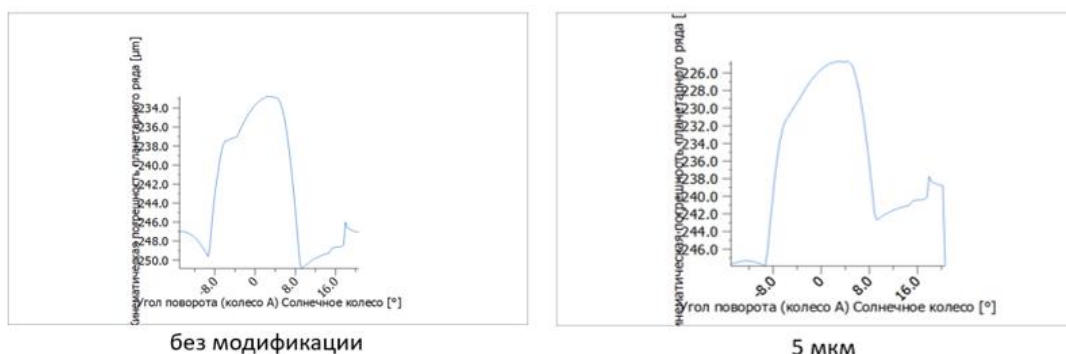


Рис. 14. Изменение кинематической погрешности

Fig. 14. Change in kinematic error

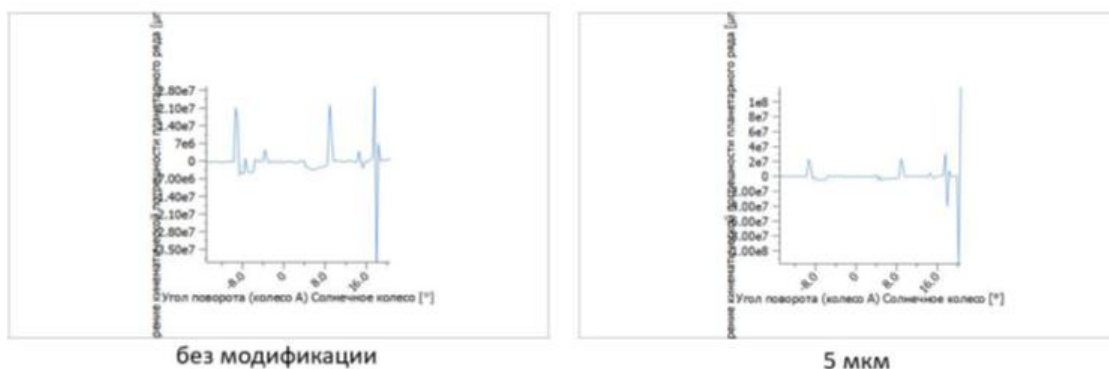


Рис. 15. Изменение ускорений кинематической погрешности

Fig. 15. Change in acceleration of kinematic error

### Выводы

Наибольшую эффективность с точки зрения уменьшения величин первых трех гармоник показала линейная модификация головки с переходным радиусом, показав снижение этих величин на 12,5 %. Теоретически это означает, что применение данной модификации может способствовать уменьшению шумности и вибронгруженности передачи.

Рост величин перекрытий в зубчатом зацеплении наблюдался только для модификации бочкообразность, для всех других рассмотренных в данной статье модификаций величины перекрытий уменьшались. Удалось достичь увеличения перекрытия зубьев на 4 %, что позволяет снизить ударные нагрузки и уменьшить зоны однопарного зацепления. При этом запасы прочности ножки и боковой поверхности зубьев значительно уменьшались на 35 и 25 % соответственно. Также наблюдался незначительный рост кинематической погрешности в пределах 3,3 %. С точки зрения увеличения запасов прочности ножки зуба эпицикла и сателлитов, наибольшее из всех значений было достигнуто при применении модификации *срез*

кромки зуба. Удалось достичь увеличения прочности ножки зуба эпицикла на 11,6 % и прочности ножки зуба сателлита 4,8 %.

Обоснованное введение продольных и профильных модификаций позволяет улучшить требуемые характеристики зубчатого зацепления, например, снизить шумность и/или повысить надежность зубчатых передач.

### Библиографический список

1. **Рязанцева, И.Л.** О профильной модификации тяжело нагруженных зубчатых колес / И.Л. Рязанцева // Омский научный вестник. – 2011. – С. 73-76.
2. **Генкин, М.Д.** Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач / М.Д. Генкин, М.А. Рыжов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 232 с.
3. **ISO 6336-1:2019(E).** Calculation of load capacity of spur and helical gears. Part 1: Basic principles, introduction. – 9 с.
4. **Гуляев, К.И.** Повышение работоспособности тяжело нагруженных цилиндрических прямозубых передач / К.И. Гуляев, Л.И. Рязанцева // Станки и инструмент. – 1986. – № 8. – С. 26-29.
5. **Михайлов, В.Л.** Экспериментальное исследование эффективности фланкирования при различных параметрах фланка / В.Л. Михайлов // Вопросы теории механизмов и машин. – Москва, 1958. – С. 11-13.
6. **Vivek, R.** Improving functional performance characteristics of spur gears through flank modifications by non-contact advanced finishing process / R. Vivek, K. Neelesh, P. Sunil // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol.124. Iss. 5. – P. 1787-1811.
7. **Сабоннадьер, Ж.К.** Метод конечных элементов и САПР / Ж.К. Сабоннадьер, Ж.Л. Кулон. – Москва: Мир, 1989. – 190 с.
8. Справочник KissSoft [Электронный ресурс]. – URL: [https:// www.kisssoft.com/ru](https://www.kisssoft.com/ru) (дата обращения: 10.10.2025).

### References

1. Ryazantseva I.L. O profil'noy modifikatsii tyazhelonagruzhennykh zubchatykh koles [On profile modification of heavily loaded gears]. Omskiy nauchnyy vestnik [Omsk Scientific Bulletin]. 2011:73-76. (in Russian).
2. Genkin M.D., Ryzhov M.A. Povysheniye nadezhnosti tyazhelonagruzhennykh zubchatykh peredach [Increasing the reliability of heavily loaded gear drives]. Moscow: Mashinostroenie; 1981. 232 p. (in Russian).
3. ISO 6336-1:2019(E). Calculation of load capacity of spur and helical gears. Part 1: Basic principles, introduction. 9 p.
4. Gulyaev K.I., Ryazantseva L.I. Povysheniye rabotosposobnosti tyazhelonagruzhennykh tsilindricheskikh pryamozubykh peredach [Increasing the performance of heavily loaded spur cylindrical gears]. Stanki i instrument [Machine Tools and Tools]. 1986;(8):26-29. (in Russian).
5. Mikhaylov V.L. Eksperimental'noye issledovaniye effektivnosti flankirovaniya pri razlichnykh parametrah flanka [Experimental study of the effectiveness of flanking under various flank parameters]. Voprosy teorii mekhanizmov i mashin [Problems of Theory of Mechanisms and Machines]. Moscow; 1958:11-13. (in Russian).
6. Vivek R., Neelesh K., Sunil P. Improving functional performance characteristics of spur gears through flank modifications by non-contact advanced finishing process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023;124(5):1787-1811.
7. Sabonnadiere J.K., Coulomb J.L. Metod konechnykh elementov i SAPR [Finite element method and CAD]. Moscow: Mir; 1989. 190 p. (in Russian).
8. Spravochnik KissSoft [KissSoft reference] [Internet]. Available from: [https:// www.kisssoft.com/ru](https://www.kisssoft.com/ru) [accessed 2025 Oct 10]. (in Russian).

**Дата поступления  
в редакцию: 22.10.2025**

**Дата принятия  
к публикации: 18.03.2026**

**РАБОЧЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ БУЛЬДОЗЕРА С УШИРИТЕЛЯМИ****А.Б. Летопольский**

ORCID: 0000-0003-3503-131X e-mail: Antooooon-85@mail.ru

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

Омск, Россия

**И.А. Тетерина**

ORCID: 0000-0001-8012-8511 e-mail: iateterina@mail.ru

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

Омск, Россия

Предложена новая конструкция рабочего органа бульдозера с уширителями, представлены ее общий вид и параметры. Приведены расчетные схемы для определения сопротивления копания грунта отвалом и для определения призмы волочения отвала с уширителями. Результаты теоретических исследований процесса копания грунта модернизированным бульдозерным оборудованием отражены в виде графических зависимостей. Выведены зависимости силы копания от ширины и высоты рабочего органа, толщины срезаемой стружки и категории грунта. Определена производительность и удельная энергоемкость бульдозера со стандартным и модернизированным рабочим оборудованием в зависимости от дальности транспортирования грунта.

**Ключевые слова:** строительно-дорожная машина; бульдозер; рабочий орган; отвал; разработка грунта; прокладка магистральных трубопроводов; земляные работы; полусферический отвал.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Летопольский, А.Б. Рабочее оборудование бульдозера с уширителями / А.Б. Летопольский, И.А. Тетерина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 2. С. 96-106. EDN XJCSIW

**BULLDOZER WORKING EQUIPMENT  
WITH WIDENING ATTACHMENTS****A.B. Letopolsky**

ORCID: 0000-0003-3503-131X e-mail: Antooooon-85@mail.ru

Siberian State Automobile and Highway University

Omsk, Russia

**I.A. Teterina**

ORCID: 0000-0001-8012-8511 e-mail: iateterina@mail.ru

Siberian State Automobile and Highway University

Omsk, Russia

**Abstract.** This article presents the design of a bulldozer working tool with widening attachments, including its general view and parameters. Calculation schemes are given for determining the soil digging resistance of a blade and for determining the drag prism of the blade with widening attachments. The results of theoretical studies of the process of soil digging using modernized bulldozer blade are reflected in the form of graphical dependencies. The dependences of digging force on the width and height of the working tool, the thickness of the cut chips and the soil category are derived. The productivity and specific energy consumption of a bulldozer with standard and modernized working tool were determined depending on the distance of soil transportation.

**Key words:** road construction machine; bulldozer; working tool; blade; soil development; laying of main pipelines; earthworks; hemispherical blade.

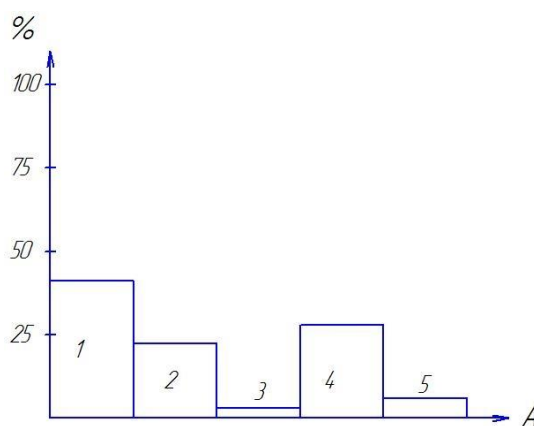
**FOR CITATION:** A.B. Letopolsky, I.A. Teterina. Bulldozer working equipment with widening attachments. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 2. Pp. 96-106. EDN XJCSIW

## Введение

Показателем научно-технического прогресса в области строительства является внедрение в производство принципиально новых, более мощных и производительных машин, работающих на основе современных технических эффектов. Но реализация технических решений, направленных на внедрение в серийное производство, при сегодняшней экономической конъюнктуре существенно замедлилась, поэтому необходимо на стадии проектирования просчитывать не только положительный эффект, но и стоимость как самой машины, так и ее рабочего оборудования [1]. Развитие эффективной землеройной техники идет по двум основным направлениям: совершенствование традиционных рабочих органов и машин, находящихся в эксплуатации, а также создание принципиально новых конструкций на основе последних достижений фундаментальной науки [2]. Машиностроение остро нуждается в такой строительной-дорожной технике для прокладки трубопроводов. Бульдозер считается одной из самых эффективных и универсальных машин землеройно-транспортного типа, способной выполнять задачи по срезке, планировке и перемещению грунта [3, 4].

На сегодняшний день в России при проведении земляных работ преимущественно задействованы бульдозеры импортного производства. Несмотря на их высокую эксплуатационную надежность, по своей конструкции они незначительно отличаются от отечественных аналогов. Для успешной реализации актуальной политики импортозамещения необходима разработка новых оригинальных конструкций, обладающих как новизной, так и высокой эффективностью при выполнении разнообразных земляных работ [5].

Функционал бульдозера, основной землеройно-транспортной машины, можно разделить на основные и вспомогательные операции. К основным относятся разработка, срезка и перемещение грунта, вскрышные работы на месторождениях и добыча полезных ископаемых открытым способом. Вспомогательные функции включают в себя выравнивание и планировку поверхностей, засыпку траншей и котлованов, строительство подъездных путей, а также расчистку территорий от пней, камней и валунов [6]. Общее время использования бульдозеров по видам работ [6] представлено на рис. 1.



**Рис. 1. Общее время использования бульдозера по видам работ:**

- 1 – разработка и перемещение грунта (41 %); 2 – снятие и перемещение растительного слоя (22 %);  
3 – перемещение скальных пород (3 %); 4 – очистка территорий (28 %);  
5 – устройство уступов, засыпка ям и траншей, планировочные работы (6 %)

**Fig. 1. Total bulldozer usage time by type of work:**

- 1 – soil development and movement (41 %); 2 – removal and movement of topsoil (22 %);  
3 – rock movement (3 %); 4 – site clearing (28 %);  
5 – bench construction, backfilling of pits and trenches, grading work (6 %)

Анализируя приведенную зависимость, можно сделать вывод, что на основных работах (копание и перемещение грунта) бульдозер занят 66 % от общего времени его использования. Учитывая, что работы, связанные с очисткой территории, тоже можно отнести к разработке

грунта, общее время использования бульдозера на копание грунта составит более 70 %. Известно, что бульдозеры способны перемещать грунт на расстояние до 150 м, однако анализ работы современных гусеничных бульдозеров показал, что экономически целесообразная дальность транспортирования составляет до 50 м. На рис. 2 изображена гистограмма зависимости распределения объемов бульдозерных работ от дальности перемещения грунта [7, 8].

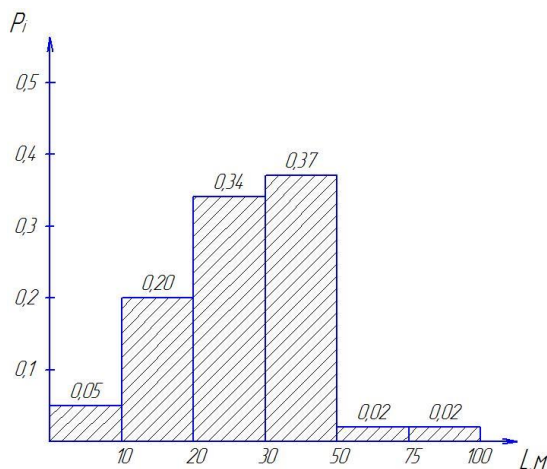


Рис. 2. Распределение объемов работ от дальности перемещения грунта бульдозером

Fig. 2. Distribution of work volumes by bulldozer movement distance

Анализ гистограммы дальности перемещения грунта бульдозером показал, что средняя дальность перемещения грунта  $L = 35$  м. Наиболее часто бульдозерное оборудование применяется на дальности от 20 до 50 м (рис. 2). Опыт эксплуатации на основных видах работ показал, что путь набора призмы грунта составляет 6-10 м при дальности транспортирования 26-44 м [6]. При сооружении линейной части трубопроводов выделяют два периода: подготовительный и основной. Бульдозер задействован в операциях, которые относятся подготовительному периоду (подготовка строительной полосы; устройство временных и постоянных дорог) [9].

Основной целью данной работы является разработка конструкции бульдозерного оборудования с целью повышения производительности и снижения энергоемкости процесса копания грунта.

### Теоретический анализ. Математическая модель процесса взаимодействия отвала с грунтом

Существующая методика определения сопротивления грунта копанью отвалом с затупленной режущей кромкой характерна для нового ножа отвала. В процессе копания возникают силы сопротивления, которые складываются из трех составляющих: силы резания, сопротивления перемещения бульдозера и сопротивление перемещению призмы волочения. Наибольшую величину сопротивления копанью имеет сила резания [10]. Расчетная схема (рис. 3) составлена для случая, при котором происходит окончание набора призмы волочения. Поскольку последняя уже сформирована перед рабочим органом, сила сопротивления движению грунта вверх по отвалу не учитывается. При использовании отвала сферического типа, имеющего боковые секции, необходимо учесть величину сопротивления косою резания при контакте с грунтом. Расчет базируется на теории предельного равновесия грунта.

Горизонтальная составляющая сопротивления лобовому копанью  $W_z$  определяется по формуле [11]:

$$W_z = E'_z + E''_z + (W_g + G_o) \cdot \mu_1 + W_{np} \quad (1)$$

где  $E'_z, E''_z$  – горизонтальная составляющая сопротивления сколу грунта гранями АВ и ВС соответственно, Н;  $G_o$  – сила тяжести отвала, Н;  $\mu_1$  – коэффициент трения ножа по грунту,



$$g_2 = g_1 + \frac{M_2 \cdot K_2 \cdot \gamma_e \cdot (h^2 - h_1^2)}{2 \cdot h_2 \cdot (\operatorname{ctg} \delta + \operatorname{ctg} \psi)} \quad (7)$$

где  $M_2 = \operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \varphi_1$ ;  $\psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_2}{2}$ .

Вертикальная составляющая сопротивления копанью:

$$W_g = E'_g + E''_g, \quad (8)$$

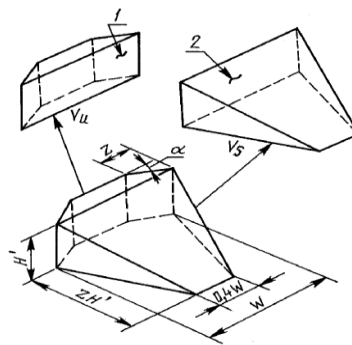
где  $E'_g, E''_g$  – вертикальные составляющие сопротивления сколу гранями  $AB$  и  $BC$ , Н.

$$E'_g = M_2 \cdot b \cdot \left[ K_2 \cdot \left( \frac{\gamma_e \cdot h_1^2}{2} + g_1 \cdot h_1 + C \cdot h_1 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_2 \right) - C \cdot h_1 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_2 \right], \quad (9)$$

$$E''_g = M_2 \cdot b \cdot \left[ K_2 \cdot \left( \frac{\gamma_e \cdot h_2^2}{2} + g_2 \cdot h_2 + C \cdot h_2 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_2 \right) - C \cdot h_2 \cdot \operatorname{ctg} \varphi_2 \right], \quad (10)$$

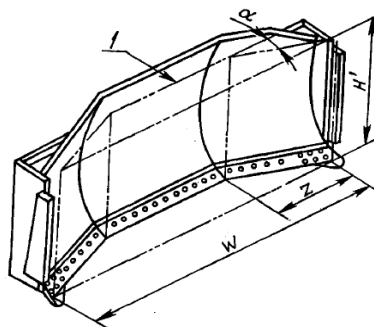
где  $M_2 = -\operatorname{tg} \varphi_1$ .

Согласно ГОСТ 29295-92 [12], объем призмы волочения для сферических отвалов определяется по формуле, отличающейся от неповоротного отвала. Эффективный контур сферического отвала изображен на рис. 3.



**Рис. 3. Призма волочения для сферического и полусферического отвала:**  
1 – контур полусферического и сферического отвалов; 2 – прямой и поворотный отвалы

**Fig. 3. Drag prism for spherical and hemispherical blades:**  
1 – outline of hemispherical and spherical blades; 2 – straight and rotary blades



**Рис. 5. Расчетная схема определения объема призмы волочения полусферического отвала**

**Fig. 5. Calculation scheme for determining the volume of a hemispherical dump drag prism**

Поскольку предложенная конструкция отвала с поворотными уширителями соответствует процессу копания грунта полусферическим отвалом, постольку на основании расчетной схемы (рис. 5) сопротивление перемещению призмы волочения имеет следующий вид [7, 11]:

$$W_{np} = b \cdot \gamma_2 \cdot \cos^2 \varphi_2 \cdot \frac{(H-h)^2}{2} \cdot Z \cdot H_1 \cdot (b-Z) \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (11)$$

где  $H_1$  – высота боковых секций, м;  $Z$  – ширина уширителя измеряемая параллельно длине отвала, м;  $\alpha$  – угол поворота уширителя, м.

При расчете горизонтальной составляющей сопротивления копанию учитывается знак при  $W_e$ , а также передается вес отвала на грунт или ходовую часть машины.

Для определения суммарной силы сопротивления копанию рабочего органа в режиме закрытых уширителей математическая модель остается прежней за исключением силы  $W_{np}$  которая рассчитывается по формуле 11 без учета правой стороны после знака «+» [13]:

$$W_{np} = b \cdot \gamma_2 \cdot \cos^2 \varphi_2 \cdot \frac{(H-h)^2}{2}. \quad (12)$$

К основным параметрам предлагаемой конструкции относятся ширина рабочего органа ( $b$ ) и уширителей ( $Z$ ), высота основного отвала ( $H$ ) и уширителя ( $H_1$ ) (рис. 6).

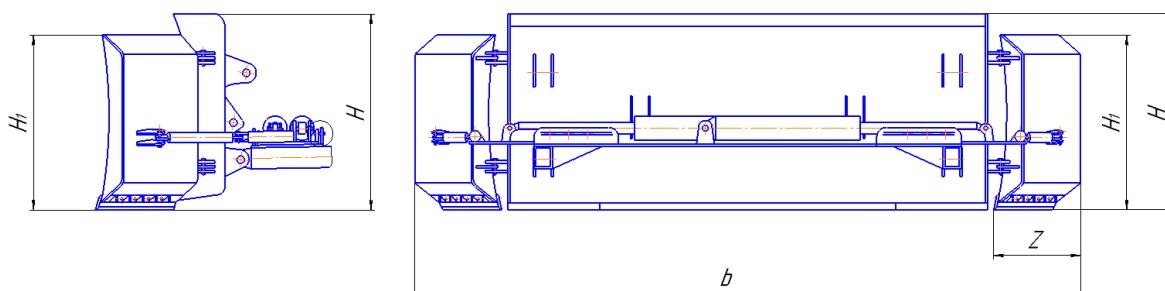


Рис. 6. Параметры предлагаемой конструкции рабочего органа

Fig. 6. Parameters of the proposed design of the working element

### Результаты теоретических исследований

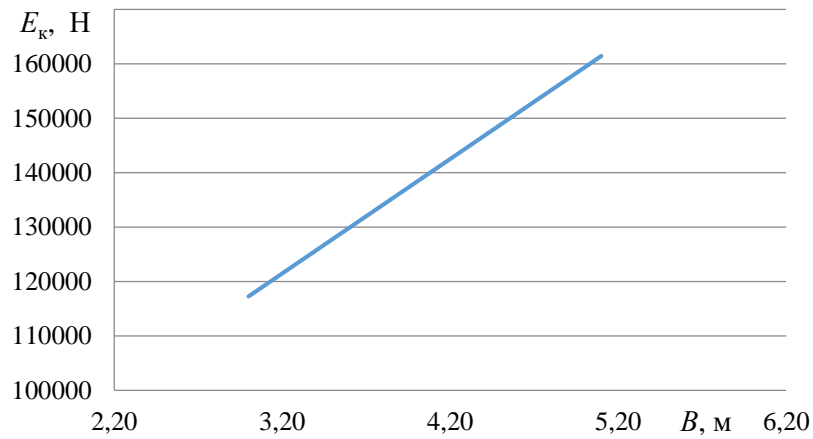
Минимальная ширина рабочего органа определяется, исходя из ширины базовой машины, с учетом минимального перекрытия габарита по формуле:

$$B = B_m + 2\delta, \quad (13)$$

где  $B_m$  – ширина трактора, м;  $\delta$  – перекрытие габарита базовой машины, м.

На рис. 7 представлена зависимость силы копания от ширины отвала бульдозера. График зависимости силы копания от высоты рабочего органа приведен для суглинка, с шириной рабочего органа равной 4,5 м (открытые боковые уширители) и срезании стружки толщиной 7 см.

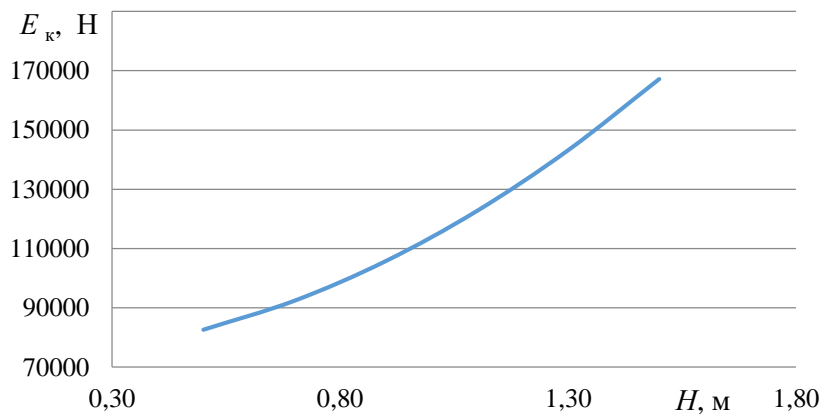
Силы сопротивления копанию, возникающие при работе бульдозера, в значительной степени зависят от толщины срезаемой стружки. График зависимости силы копания от толщины срезаемой стружки приведен при копании суглинка, с шириной рабочего органа равной 4,5 м и высоте 1,35 м представлен на рис. 9. На рис. 10 представлена зависимость силы копания от категории грунта. Рассматривается работа бульдозера в режиме открытых боковых уширителей.



**Рис. 7. График зависимости силы копания от ширины рабочего органа**

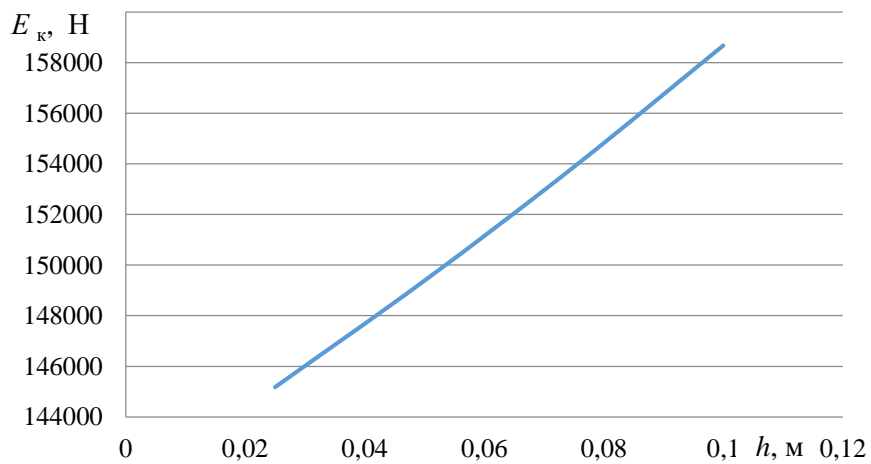
**Fig. 7. Graph of digging force versus working tool width**

При этом расчет производится при открытых боковых уширителях (рис. 8).



**Рис. 8. График зависимости силы копания от высоты рабочего органа**

**Fig. 8. Graph of digging force versus working tool height**



**Рис. 9. График зависимости силы копания от толщины срезаемой стружки**

**Fig. 9. Graph of digging force versus chip thickness**

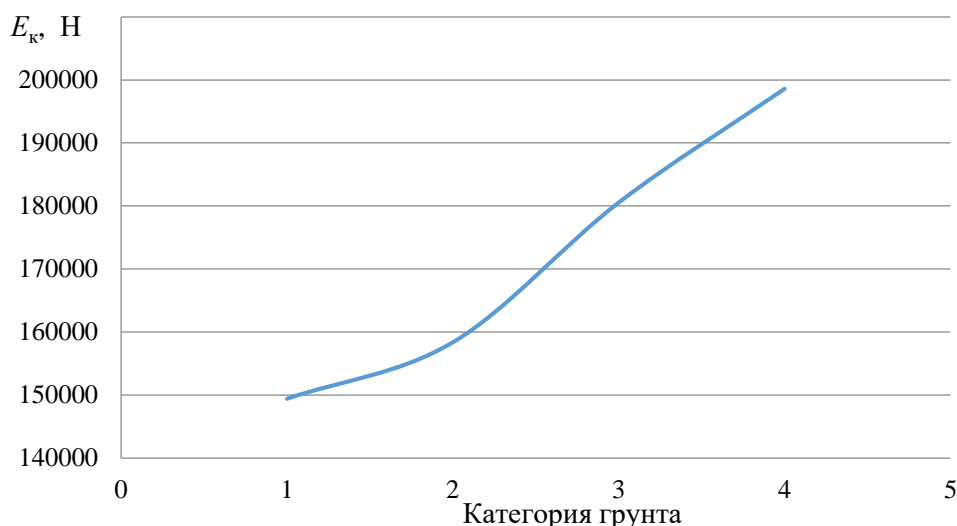


Рис. 10. График зависимости силы копания от категории грунта

Fig. 10. Graph of digging force versus soil category

Проведен сравнительный анализ работы бульдозерного оборудования основным отвалом и с дополнительной отвальной поверхностью. Производительность при использовании основного отвала и дополнительной отвальной поверхности определяется [2, 13]:

$$P = \frac{3600 \cdot (V_c + V_{ш}) \cdot K_y \cdot K_c}{T_{ц}}, \quad (14)$$

где  $V_c$  – объем грунт, срезаемый боковыми секциями,  $\text{м}^3$ ;  $V_{ш}$  – объем грунта, расположенный на основном отвале,  $\text{м}^3$ ;  $T_{ц}$  – длительность рабочего цикла бульдозера, с;  $K_y$  – коэффициент, учитывающий влияние величины уклона на производительность;  $K_c$  – коэффициент, учитывающий потери грунта при транспортировании.

На основании приведенных формул на рис. 11 представлен график зависимости производительности бульдозерного оборудования от дальности транспортирования грунта при работе традиционного и инновационного отвалов.

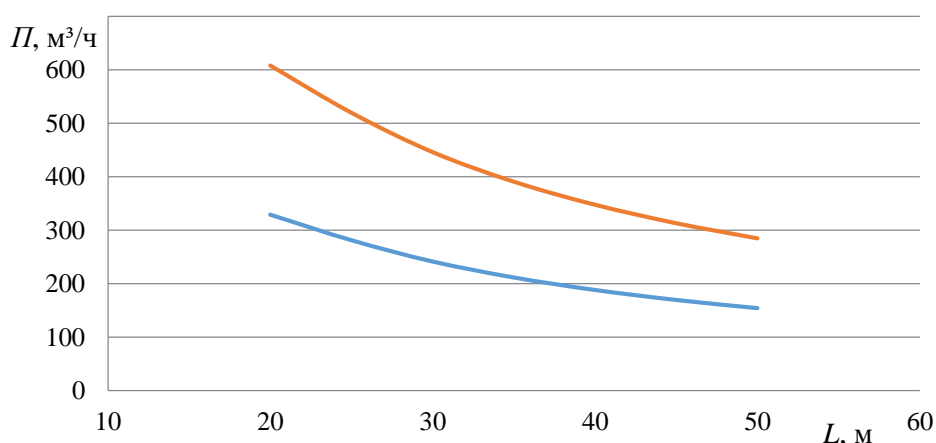


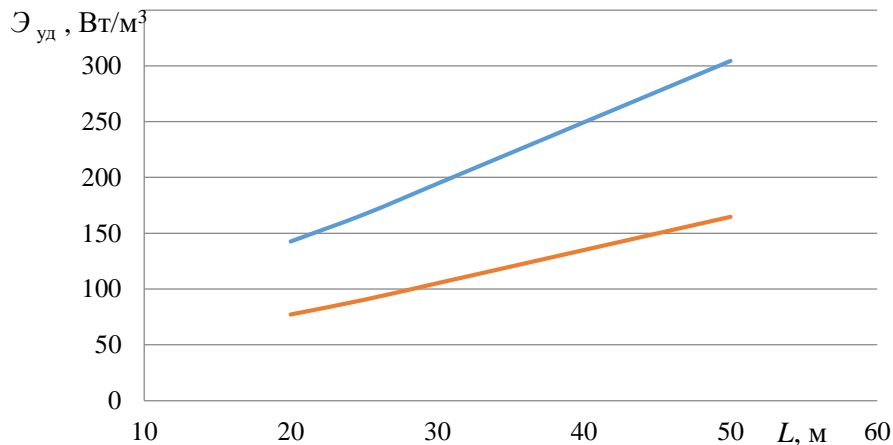
Рис. 11. График зависимости производительности бульдозера от дальности транспортирования грунта:

1 – работа обычным неповоротным отвалом; 2 – работа отвалом, оснащенным уширителями

Fig. 11. Graph of bulldozer performance versus soil hauling distance:

1 – working with a standard fixed blade; 2 – work with a blade equipped with additional sections

Согласно рис. 12, энергоемкость процесса копания грунта с использованием дополнительных отвальных поверхностей (уширителей) снижается на 45 % по сравнению с работой выполняемой основным отвалом.

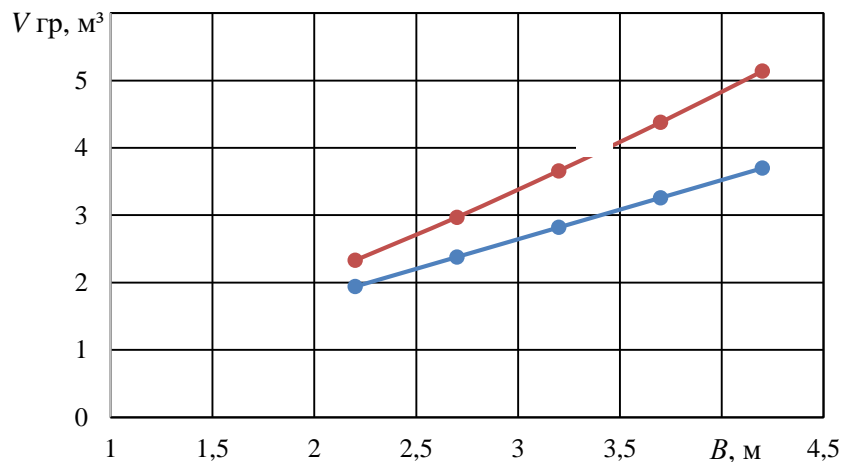


**Рис. 12. График зависимости удельной энергоемкости от дальности транспортирования грунта:**  
 1 – работа обычным неповоротным отвалом; 2 – работа отвалом оснащенным уширителями

**Fig. 12. Graph of specific energy capacity versus soil hauling distance:**

1 – working with a standard fixed blade; 2 – work with a blade equipped with additional sections

Поскольку предлагаемая конструкция может работать в двух режимах: с открытыми и закрытыми боковыми уширителями, рационально определить объем перемещаемого грунта для каждого режима в зависимости от ширины рабочего органа (рис. 13).



**Рис. 13. График зависимости объема перемещаемого грунта от ширины рабочего органа:**

1 – работа в режиме открытых уширителей; 2 – работа в режиме закрытых уширителей

**Fig. 13. Graph of the volume of soil moved versus the width of the working element:**

1 – operation with open additional sections; 2 – operation with closed additional sections

### Заключение

Результаты исследований предлагаемой конструкции бульдозерного оборудования показывают, что использование дополнительных управляемых элементов на отвале повышает производительность до 45 %. Конструкция также позволяет добиться увеличения объемов перемещаемого грунта без его потери. Рост показателя достигает 30 %.

## Библиографический список

1. Демиденко, А.И. Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины / А.И. Демиденко, А.Б. Летопольский, Д.С. Семкин. – Омск: СибАДИ, 2016. – 393 с.
2. Баловнев, В.И. Бульдозеры / В.И. Баловнев, Р.Г. Данилов // Строительные и дорожные машины. – 2021. – № 6. – С. 9-18.
3. Летопольский, А.Б. Рабочее оборудование экскаватора для выборочного ремонта трубопровода / А.Б. Летопольский, П.А. Корчагин, И.А. Тетерина // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2021. – № 11 (108). – С. 10-16. – DOI: 10.30987/1999-8775-2021-11-66-72.
4. Летопольский, А.Б. Расчет параметров при бестраншейной прокладке газопровода методом ГНБ / А.Б. Летопольский, А.И. Демиденко, И.А. Тетерина // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Сборник материалов V Национальной научно-практической конференции. – Омск, 2022. С. 13-16.
5. Лесковец, И.В. Оптимизация параметров профиля отвала бульдозера по критерию минимизации сил сопротивления копанью / И.В. Лесковец, А.В. Лапицкий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 9. – С. 683-689. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-9-683-684
6. Шагиахметова, Э.И. Техничко-экономические показатели бульдозера с поворотным отвалом / Э.И. Шагиахметова, И.Х. Галиев, М.И. Шагиахметова // Строительные конструкции, здания и сооружения. – 2024. – № 4 (9). – С. 54-61.
7. Артемьев, К.А. Дорожные машины. Часть 2. Машины для устройства дорожных покрытий / К.А. Артемьев, Т.В. Алексеева, В.Г. Белокрылов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1982. – 396 с.
8. Цупиков, С. Г. Машины для строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог / С.Г. Цупиков, Н.С. Казачек. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2018. – 184 с.
9. Баловнев, В.И. Дорожно-строительные машины и комплексы / В.И. Баловнев, А.Б. Ермилов, А.Н. Новиков [и др.]. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.
10. Аукенова, Б.К. Исследование рабочего процесса бульдозерного отвала с изменяемой геометрией / Б.К. Аукенова, Р.Л. Раденков, А.Г. Савельев [и др.]. // Труды университета. – 2023. – № 2 (91). – С. 67-73. DOI: 10.52209/1609-1825\_2023\_2\_67
11. Баловнев, В.И. Интенсификация разработки грунтов в дорожном строительстве: научное издание / В.И. Баловнев, Л.А. Хмара. – М.: Транспорт, 1993. – 383 с.
12. ГОСТ 29295-92. Машины землеройные, бульдозерные отвалы к гусеничным и колесным тракторам. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 7 с.
13. Болдовская, Т.Е. Обоснование рациональной формы поперечного профиля неповоротного отвала бульдозера. Дисс... канд. тех. наук.05.05.04. – Омск: СибАДИ, 2006. – 159 с.

## References

1. Demidenko A.I., Letopol'skiy A.B., Semkin D.S. Dorozhnye, stroitel'nye i pod'emno-transportnye mashiny: uchebnoe posobie [Road, construction and handling machinery: a textbook]. Omsk: SibADI; 2016. 393 p. (in Russian).
2. Balovnev V.I., Danilov R.G. Bul'dozery [Bulldozers]. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny [Construction and Road Building Machinery]. 2021;(6):9-18. (in Russian).
3. Letopol'skiy A.B., Korchagin P.A., Teterina I.A. Rabochee oborudovanie ekskavatora dlya vyborochnogo remonta truboprovoda [Excavator attachment for selective pipeline repair]. Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Bryansk State Technical University]. 2021;(11(108)):10-16. doi: 10.30987/1999-8775-2021-11-66-72. (in Russian).
4. Letopol'skiy A.B., Demidenko A.I., Teterina I.A. Raschet parametrov pri bestransheyroy prokladke gazoprovoda metodom GNB [Calculation of parameters for trenchless gas pipeline laying using HDD method]. In: Obrazovanie. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo. Sbornik materialov V Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Education. Transport. Innovations. Construction. Proceedings of the V National scientific-practical conference]. Omsk; 2022. p. 13-16. (in Russian).
5. Leskovets I.V., Lapitskiy A.V. Optimizatsiya parametrov profilya otvala bul'dozera po kriteriyu minimizatsii sil soprotivleniya kopaniyu [Optimization of bulldozer blade profile parameters based on the criterion of minimizing digging resistance forces]. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta.

- Tekhnicheskie nauki [News of Tula State University. Technical sciences]. 2024;(9):683-689. doi: 10.24412/2071-6168-2024-9-683-684. (in Russian).
6. Shagiakhmetova E.I., Galiev I.Kh., Shagiakhmetova M.I. Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli bul'dozera s povorotnym otvalom [Technical and economic indicators of a bulldozer with a tilt blade]. Stroitel'nye konstruksii, zdaniya i sooruzheniya [Building structures, buildings and facilities]. 2024;(4(9)):54-61. (in Russian).
  7. Artem'ev K.A., Alekseeva T.V., Belokrylov V.G., et al. Dorozhnye mashiny. Chast' 2. Mashiny dlya ustroystva dorozhnykh pokrytiy [Road machines. Part 2. Machines for road pavement construction]. Moscow: Mashinostroenie; 1982. 396 p. (in Russian).
  8. Tsupikov S.G., Kazachek N.S. Mashiny dlya stroitel'stva, remonta i sodержaniya avtomobil'nykh dorog [Machines for construction, repair and maintenance of highways]. Vologda: Infra-Inzheneriya; 2018. 184 p. (in Russian).
  9. Balovnev V.I., Ermilov A.B., Novikov A.N., et al. Dorozhno-stroitel'nye mashiny i komplekсы: uchebnyk dlya vuzov po spets. «Stroitel'nye, dorozhnye mashiny i oborudovanie» [Road construction machinery and complexes: a textbook for universities in the specialty «Construction and road machinery and equipment»]. Balovnev V.I., editor. Moscow: Mashinostroenie; 1988. 384 p. (in Russian).
  10. Aukenova B.K., Radenkov R.L., Savel'ev A.G., et al. Issledovanie rabocheho protsessа bul'dozernogo otvalа s izmenyaemoy geometriey [Study of the working process of a bulldozer blade with variable geometry]. Trudy universiteta [Proceedings of the University]. 2023;(2(91)):67-73. doi: 10.52209/1609-1825\_2023\_2\_67. (in Russian).
  11. Balovnev V.I., Khmara L.A. Intensifikatsiya razrabotki gruntov v dorozhnom stroitel'stve: nauchnoe izdanie [Intensification of soil excavation in road construction: a scientific publication]. Moscow: Transport; 1993. 383 p. (in Russian).
  12. GOST 29295-92. Mashiny zemleroynye, bul'dozernye otvaly k gusenichnym i kolesnym traktorам [Earth-moving machinery, bulldozer blades for crawler and wheel tractors]. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1992. 7 p. (in Russian).
  13. Boldovskaya T.E. Obosnovanie ratsional'noy formy poperechnogo profilyа neporotnogo otvalа bul'dozera [Substantiation of the rational cross-sectional shape of a fixed bulldozer blade] [dissertation]. Omsk: SibADI; 2006. 159 p. (in Russian).

**Дата поступления  
в редакцию: 29.09.2025**

**Дата принятия  
к публикации: 18.04.2026**

УДК 629.3.027

EDN JMNMHN

## К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА УПРАВЛЯЕМОСТЬ В ЭКСПЕРТНОЙ ПРАКТИКЕ

**С.Е. Манянин**ORCID: 0009-0003-0245-0638 e-mail: [sergmanian@yandex.ru](mailto:sergmanian@yandex.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***Ю.И. Молев**ORCID: 0000-0002-0429-4590 e-mail: [moleff@yandex.ru](mailto:moleff@yandex.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***Д.Н. Прошин**ORCID: 0000-0002-8620-157X e-mail: [proshdn@mail.ru](mailto:proshdn@mail.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***Н.И. Чакров**ORCID: 0009-0006-1522-1879 e-mail: [chakrov\\_ni@mail.ru](mailto:chakrov_ni@mail.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Представлены результаты анализа экспертной практики при рассмотрении причин возникновения ДТП. Выявлено различие в методиках разбора возникновения и развития дорожных инцидентов. Предложено оценивать техническую возможность избежать ДТП при помощи маневра перестроения. Единственный методологический подход основан на анализе предотвращения аварии методом торможения: разделения технической возможности автомобиля выполнить требуемый маневр и психофизических возможностей водителя обеспечить необходимые управляющие воздействия. Результаты позволяют обозначить наиболее эффективные пути повышения безопасности движения и повысить точность экспертных исследований.

**Ключевые слова:** управляемость автомобилей; экспертиза дорожно-транспортных происшествий; маневр перестроения; предотвращение аварии; метод торможения; безопасность дорожного движения.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Манянин, С.Е. К вопросу применения результатов испытаний транспортных средств на управляемость в экспертной практике / С.Е. Манянин, Ю.И. Молев, Д.Н. Прошин, Н.И. Чакров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 2. С. 107-116. EDN JMNMHN

## ON THE APPLICATION OF VEHICLE HANDLING TEST RESULTS IN EXPERT PRACTICE

**S.E. Manyanin**ORCID: 0009-0003-0245-0638 e-mail: [sergmanian@yandex.ru](mailto:sergmanian@yandex.ru)Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Yu.I. Molev**

ORCID: **0000-0002-0429-4590** e-mail: **moleff@yandex.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**D.N. Prohin**

ORCID: **0000-0002-8620-157X** e-mail: **proshdn@mail.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**N.I. Chakrov**

ORCID: **0009-0006-1522-1879** e-mail: **chakrov\_ni@mail.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The article presents the results of an analysis of expert practice when considering the causes of a road accident. A difference in methods for analyzing the occurrence and development of road accident was revealed. It is proposed to evaluate the technical possibility of avoiding an accident using a lane change maneuver. The only methodological approach is based on the analysis of accident prevention using braking method: separating the technical capability of the vehicle to perform the required maneuver and the psychophysical capabilities of the driver to provide the necessary control actions. The results make it possible to identify the most effective ways to improve traffic safety and improve the accuracy of expert research.

**Key words:** car handling; road accident expertise; lane change maneuver; accident prevention; braking method; road safety.

**FOR CITATION:** S.E. Manyanin, Yu.I. Molev, D.N. Prohin, N.I. Chakrov. On the application of vehicle handling test results in expert practice. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 2. Pp. C. 107-116. EDN JMNMHN

**Введение**

Проблема аварийности на автомобильном транспорте во всех странах мира продолжает оставаться актуальной. Правительства и общественные организации прилагают серьезные усилия для ее решения. По данным Всемирной Организации Здравоохранения [1], в странах Европейского Союза смертность от ДТП за последние два десятилетия снизилась более чем в пять раз, в России – в два раза. Немалую роль в этом процессе сыграло совершенствование конструкций транспортных средств (ТС) и обеспечение их безопасного функционирования [2]. Минимально допустимые требования к показателям ТС, влияющим на безопасность дорожного движения, закреплены в международных (Правила ЕЭЕ ООН, Глобальные Технические Правила), межгосударственных (Технический регламент таможенного союза) и в национальных (ГОСТы, ОСТы) нормативных документах [3-5].

Одним из основных путей совершенствования требований к конструкции автомобилей является обработка экспериментальных данных по влиянию конструктивных параметров на их аварийность. В первую очередь, это относилось к тормозным системам автомобилей [6, 7]. В работах С.Г. Зубрицкого и К.А. Кириллова [8, 9] было проанализировано влияние на эффективность работы тормозов изменение положения центра масс автомобиля. Полученные данные позволили разработать методику определения технической возможности избежать столкновения в зависимости от конкретных условий возникновения аварийной ситуации [10, 11]. При этом отдельно рассчитывался тормозной путь автомобиля, позволяющий определить техническую возможность ТС прекратить движение, и остановочный путь, характеризующий психофизические параметры водителя методом учета времени реакции. Данный метод, несмотря на ряд недостатков, связанных с усреднением в расчетах параметров, в целом позволяет адекватно проводить анализ развития аварийной ситуации при экстренном торможении.

Значительное количество ДТП возникает при маневрировании автомобилей, что делает необходимой оценку действиям водителей и в таких ситуациях. Однако единый методологический подход к решению указанной проблемы отсутствует. В тех же работах В.А. Иларионова и Ю.Б. Суворова [10, 11] в основу решения о возможности отклонения автомобиля от заданной траектории движения положены зависимости, основанные на предположении, что при контраварийном маневрировании не происходит сноса ни одной из осей (центробежная сила меньше силы сцепления колеса с дорогой). Данный подход противоречит результатам экспериментальных исследований [12], согласно которым при проведении испытаний на управляемость движение ТС происходит со значительным (до 15-20°) уводом колес.

Вторая часть поставленной задачи, а именно оценка действий водителей при выполнении маневров, в настоящее время вообще не нашла отражения в научной литературе. Распространение показателей времени реакции водителей на возникшую опасную ситуацию данных, разработанных для случая торможения, что практикуется рядом экспертов, является ошибочным, как минимум, из-за того, что одним из составляющих частей данного процесса является его моторная часть, связанная, в том числе, с переносом ноги на педаль тормоза. Это отсутствует в процессе маневрирования, так как руки водителя уже находятся на рулевом колесе. Необходимо также отметить, что в отличие от торможения, кроме реакции, от водителя требуется постоянный контроль траектории движения ТС для возвращения его в первоначальное направление движения. Простое отклонение направления движения в большинстве случаев приводит к выезду ТС за пределы проезжей части дороги и совершение столкновения уже с объектами дорожной обстановки (рис. 1).



**Рис. 1. Типичная траектория движения перед ДТП автомобиля, водитель которого не справился с управлением (при наличии времени реакции на начало выполнения маневра)**  
**Fig. 1. A typical trajectory before an accident of a vehicle whose driver has lost control (given the time to react to the start of the maneuver)**

Таким образом, специфика проведения экспериментальных исследований требует единого методологического подхода к анализу технической возможности водителя избежать ДТП методом объезда препятствия. Он должен включать два раздела:

1) анализ технической возможности автомобиля двигаться по заданной траектории, основанный на результатах экспериментальных исследований, в том числе, при проведении сертификационных испытаний;

2) статистическое обобщение возможностей действий водителей, включая не только время реакции, но и способность контролировать движение автомобиля при резком контраварийном маневре.

### Методы

В общем виде возможность избежать столкновения может быть оценено на основе возможности автомобиля отклониться от прямолинейного движения на величину  $B$  при начале маневра на расстоянии  $S$  от препятствия при движении со скоростью  $V$ . При этом необходимый радиус кривизны траектории может быть определен как [13]:

$$R = \frac{S^2}{4B}$$

а действующее на автомобиль боковое ускорение как:

$$a = \frac{4BV^2}{S^2}$$

При этом максимально возможная величина бокового ускорения, при которой автомобиль продолжает удерживаться на траектории, может быть найдена из условий Глобальных Технических Правил № 8 [13]:

$$\begin{aligned} \Delta S = 2,037 \left(1 - \frac{a}{1,5g}\right) = 0,207 &\rightarrow \frac{2,037}{0,207} - \frac{2,037}{0,207} \frac{a}{1,5g} = 1 \\ 9,84 = 1 + 9,84 \frac{a}{1,5g} &\rightarrow 9,84 - 1 = 9,84 \frac{a}{1,5g} \rightarrow a = 1,5g \left(\frac{9,84 - 1}{9,84}\right) \\ a = 1,5g \left(1 - \frac{1}{9,84}\right) &= 1,35g, \end{aligned} \quad (3)$$

где 2,037 м – суммарное отклонение траектории от прямолинейной при идеализированной траектории в виде движения материальной точки с заданным управляющим воздействием, 1,5 g – идеализированное боковое ускорение, создаваемое управляющим воздействием, 0,207 – допустимая разница между отклонением реальной траекторией движения автомобиля от идеализированной.

Тогда допустимая величина возможных отклонений движения при контраварийном маневре в зависимости от скорости движения может быть определена из уравнения [13]:

$$a < 1,35g \rightarrow B < \frac{1,35gS^2}{4V^2} \quad (4)$$

В графическом виде приведенная зависимость показана на рис. 2.

Для ТС категории М2 с длиной от 8 до 12 м и ТС категории N1 и N2 допустимое отклонение в траектории движения составляет 0,37 м, что соответствует боковому ускорению, равному:

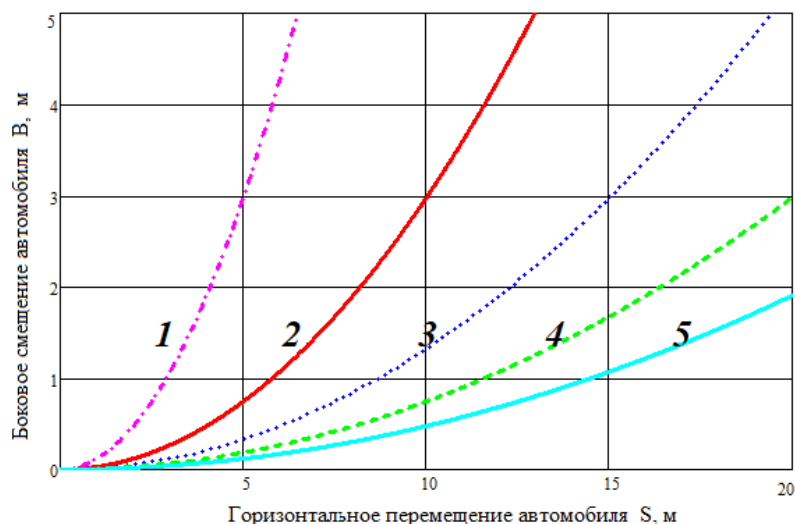
$$a = 1,5g \left(1 - \frac{1}{5,5}\right) = 1,32g \quad (6)$$

Для ТС категории М3 допустимое отклонение в траектории движения составляет 0,6 м, что соответствует боковому ускорению, равному:

$$a = 1,5g \left(1 - \frac{1}{3,3}\right) = 1,2g \quad (7)$$

Для ТС категории N3 допустимое отклонение в траектории движения составляет 0,72 м, что соответствует боковому ускорению, равному:

$$a = 1,5g \left(1 - \frac{1}{2,8}\right) = 1,14g \quad (8)$$



**Рис. 2. Зависимость максимально возможного бокового смещения автомобиля от расстояния, за которое следует выполнить рассматриваемый маневр:**

1 – для скорости движения 20 км/ч; 2 – для скорости движения 40 км/ч; 3 – для скорости движения 60 км/ч; 4 – для скорости движения 80 км/ч; 5 – для скорости движения 100 км/ч

**Fig. 2. Dependence of the maximum possible lateral displacement of the vehicle on the distance over which the maneuver in question must be performed:**

1 – speed of 20 km/h; 2 – speed of 40 km/h; 3 – speed of 60 km/h; 4 – speed of 80 km/h; 5 – speed of 100 km/h

Автомобиль при воздействии на рулевое управление не имеет технической возможности сразу изменить направление движения. Задержка, обусловленная инерционностью системы, в теории систем носит название переходного процесса. Математический аппарат отыскания данной зависимости подробно описан в [14], где установлено наличие зависимости длительности переходного процесса от длины ТС. Управляемость автомобилей при выполнении маневра «переставка» оценивается скоростью движения автомобиля, при которой он за 20 м способен перестроится в соседнюю полосу движения. Для автомобилей категории М1 данная величина должна быть не менее 83 км/ч. Соседней полосой считается положение, отстоящее от начального направления движения на ширину автомобиля и на безопасный боковой интервал, величина которого установлена равной 0,25 м. Считая, что ширина легкового автомобиля составляет 1,75 м, принимаем общую расчетную величину смещения, равную 2 м. Тогда, исходя из уравнения (4), может быть получено расстояние, которое требуется для совершения данного маневра:

$$S < \sqrt{\frac{B4V^2}{\eta g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4 \cdot (23,0555)^2}{1,35 \cdot 9,8}} = 17,92 \text{ м}, \quad (9)$$

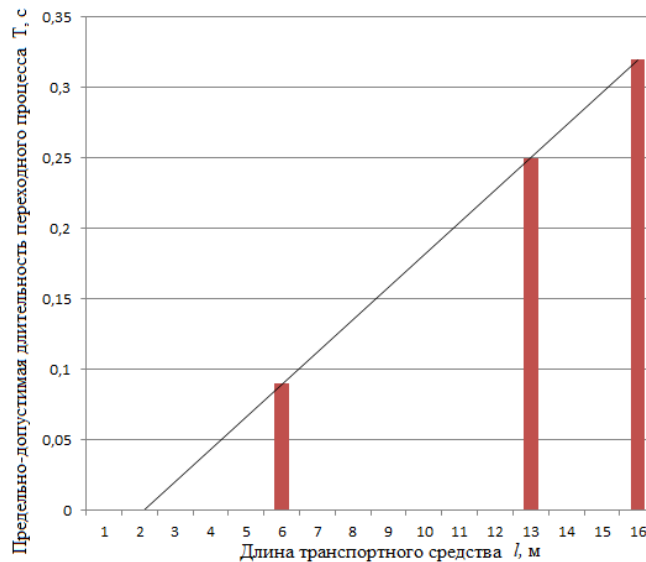
где 23,0555 – скорость 83 км/ч, приведенная к размерности м/с.

Полученный результат свидетельствует о наличии запаса по расстоянию для выполнения маневра «переставка», равного  $20,0 - 17,92 = 2,08$  м.  $\eta$  – коэффициент снижения бокового ускорения при отклонении автомобиля от идеализированной траектории, равный 1,35 для автомобилей категории М1, и ТС категории М2 с длиной до 8 м, 1,32 для ТС категории М2 с длиной от 8 до 12 м и ТС категории N1 и N2, 1,2 для ТС категории М3 и 1,14 для ТС категории N3. На скорости 83 км/ч (23,0555с) это расстояние проходится за  $2,08/23,055 = 0,09$  с, что говорит о том, что суммарная длительность всех переходных процессов для легковых автомобилей при маневрировании не должна быть больше 0,09 с.

Для ТС категории М2 длиной до 8 м, перестроение которых должно осуществляться на скорости не менее 71 км/ч (19,72 м/с) на величину 2,25 м, расстояние, требуемое для данного

маневра, составит 15,8 м, что дает предельную длительность переходных процессов 0,212 с. Для ТС категорий N и M длиной до 12 м, перестроение которых должно осуществляться на скорости не менее 63 км/ч (17,5 м/с) на величину 2,75 м, расстояние, требуемое для данного маневра, составит 16,13 м, что дает предельную длительность переходного процесса 0,22 с. Для ТС категории M длиной до 15 м, перестроение которых должно осуществляться на скорости не менее 56 км/ч (15,55 м/с) на величину 2,75 м, расстояние, требуемое для данного маневра, составит 15 м, что дает предельную длительность переходного процесса 0,319 с.

Зависимость между длительностью переходного процесса и длиной ТС в графическом виде приведена на рис. 3.



**Рис. 3. Соотношение между длиной транспортного средства и предельно допустимой длительностью переходного процесса в рулевом управлении**

**Fig. 3. The relationship between the length of the vehicle and the maximum permissible duration of the transient process in the steering control**

Полученное соотношение со 100 % точностью может быть аппроксимировано уравнением:

$$T = 0,023 L + 0,048 \quad (10)$$

Экспериментальные данные по изменению параметров управляемости автомобилей на дорогах со скользким покрытием приведены в работах [15, 16]. Согласно полученным результатам, скорость поворота автомобиля при первом управляющем воздействии не отличается от параметров движения на сухом асфальтовом покрытии. При втором управляющем воздействии возрастает длительность переходного процесса, а на третьем уменьшается угловая скорость вращения автомобиля, что приводит к постоянному боковому движению автомобиля, не оснащенного системой стабилизации движения, при прямолинейном положении колес. Для автомобиля, оснащенного системами стабилизации движения, боковое скольжение купируется в течение 0,7-1,0 сек. Для предотвращения такого движения автомобиля в работе [16] ограничивается скорость движения автомобиля на скользких поверхностях до 45 км/ч. Угол поворота управляемого колеса в 3,3 раза превышал угол, при котором автомобиль двигался без скольжения, вместо 5, как это принято в испытаниях на сухих поверхностях:

$$a = 3,3 \frac{\varphi g}{2} = 0,165 g, \quad (11)$$

где  $\varphi$  – коэффициент сцепления колеса с дорогой.

Испытания, проведенные в НГТУ на покрытиях со сниженными на 25 % свойствами показали, что скорость поворота автомобиля  $\dot{\alpha}$  снижается на 8 %, а длительность переходного

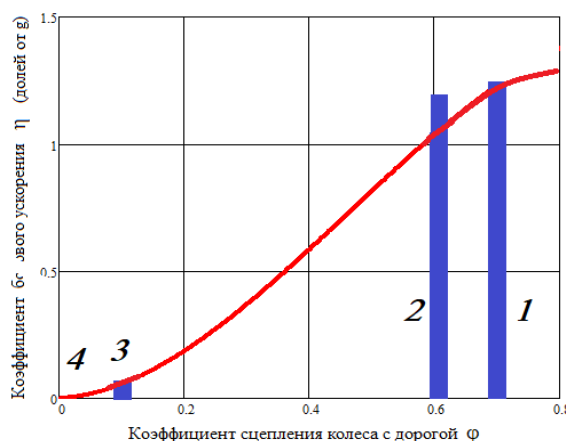
процесса – на 5,8 [12], что позволяет оценить изменение радиуса кривизны траектории до величины, равной:

$$R = \frac{V^2}{\dot{\alpha}}; R_0 = \frac{V^2}{\dot{\alpha}_0} \rightarrow \frac{R}{R_0} = \frac{\dot{\alpha}_0}{\dot{\alpha}} = \frac{1}{0,92} = 1,086$$

что с учетом уравнения (1) позволяет оценить относительное изменение отклонения величиной  $\sqrt{1,086}$  или 1,042. Тогда допустимое отклонение изменится с 0,207 до 0,215, а коэффициент  $\eta$  – с 1,35 до 1,34. Изменение значений коэффициента  $\eta$  от коэффициента сцепления колеса с точностью до 98 % может быть аппроксимировано выражением:

$$\eta = -3,4\varphi^3 + 4,72\varphi^2 + 0,12\varphi \tag{12}$$

Решение данной зависимости показано на рис. 4.



**Рис. 4. Изменение допустимой величины бокового ускорения при выполнении маневра «движение по усеченной траектории»**

1 – по нормам Глобальных Технических Правил № 8; 2 – по результатам испытаний [12],  
3 – по результатам испытаний [15], 4 – теоретическая точка показывающая, что при коэффициенте сцепления, равного 0, допустимое боковое ускорение также будет равно 0

**Fig. 4. Change in the permissible value of lateral acceleration when performing the maneuver «movement along a truncated trajectory»:**

1 – according to the Global Technical Regulation No. 8; 2 – according to the results of tests given in [12],  
3 – according to the results of tests given in [15], 4 – a theoretical point showing that with a coefficient of adhesion equal to 0, the permissible lateral acceleration will also be equal to 0

### Предлагаемое техническое решение

Полученные данные однозначно свидетельствуют, что на основании данных сертификационных испытаний может быть рассчитана техническая возможность ТС обогнуть препятствие на дороге. Как и в случае с определением технической возможности предотвратить ДТП, общий методологический подход будет состоять в сравнении расстояния, на котором возникла опасность для движения, с расстоянием, необходимым для объезда препятствия. Как и в случае торможения, расчет необходимого пути будет включать два этапа: расстояние, преодолеваемое автомобилем за время длительности переходного процесса, и собственно расстояние, необходимое для выполнения маневра на сухом асфальтовом покрытии:

$$S = 0,023L + 0,048 + \sqrt{\frac{B4V^2}{(-3,4\varphi^3 + 4,72\varphi^2 + 0,12\varphi)g}} \tag{13}$$

### Заключение

Посредством обработки экспериментальных данных показана возможность расчета технической возможности у ТС обогнуть препятствие. При этом, если для движения по сухим, мокрым и обледенелым поверхностям данные по движениям машин имеются, то для случая движения по снегу (как рыхлому, так и уплотненному) сведения отсутствуют. Поэтому для применения предложенной методики на весь диапазон дорожных поверхностей необходимо проведение дополнительных испытаний ТС в указанных условиях.

Настоящая работа посвящена рассмотрению технической возможности объехать препятствие со стороны именно ТС. Возможность водителя совершать данный маневр выходит за рамки данной работы и также требует дальнейших исследований [17].

### Библиографический список

1. World health statistics 2025: monitoring health for the SDGs, Sustainable Development Goals. – Geneva Switzerland: Published «World Health Organization». – 2025. – 78с.
2. The handbook of road safety measures. Second edition / Rune Elvik, Alena Høyе, Truls Vaa, Michael Sørensen. Wagon Lane, Bingley BD16 1WA, UK Emerald Group Publishing Limited. 2009. – 1137 p.
3. **Пеньшин, Н.В.** Служба ГИБДД / Н.В. Пеньшин, В.С. Горюшинский. – Тамбов: ТГТУ, 2015. – 204 с.
4. **Мороз, С.М.** Обеспечение безопасности технического состояния автотранспортных средств в эксплуатации / С.М. Мороз. – М.: Академия, 2015. – 202 с.
5. **Рябчинский, А.И.** Международная и национальная регламентация пассивной безопасности транспортных средств // Автомобильная промышленность. – 2024. – № 7. – С. 1-6.
6. **Соцков, Д.А.** Повышение активной безопасности автотранспортных средств при торможении: дис. ... доктора техн. наук: 05.05.03 / Соцков Дмитрий Александрович. – М., 1988. – 546 с.
7. **Христофоров, Е.Н.** Конструктивная безопасность автотранспортных средств / Е.Н. Христофоров, Н.Е. Сакович, В.И. Лавров. – Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2011. – 200 с.
8. **Зубрицкий, С.Г.** Оценка влияния конструктивных изменений автотранспортных средств на безопасность их использования: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Зубрицкий Сергей Григорьевич. – М., 2003. – 185 с.
9. **Кириллов, К.А.** Методика обеспечения безопасности колесных транспортных средств при внесении изменений в их конструкцию: дис. канд. техн. наук: 05.05.03 / Кириллов Кирилл Александрович. – М., 2020. – 230 с.
10. **Иларионов, В.А.** Экспертиза дорожно-транспортных происшествий / В.А. Иларионов. – М.: Транспорт, 1989. – 255 с.
11. **Суворов, Ю.Б.** Судебная дорожно-транспортная экспертиза. Судебно-экспертная оценка действия водителей и других лиц, ответственных за обеспечение безопасности Дорожного Движения, на участках ДТП. – М.: «Экзамен», 2003. – 132 с.
12. **Бутин, Д.А.** Исследование режимов качения пневматической шины при испытаниях управляемости и устойчивости / Д.А. Бутин, А.В. Тумасов, А.С. Вашурин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 3(122). – С. 107-110.
13. **Молев, Ю.И.** Аналитическое сравнение показателей управляемости автомобилей при выполнении маневров «Переставка» и «Движение по усеченной траектории» / Ю.И. Молев, М.Г. Черевастов, С.В. Лазаревич [и др.] // Воронежский научно-технический вестник. – 2025. – Т. 1, № 1(51). – С. 114-124.
14. **Черевастов, М.Г.** Получение переходной функции автомобиля, представленного линейной расчетной двухмассовой моделью / М.Г. Черевастов, Ю.И. Молев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. – № 3(126). – С. 171-180.
15. **Кристалльный, С.Р.** Критерии оценки эффективности действия систем электронного контроля устойчивости автомобилей / С.Р. Кристалльный, М.А. Топорков, В.А. Фомичев [и др.] // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2015. – № 2(4). – С. 2.
16. **Иванов, А.М.** Критерий оценки эффективности действия систем электронного контроля устойчивости на льду для автомобилей, оснащенных шипованными шинами / А.М. Иванов, С.Р. Кристалльный [и др.] // Журнал автомобильных инженеров. – 2017. – № 4(105). – С. 24-27.

17. Буйленко, В.Я. Психологические особенности человека при управлении автомобильным транспортом / В.Я. Буйленко, С.В. Жанказиев, В.В. Дементенко [и др.]. – М: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2017. – 172 с.

### References

1. World health statistics 2025: monitoring health for the SDGs, Sustainable Development Goals. Geneva: World Health Organization; 2025. 78 p.
2. Elvik R., Høyе A., Vaa T., Sørensen M. The handbook of road safety measures. 2nd ed. Wagon Lane: Emerald Group Publishing Limited; 2009. 1137 p.
3. Penshin N.V., Goryushinsky VS. Traffic police service: a textbook for university students studying in the bachelor's degree 230301 «Technology of transport processes». Tambov: Publishing house of FSBEI HPE «TSTU»; 2015. 204 p.
4. Moroz S.M. Ensuring the safety of the technical condition of vehicles in operation. Textbook for students of higher educational institutions studying in the bachelor's degree program Operation of transport and technological machines and complexes (training profiles «Cars and automotive industry», «Automotive service»), «Technical expertise of motor vehicles»). 2nd ed., revised. Moscow: Akademiya Publ.; 2015. 202 p.
5. Ryabchinsky A.I. International and national regulation of passive safety of vehicles. Automotive industry. 2024;(7):1-6.
6. Sotskov D.A. Povyshenie aktivnoy bezopasnosti avtotransportnykh sredstv pri tormozhenii [Increasing the active safety of motor vehicles during braking]. Dissertation of the Doctor of Technical Sciences. Moscow; 1989. 565 p. (in Russian).
7. Khristoforov E.N, Sakovich N.E, Lavrov V.I. Konstruktivnaya bezopasnost avtotransportnykh sredstv [Structural safety of motor vehicles]. Bryansk: Bryansk State Agrarian University; 2011. 200 p. (in Russian).
8. Zubrisky S.G. Otsenka vliyaniya konstruktivnykh izmeneniy avtotransportnykh sredstv na bezopasnost ikh ispolzovaniya [Assessment of the impact of structural changes in motor vehicles on the safety of their use]. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow; 2003. 185 p. (in Russian).
9. Kirillov K.A. Metodika obespecheniya bezopasnosti kolesnykh transportnykh sredstv pri vnesenii izmeneniy v ikh konstruktsiyu [Methodology for ensuring the safety of wheeled vehicles when making changes to their design]. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow: NAMI; 2022. 177 p. (in Russian).
10. Ilarionov V.A. Ekspertiza dorozhno-transportnykh proisshestviy [Expert examination of road traffic accidents]. Moscow: Transport; 1989. 255 p. (in Russian).
11. Suvorov Yu.B. Sudebnaya dorozhno-transportnaya ekspertiza. Sudebno-ekspertnaya otsenka deystviy voditeley i drugikh lits, otvetstvennykh za obespechenie bezopasnosti Dorozhnogo Dvizheniya, na uchastkakh DTP [Forensic road traffic accident examination. Forensic expert assessment of the actions of drivers and other persons responsible for ensuring road safety at accident sites]. Moscow: Ekzamen; 2003. 132 p. (in Russian).
12. Butin D.A., Tumasov A.V., Vashurin A.S., et al. Issledovanie rezhimov kacheniya pneumaticheskoy shiny pri ispytaniyakh upravlyaemosti i ustoychivosti [Investigation of pneumatic tire rolling modes during handling and stability tests]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2018;(3):107-110. (in Russian).
13. Molev Yu.I., Cherevastov M.G., Lazarevich S.V., et al. Analiticheskoe sravnenie pokazateley upravlyaemosti avtomobiley pri vypolnenii manevrov «Perestavka» i «Dvizhenie po usechennoy traektorii» [Analytical comparison of vehicle handling performance during «Lane change» and «Truncated trajectory maneuvers»]. *Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik* [Voronezh Scientific and Technical Bulletin]. 2025;1(1):114-124. (in Russian).
14. Cherevastov M.G., Molev Yu.I. Poluchenie perekhodnoy funktsii avtomobilya, predstavlennoy lineynoy raschetnoy dvukhmasovoy model'yu [Obtaining the transfer function of a vehicle represented by a linear computational two-mass model]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2019;(3):171-180. (in Russian).
15. Kristalnyi S.R., Toporkov M.A., Fomichev V.A., et al. Kriterii otsenki effektivnosti deystviya sistem elektronogo kontrolya ustoychivosti avtomobiley [Criteria for evaluating the effectiveness of electronic

- stability control systems of vehicles]. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura* [Automobile. Road. Infrastructure]. 2015;(2):2. (in Russian).
16. Ivanov A.M., Kristalnyy S.R., Popov N.V., et al. Kriteriy otsenki effektivnosti deystviya sistem elektronogo kontrolya ustoychivosti na l'dyu dlya avtomobiley, osnashchennykh shipovannymi shinami [Criteria for evaluating the effectiveness of electronic stability control systems on ice for vehicles equipped with studded tires]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov* [Journal of Automotive Engineers]. 2017;(4):24-27. (in Russian).
17. Buylenko V.Ya., Zhankaziev S.V., Dementienko V.V., et al. Psikhologicheskie osobennosti cheloveka pri upravlenii avtomobil'nyim transportom [Psychological characteristics of a person when driving motor vehicles]. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); 2017. 172 p. (in Russian).

***Дата поступления  
в редакцию: 29.10.2025***

***Дата принятия  
к публикации: 18.02.2026***

УДК 629.33

EDN MOLOSF

## МЕТОД МНОГОФАКТОРНОЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПЕРВИЧНОГО ПОДРЕССОРИВАНИЯ КОЛЕСНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

**М.В. Четвериков**

ORCID: 0000-0003-3723-1171 e-mail: mihchet@gmail.com

Московский политехнический университет

Инновационный центр «КАМАЗ»

Москва, Россия

Разработан новый метод оптимизации конструктивных параметров первичных систем поддресоривания, позволяющий проводить ее по нескольким факторам и критериям. Целью является повышение эксплуатационной скорости движения транспортного средства (ТС) с выполнением нормативных требований по комфортабельности, управляемости и устойчивости при ограничениях со стороны системы поддресоривания путем подбора оптимальных конструктивных параметров подвески. Изучены факторы, влияющие на качества системы поддресоривания, проанализированы автомобильные стандарты методов оценки и испытаний плавности хода, управляемости и устойчивости ТС. Выявлены новые критерии оценки качества функционирования системы поддресоривания, позволяющие более полно оценить комфортабельность ТС. На этапе конструкторской проработки новый метод обеспечивает подбор характеристик устройств системы первичного поддресоривания для повышения эксплуатационных свойств автомобиля.

**Ключевые слова:** система поддресоривания; транспортные средства; подвеска; метод оптимизации; целевая функция; упругий элемент; демпфирующий элемент; направляющий аппарат; конструктивные параметры.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Четвериков, М.В. Метод многофакторной многокритериальной оптимизации конструктивных параметров системы первичного поддресоривания колесного транспортного средства // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2026. № 2. С. 117-131. EDN MOLOSF

## METHOD OF MULTIFACTOR MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF DESIGN PARAMETERS OF PRIMARY SUSPENSION SYSTEM OF WHEELED VEHICLE

**M.V. Chetverikov**

ORCID: 0000-0003-3723-1171 e-mail: mihchet@gmail.com

Moscow Polytechnic University

KAMAZ Innovation Center LLC

Moscow, Russia

**Abstract.** The paper presented a novel method for optimizing the design parameters of primary suspension systems, allowing it to be carried out based on several factors and criteria. The objective of the study is to improve the operational driving speed of vehicles while ensuring compliance with regulatory requirements regarding comfort, handling and stability under constraints imposed by the suspension system through optimal selection of suspension design parameters. The factors influencing the quality of the suspension system were studied, and automotive standards for methods of assessing and testing the smoothness of the ride, handling and stability of vehicles were analyzed. New evaluation criteria for assessing the performance quality of the suspension system have been identified, allowing for a more complete assessment of vehicle comfort. At the design stage, the new method ensures the selection of characteristics of the primary suspension components to improve the vehicle's performance properties.

**Key words:** vehicle suspension system; transport means; suspension; optimization method; target function; elastic element; damping element; guiding apparatus; design parameters.

**FOR CITATION:** M.V. Chetverikov. Method of multifactor multicriteria optimization of design parameters of primary suspension system of wheeled vehicle. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2026. № 2. Pp. 117-131. EDN MOLOSF

## Введение

Разработка метода оптимизации, позволяющего получить наилучшую конфигурацию конкретной системы с учетом ее взаимодействия с остальными системами автомобиля, является одной из наиболее актуальных задач современного автомобилестроения. В настоящей работе представлен метод оптимизации системы первичного поддрессоривания транспортного средства (ТС). Его разработка, в первую очередь, основывается на определении понятия «оптимальная подвеска». В идеале оптимальная система поддрессоривания предполагает отсутствие каких-либо колебаний и виброускорений поддрессоренной массы, вызванных неровностями дорожной поверхности. Однако в реальных ситуациях появляется ряд условий и ограничений: компоновка, конструкция, возможность изготовления, а также безопасность, управляемость и устойчивость. Тривиальный подход подразумевает нулевую жесткость, что является невыполнимым требованием и влечет за собой парадоксальный некорректный отказ от самой системы поддрессоривания.

Теория допускает управление системой поддрессоривания таким образом, чтобы поддрессоренная масса была полностью стабилизирована, и подобные алгоритмы известны [1]. Однако на практике этого недостаточно, поскольку на больших скоростях требуются частоты регулирования, которые возможно реализовать только в несжимаемых средах, таких как гидравлика [2, 3] и механика, что делает доступным управление демпфированием, а другими свойствами системы поддрессоривания – практически невозможным или нерациональным с точки зрения затрат энергии. В реальных конструкциях необходимо учитывать особенности и ограничения, накладываемые на систему поддрессоривания. Можно заключить, что оптимальной системой поддрессоривания необходимо считать такую подвеску, которая в конкретном ТС позволяет получить наилучшие показатели плавности хода, устойчивости и управляемости при удовлетворении всем накладываемым на нее требованиям. При этом необходимо четко обозначить данные требования, а также определить критерии оценки качества системы поддрессоривания. Последним посвящен ряд научных работ [4, 5], благодаря которым возможно сформировать те или иные наборы критериев оптимизации. Ограничения, накладываемые на систему поддрессоривания, имеют свои допустимые диапазоны, например, величину хода подвески. Подобные ограничения, допускающие варьирование и определяющие качество системы поддрессоривания, далее будем называть факторами оптимизации.

Таким образом, оптимизация системы поддрессоривания сводится к итерационному процессу испытаний объекта с варьированием факторов, на основании результатов которых строится целевая функция по набору критериев, и производится поиск ее экстремумов. Глобальный экстремум целевой функции будет обозначать оптимальный набор величин факторов оптимизации. Однако в данной постановке задачи присутствует ряд аспектов, которые необходимо уточнить.

### Обоснование целевой функции, критериев качества для процедуры оптимизации конструктивных параметров

Под оптимизацией понимается процесс нахождения наилучшего варианта технического объекта в отношении заданного свойства. Он осуществляется путем изменения структуры или параметров объекта, называемых управляемыми или оптимизируемыми (далее – факторы оптимизации). Эффективность выбора факторов оценивается численной характеристикой *критерия оптимизации*; его зависимость от факторов оптимизации называется целевой функцией. Задача оптимизации системы поддрессоривания осложняется тем, что улучшение одного из свойств подвески ТС может привести к ухудшению другого ее свойства. В частности, снижение жесткости упругого элемента (УЭ) позволяет добиться повышения плавности хода, при этом нередко снижается управляемость и устойчивость ТС. В связи с этим,

оценка оптимизации системы поддрессирования ТС проводится одновременно по нескольким критериям, т.е. задача становится многокритериальной.

Оптимизация представляет собой процесс поиска глобального экстремума целевой функции отклика. Однако, в многокритериальной задаче оптимизации каждый критерий имеет свой тренд к снижению или увеличению его значений, т.е. их наилучшее значение минимально или максимально соответственно. Подобные различия в трендах вызовут ряд трудностей при оптимизации вплоть до невозможности ее проведения в силу того, что экстремум целевой функции будет неочевиден. Критерии качества должны иметь общий тренд к снижению их значений или к увеличению. В данном методе принимается тренд к снижению их значений в силу того, что основные методы оптимизации сводятся к поиску минимума целевой функции. Для тех критериев, которые имеют положительный тренд в их чистом виде, необходимо принять обратную величину их пороговых значений.

Система поддрессирования оказывает влияние на такие свойства ТС, как плавность хода, вибронегруженность, управляемость и устойчивость, в связи с чем необходимо рассматривать критерии оптимизации, основывающиеся на требованиях, предъявляемых к данным свойствам. В качестве критериев необходимо принять следующие.

1. *Величина уровня комфорта на сиденье водителя согласно ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997)* [6]. Является полным среднеквадратичным значением скорректированного виброускорения, разложенного по 15 октавным полосам частот в диапазоне (0,7; 22,4) Гц и вычисляется по формуле:

$$a_v = (k_x^2 \cdot a_{wx}^2 + k_y^2 \cdot a_{wy}^2 + k_z^2 \cdot a_{wz}^2)^{1/2},$$

где  $a_{wx}$ ,  $a_{wy}$ ,  $a_{wz}$  – среднеквадратичные значения скорректированного виброускорения ( $\text{м/с}^2$ ) вдоль направлений осей координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , соответственно;  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  – весовые коэффициенты.

Сами среднеквадратичные значения скорректированного виброускорения вычисляются по формуле:

$$a_w = \left[ \sum_i (W_i \cdot a_i)^2 \right]^{1/2},$$

где  $W_i$  – весовой коэффициент для  $i$ -ой третьоктавной полосы частот;  $a_i$  – среднеквадратичное значение виброускорения в  $i$ -ой третьоктавной полосе частот,  $\text{м/с}^2$ .

Значение величины комфорта выражено в виде одного числа с размерностью ускорений ( $\text{м/с}^2$ ) и не имеет конкретных границ допустимых значений для мест водителя и пассажиров. О повышении уровня комфорта свидетельствует снижение ее значения. Данный критерий позволяет обобщить показатели плавности хода по трем измеряемым направлениям; он вполне удобен для оценки, поскольку выражается в виде одного числа. Однако для комплексной оценки плавности хода его одного недостаточно в силу того, что в различных октавных полосах частот изменение одного фактора имеет разный характер влияния: на больших частотах плавность хода улучшается, на малых – ухудшается. Соответственно, необходим дополнительный критерий, позволяющий отследить подобное явление;

2. *Величины вибронегруженности места водителя согласно ГОСТ 12.1.012-90* [7]. Нормируются величины уровня виброускорений  $L_{wi}$  в дБ на месте водителя, разложенных по пяти октавным полосам частот, рассчитываемые по формуле:

$$L_{wi} = 20 \cdot \lg \left( \frac{\text{СКО}_{ai}}{10^{-6}} \right),$$

где  $\text{СКО}_{ai}$  – действующее среднеквадратическое значение виброускорений в  $i$ -ой октавной полосе частот;  $10^{-6}$  – пороговое значение.

Значения не должны превышать максимально допустимые величины виброускорений для восьмичасового рабочего дня водителя на каждой октавной полосе: до 121 дБ в диапазоне (0,7; 1,4) Гц, до 118 дБ в диапазоне (1,4; 2,8) Гц, до 115 дБ в диапазоне (2,8; 5,6) Гц, до 116 дБ в диапазоне (5,6; 11,2) Гц, до 121 дБ в диапазоне (11,2; 22,4) Гц – для уровня вертикальных виброускорений. Об улучшении уровня вибронегруженности свидетельствует снижение

ее значения. В данном случае достаточно рассматривать именно вертикальные виброускорения, поскольку они наиболее ярко отражают явление, связанное с различным характером функции отклика на разных октавных полосах частот при изменении одного фактора;

3. *Критерий, характеризующий риск возникновения «болезни движения» (укачивания) согласно ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997) [6].* Критерии, описанные выше, рассматривают вибрацию на частотах свыше 0,5 Гц, однако колебания на частотах ниже 0,5 Гц также могут оказывать нежелательные воздействия на организм человека, вызывать дискомфорт и мешать нормальной деятельности. В большей степени такие низкочастотные колебания связаны с появлением «болезни движения», преимущественно для положения сидя или стоя. Критерий представляет собой безразмерную величину, характеризующую долю лиц, у которых укачивание может вызвать рвотную реакцию, выраженную в процентах. Рассчитать ее можно по формуле  $K_m \cdot MSDV_z$ , где  $K_m$  – константа, которая может меняться для разных групп людей, но для смешанной группы из взрослых мужчин и женщин, не адаптированных к действию низкочастотных колебаний, принимается равной 1/3;  $MSDV_z = (a_w \cdot T_0)^{1/2}$  – значение дозы укачивания для длительности воздействия  $T_0$ , м/с<sup>1,5</sup>.

Данный критерий позволяет оценить риски возникновения морской болезни при повышении плавности хода ТС и имеет тренд к снижению своих значений, т.е. чем ниже доля лиц, подверженных укачиванию – тем лучше. При помощи этого критерия возможно ограничить снижение жесткости и демпфирования системы поддрессоривания до адекватных значений и уйти от бесконтрольного спуска до нулевой жесткости. Необходимо отметить, что длительность измерений в данном испытании должна быть не менее 240 с.

4. *Обратная величина максимальной скорости выполнения маневра «поворот  $R_n=35$  м» согласно ГОСТ 31507-2012 [8].* Испытание проводится при движении автомобиля с постоянной скоростью до совершения маневра с последующим поворотом рулевого колеса на необходимый угол для прохождения коридора. Регистрируется скорость ТС при входе в поворот. При успешном выполнении маневра испытание повторяется с более высокой скоростью. Стандарт устанавливает минимальное значение скорости выполнения испытания для автомобилей в зависимости от их категории, при недостижении которой испытание считается невыполненным.

Данный критерий необходим для оценки управляемости и устойчивости ТС в стационарном режиме движения. При этом необходимо учитывать угол поперечного крена, при превышении значения которого может возникнуть произвольная реакция водителя, направленная на уменьшение данного угла или риск опрокидывания ТС. Величина угла принимается равной 1,5° при боковом ускорении  $a_{wy} = 1$  м/с<sup>2</sup> и 3° при боковом ускорении  $a_{wy} = 2$  м/с<sup>2</sup> [9] (для категории ТС N2 и N3), и при ее достижении в процессе выполнения маневра испытание необходимо прекратить. Помимо этого, в ГОСТе существует требование отсутствия отрыва одного из колес, в противном случае испытание считается невыполненным.

5. *Обратная величина максимальной скорости выполнения маневра «переставка  $S_n=20$  м» согласно ГОСТ 31507-2012 [8].* Испытание проводится при движении автомобиля с постоянной скоростью до совершения маневра с последующим изменением траектории движения ТС в границах коридора, имитирующего участок дороги, на котором необходимо проехать смену полосы движения. При этом, по аналогии с предыдущим критерием, существует требование стандарта о недопустимости отрыва колес в процессе маневра, также регламентируется минимальная скорость выполнения испытания. Дополнительно предлагается регистрировать величину поперечного крена ТС, исходя из тех же соображений, что и в п. 4. В отличие от описанного в п. 4, данный критерий позволяет оценить управляемость и устойчивость ТС в нестационарном режиме движения.

Рассмотренные критерии в совокупности призваны комплексно оценить свойства системы первичного поддрессоривания ТС. Но, поскольку результат оптимизации есть числовое значение целевой функции, сформированный набор необходимо привести к единому критерию оптимизации, т.е. обеспечить функциональную зависимость между факторами и критериями.

### Метод расчета целевой функции

При свертке критериев возникает проблема, связанная с тем, что критерии различаются между собой как по уровню их значений, так и по размерностям (ускорение, скорость и т.д.). Ее можно решить, введя весовые коэффициенты, которые позволят получить выражение в безразмерном виде и приведенное к единице. После формирования набора критериев оптимизации необходимо их свести к одной общей зависимости, чтобы на ее основе можно было построить целевую функцию критериев качества вида:

$$f = k_1 \cdot a_1 + k_2 \cdot a_2 + \dots + k_n \cdot a_n$$

Здесь весовые коэффициенты  $k_1, \dots, k_n$  представляют собой выражения:

$$k_i = b \cdot \frac{1}{a_{i \text{ исх}}};$$

где  $n$  – количество критериев оптимизации;  $a_{i \text{ исх}}$  – значение  $i$ -го критерия оптимизации при испытаниях ТС с системой подрессоривания в исходной конфигурации, которую необходимо оптимизировать;  $b$  – безразмерный коэффициент, позволяющий свести сумму весовых коэффициентов к единице:

$$b = \frac{1}{\frac{1}{a_{1 \text{ исх}}} + \frac{1}{a_{2 \text{ исх}}} + \dots + \frac{1}{a_{n \text{ исх}}}}.$$

После получения целевой функции отклика и набора факторов необходимо построить рациональный план эксперимента и перейти к его непосредственному проведению. В рамках эксперимента необходимо проводить замер значений функции отклика в зависимости от значения каждого фактора. Так будет получен набор значений функций отклика в соответствии со значениями факторов. С полученными значениями функции критериев качества необходимо построить функции отклика для каждого фактора, их набор позволит сформировать с ними многомерную поверхность отклика. В ней необходимо найти глобальный экстремум, которому будут соответствовать конкретные значения факторов оптимизации. Таким образом будут получены оптимальные значения факторов оптимизации, которые и будут являться оптимальными значениями конструктивных параметров.

Важно отметить, что при построении целевой функции критериев необходимо учитывать корректность их значений, а именно удовлетворение этих значений заданным в стандартах диапазонам, а также выполнение условий испытаний. Таким образом исключаются из расчета случаи превышения допустимых значений виброускорений любого диапазона из указанных для критерия № 2, а также случаи, при которых наблюдается отрыв колес (обнуление вертикальных реакций), или слишком низкая скорость выполнения маневра, или превышение угла поперечного крена крена – т.е. условий для критериев № 4 и № 5. Без выполнения данного шага в результате оптимизации может быть обнаружен глобальный экстремум целевой функции, при котором не будут выполняться ключевые требования нормативных документов.

### Обоснование набора факторов оптимизации

Перед началом процесса оптимизации необходимо определиться с первичным набором факторов. Для этого необходимо разделить элементы системы подрессоривания по известным функциональным признакам: направляющий аппарат, упругое устройство и демпфирующее устройство. Такие факторы, как жесткость УЭ и коэффициенты демпфирования амортизатора обоснованы тем, что они являются ключевыми характеристиками системы подрессоривания. Однако, применительно к передним первичным системам подрессоривания магистральных тягачей, в которых наибольшее распространение получили листовые рессоры в качестве упругого элемента, необходимо учитывать количество листов в данных рессорах, поскольку межлистовое трение значительным образом влияет на описанные характеристики подвески. Помимо этого, нужно учитывать факторы, связанные с направляющим аппаратом подвески. Наиболее характерные и информативные факторы, применимые к раз-

личным видам колесных ТС – это ход подвески, плечи продольного и поперечного крена, а также передаточное соотношение системы поддрессоривания. Данные факторы позволяют комплексно описать свойства направляющего аппарата подвески ТС.

Помимо основных устройств системы поддрессоривания, применяются еще и дополнительные, такие как стабилизатор поперечной устойчивости. Данное устройство призвано уменьшать крены автомобиля при движении в поворотах, тем самым повышая его показатели по управляемости и устойчивости. Характерным фактором в данном случае является суммарная жесткость всех стабилизаторов поперечной устойчивости, работающих в составе первичной системы поддрессоривания ТС. Для каждого из устройств в табл. 1 представлены наборы факторов, относящихся непосредственно к нему.

**Таблица 1.**  
**Первичные факторы оптимизации**

**Table 1.**  
**Primary factors of optimization**

| Упругий элемент             | Демпфирующий элемент                          | Направляющее устройство   | Стабилизатор поперечной устойчивости                       |
|-----------------------------|---|---|--|
| Жесткость упругого элемента | Коэффициент демпфирования на ходе сжатия      | Ход подвески  | Суммарная жесткость стабилизаторов поперечной устойчивости |
|                             | Коэффициент демпфирования на ходе отбоя       | Плечо поперечного крена в статике                                       |  |
|                             | Число листов в рессоре                        | Плечо продольного крена в статике (параметр противоклевковой геометрии) |  |
|                             | Скорость при открытии дросселирующих клапанов | Передаточное соотношение подвески                                       |  |

С данными факторами необходимо произвести процедуру формирования окончательного набора факторов оптимизации. Для этого проводится имитационное моделирование на имеющейся динамической модели. При формировании набора факторов оптимизации выявляется степень индивидуального влияния каждого из них на поведение модели ТС, а также их совместного влияния на систему. В процессе назначения факторов необходимо исключить или минимизировать количество взаимно влияющих друг на друга факторов таким образом, чтобы все факторы оптимизации были независимыми. После этого необходимо исключаются факторы, влияющие на систему незначительным образом с тем, чтобы уменьшить общее число факторов, тем самым ускоряя и упрощая процесс оптимизации. Подобную процедуру предлагается производить при помощи имитационного моделирования на динамической модели ТС путем постановки ряда экспериментов. В процессе моделирования необходимо отслеживать изменения значений критериев на всем диапазоне варьирования факторов. Наиболее простым путем является построение графических зависимостей величин критериев от значений факторов. Те факторы, индивидуальное или совместное изменение которых незначительным образом влияет на величины критериев, имеет смысл исключить из окончательного набора. При этом факторы, оказывающие большое совместное влияние при малом индивидуальном, необходимо объединить в один, а исходные – исключить.

При проведении подобного отбора необходимо предварительно задаться допустимыми диапазонами и шагами варьирования факторов оптимизации. Число испытаний должно быть малым, но достаточным для проведения оптимизации, в связи с чем шаг варьирования факторов необходимо увеличить в разумных пределах. Диапазоны варьирования факторов оптимизации необходимо принимать, исходя из перечисленных ниже соображений.

### 1. Жесткость УЭ.

Минимальное значение жесткости УЭ должно обеспечивать удержание массы ТС, приходящейся на УЭ, в статическом положении без касания ограничителя хода. Отсюда нижней границей диапазона варьирования будет величина отношения силы тяжести, приходящейся на УЭ, к ходу подвески (или УЭ):

$$c_{\min} = \frac{m_{y.э.} \cdot g}{h_{y.э.}}$$

Верхней же границей диапазона послужит значение отношения произведения наибольшего коэффициента динамичности с силой тяжести, приходящейся на УЭ к ходу подвески (УЭ):

$$c_{\max} = \frac{m_{y.э.} \cdot g \cdot k_{d \max}}{h_{y.э.}}$$

### 2. Демпфирующий аппарат подвески.

Перед рассмотрением демпфирующего элемента стоит уделить внимание части, связанной с УЭ, а конкретно количеству листов рессоры. Число листов рессоры (точнее, число пар трения между ними) создает сопротивление прогибу УЭ в виде гистерезисного демпфирования [10]. Диапазон варьирования числа листов начинается от одного листа и ограничивается в зависимости от прочностных свойств рессоры [11]. При этом необходимо стремиться к снижению данного значения, поскольку эффект гистерезисного демпфирования при наличии отдельного демпфирующего элемента (амортизатора) будет негативно влиять на плавность хода, при этом необходимые демпфирующие свойства будут достигнуты за счет самого амортизатора. В связи с этим, в рамках оптимизации данный параметр имеет смысл принимать сразу наименьшим.

Применительно к самому амортизатору, а именно к таким факторам, как коэффициенты демпфирования на ходе сжатия и отбоя, можно задать диапазоны варьирования, исходя из методики синтезирования данных диапазонов, описанной в [12]. Данный метод на первом этапе предполагает расчет минимальных и максимальных возможных значений на демпфирующей характеристике за счет принятия минимальных и максимальных значений различных параметров амортизатора, соответственно. При этом формируется искомый диапазон, который целесообразно принять за основу в данном методе. Однако стоит учесть следующую особенность. В данном случае проявляется зависимость коэффициента демпфирования от скорости открытия клапанов  $v_{ни \text{ кл}}$ . Помимо этого, в алгоритме расчета этого фактора фигурирует жесткость подвески и ее передаточное соотношение, что тоже не делает фактор независимым от других. В связи с этим необходимо данный фактор разделить на отдельные независимые единицы, допускающие варьирование их значений. Отсюда сформирован новый список факторов, описывающих демпфирующее устройство подвески: скорость поршня со штоком при открытии разгрузочных клапанов  $v_{ни \text{ кл}}$ , коэффициент относительного затухания  $\psi_z$  и отношение коэффициентов при отбое и сжатии  $n_{ам}$ . Именно эти факторы будут варьироваться в процессе оптимизации.

### 3. Направляющий аппарат подвески.

С направляющим аппаратом подвески связаны следующие факторы оптимизации: ход, плечо поперечного крена, плечо продольного крена и передаточное соотношение подвески. Ограничения, накладываемые на ход подвески, формируются из компоновочных и технологических соображений. В зависимости от свободного пространства на траектории движения, а также от высоты несущей системы, размеров упругих элементов в свободном состоянии можно определить максимальную возможную величину хода подвески и ей задаться. В случае с плечом поперечного крена ситуация обстоит сложнее. Поскольку данный параметр есть расстояние от центра масс до центра крена в поперечной плоскости в проекции на ось симметрии ТС, а высоту центра масс всего ТС в рамках оптимизации системы подрессоривания изменить практически невозможно, остается только варьировать положением центра крена. Его координата зависит от геометрии и кинематики направляющего ап-

парата подвески, в зависимости от хода колеса она может принимать различные значения. Но в случае применения зависимой рессорной подвески задача нахождения центра поперечного крена значительно упрощается, поскольку данная точка расположена на пересечении линии, соединяющей коренные листы рессоры и вертикальной оси симметрии ТС в поперечной плоскости. Варьирование данного параметра можно будет проводить путем смещения статического положения рессоры за счет изменения ее статического прогиба или смещения креплений рессоры по высоте.

Определение плеча продольного крена ТС производится в продольной плоскости симметрии автомобиля [13]. В общем случае данный параметр характеризует противоклевковую геометрию ТС, которая необходима для снижения амплитуды продольных колебаний подрессоренной массы при торможениях и разгонах. Аналогично поперечному крену, в продольной плоскости колебания происходят вокруг центра продольного крена на плече, равном высоте от центра тяжести до данного центра крена. В случае с рессорной подвеской центром продольного крена будет являться точка, вокруг которой по кинематике будет осуществляться качение подрессоренной массы. В общем случае она располагается вблизи передней (закрепленной) проушины рессоры, отсюда варьирование плеча продольного крена может быть осуществлено за счет варьирования длины рессоры и ее статического хода или жесткости.

При рассмотрении следующего фактора – передаточного соотношения подвески – необходимо учитывать ее тип. Как говорилось ранее, объект исследования представляет собой переднюю рессорную зависимую подвеску магистрального тягача. В данном типе подвески при одинаковом перемещении противоположных колес величина передаточного соотношения не имеет отношения к расположению упругого и демпфирующего элемента, однако в случае различных перемещений колес равна отношению колеи ТС к его рессорной колее [14]. В связи с этим, применительно к конкретному исследованию, варьирование передаточного соотношения подвески будет заключаться в переборе возможных значений рессорной колеи, диапазон которых будет определен из компоновочных соображений. Варьирование величины колесной колеи ТС в рамках оптимизации подвески недопустимо из соображений сохранения характерных габаритных размеров автомобиля.

Таким образом, можно заключить, что применительно к объекту описываемого исследования факторы оптимизации, связанные с направляющим аппаратом системы подрессоривания фактически переродятся в более очевидные размеры: ход подвески; вертикальный размер между осью передней проушины рессоры и центром масс ТС; длина рессоры; рессорная колея. В данном случае среди факторов имеется ход подвески, который фигурирует в расчетах других факторов, таких, как жесткость УЭ. Для корректной оптимизационной работы его необходимо исключить в силу влияния на другие величины.

#### *4. Стабилизатор поперечной устойчивости.*

Стабилизатор поперечной устойчивости играет важную роль в работе подвески при несимметричных вертикальных перемещениях колес. При этом практически всегда при эксплуатации данные перемещения несимметричны. Однако, применительно к рассматриваемой оптимизации, он должен выступать в качестве устройства, которое позволит улучшить значения критериев, связанных с управляемостью и устойчивостью при том, что критерии по комфортабельности и вибронегруженности сохранят наилучшие свои значения. В общем виде в качестве фактора, характеризующего стабилизатор поперечной устойчивости, выступает его жесткость, однако необходимо ее рассмотреть детальнее с точки зрения конкретных конструктивных параметров, подлежащих варьированию.

Стабилизатор представляет собой профиль круглого сечения с направляющей произвольной формы, одни части которого работают на кручение, а другие – на изгиб. Существует метод расчета жесткости стабилизатора поперечной устойчивости произвольной формы, выделяющий данные участки [15], размеры которых удобно брать как варьлируемые параметры. Таким образом, мы имеем следующие параметры, доступные для варьирования, и независимые друг от друга и других факторов: длины закручивающихся участков,  $l_i$ ; длины изгибающихся участков,  $s_i$ ; диаметр трубы стабилизатора,  $d$ . При этом ограничение диапазона варьи-

рования данных параметров основывается на прочности стабилизатора, а конкретно на его максимальном угле закрутки при разноименных ходах подвески, при котором не должно происходить поломки стабилизатора. При прочих равных условиях для прутка круглого сечения жесткость на кручение будет меньшей, чем изгибная, за счет того, что модуль упругости первого рода  $E$  превосходит модуль упругости второго рода  $G$  более, чем в 2,5 раза при том, что полярный момент инерции  $I_p$  больше центрального  $I_x$  ровно вдвое. При этом в обоих случаях закономерность одинаковая: чем короче прутки, тем выше жесткость. Однако из описанного можно заключить, что в целях сохранения высокого угла закрутки стабилизатора поперечной устойчивости и повышения жесткости предпочтительнее «жертвовать» длиной его закручивающейся части (увеличивать ее длину, что снизит жесткость) при укорачивании изгибающихся (что повысит жесткость в большей мере, чем произойдет ее снижение от удлинения закручивающегося участка).

### Формирование окончательного набора факторов оптимизации и определение шага их варьирования

С составленными факторами в виде конструктивных параметров необходимо произвести процедуру исключения минимально влияющих на величины критериев, а также оценку и минимизацию эффектов их совместного влияния. Данная процедура необходима для снижения количества расчетов, а также сокращения времени проведения оптимизации. Поскольку оптимизация проводится на основе уже существующей конфигурации параметров, в первую очередь, необходимо провести испытания с исходными величинами факторов и измерить значения критериев. Как правило, исходные величины факторов не совпадают с граничными значениями на диапазонах их варьирования, что упрощает задачу выявления нелинейности влияния факторов оптимизации. После замера значений критериев с исходной конфигурацией факторов необходимо провести испытания и измерить величины критериев для граничных значений факторов в их диапазонах, причем менять факторы необходимо по отдельности, т.е. для каждого фактора значение критериев фиксировать индивидуально. С полученными результатами необходимо оценить индивидуальный уровень влияния каждого фактора на все критерии. Если для конкретного фактора все критерии меняют свои значения в диапазоне до 10 %, его можно исключить из оптимизации, при этом необходимо убедиться, что величины критериев изменяются монотонно, на основании трех имеющихся значений: двух пограничных и одного исходного. Окончательный набор факторов, подлежащий проведению описанной процедуры, представлен в табл. 2.

Таблица 2.  
Окончательный набор факторов

Table 2.  
Final set of factors

| Упругий элемент                  | Демпфирующий элемент                                    | Направляющее устройство  | Стабилизатор поперечной устойчивости  |
|----------------------------------|---|--|---------------------------------------|
| Жесткость упругого элемента, $c$ | Скорость при открытии дросселирующих клапанов, $v_{пш}$ | Вертикальный размер между осью передней проушины рессоры и центром масс ТС | Длины закручивающихся участков, $l_i$ |
|                                  | Коэффициент относительного затухания, $\psi_z$          | Длина рессоры  | Длины изгибающихся участков, $s_i$    |
|                                  | Отношение коэффициентов при сжатии/отбое, $n_{ам}$      | Рессорная колея  | Диаметр трубы стабилизатора, $d$      |

После исключения слабовлияющих факторов необходимо задать шаг варьирования для оставшихся элементов. Поскольку оптимизация многофакторная, и в процессе расчета

будут формироваться матрицы, состоящие из значений для различных величин факторов, было бы удобно сделать их квадратными, т.е. число шагов варьирования у всех факторов принять одинаковым и равным числу факторов (в данном случае их 10). Однако необходимо учитывать ограничения, накладываемые при проектировании, в виде ограниченного спектра доступных изделий или материалов, которые задействуются при выборе шага варьирования конкретных параметров, на основании чего можно сократить шаг их варьирования. Окончательный набор факторов представлен в табл. 2. Таким образом, шаг варьирования будет составлять 10 % величины всего диапазона варьирования для каждого фактора.

### Построение плана проведения эксперимента

Поскольку оптимизационный процесс является многофакторным, в данном случае возможен выбор плана проведения эксперимента одного из двух типов: классического и факторного. Но в силу того, что целевая функция  $f$  имеет сложный вид, и ее невозможно представить в виде  $f = A_1 \cdot X_1 + A_2 \cdot X_2 + \dots + A_k \cdot X_k$  или  $f = X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_k$ , факторный план проведения эксперимента невозможен, несмотря на его краткость и более высокую точность [16]. В таком случае необходимо воспользоваться классическим планом проведения эксперимента, и для повышения точности он должен быть полным.

Основной классический план эксперимента подразумевает, что все независимые переменные (факторы), кроме одной, постоянны, а эта одна переменная меняется во всем интервале значений, и для этого набора значений первой переменной находят значения целевой функции. Затем все переменные, кроме следующей, полагаются постоянными, а, меняя вторую переменную, находят зависимость значений целевой функции от второй переменной. Далее необходимо произвести аналогичные процедуры, варьируя значения остальных переменных по отдельности, при этом в полном плане необходимо производить варьирование отдельных переменных при разных постоянных значениях остальных переменных, полагаемых константами. По сути классический многофакторный эксперимент представляет собой последовательность однофакторных экспериментов, однако формируемый набор результатов представляет собой совокупность данных достаточной большого объема, при обработке которого несложно допустить ошибки. В связи с этим, необходимо прибегнуть к использованию программ, позволяющих проводить эксперименты по полным классическим планам, исключающих возможность возникновения вычислительной ошибки, вызванной человеческим фактором.

В настоящее время существует немало подобных программ. Несмотря на различный интерфейс, процессы настройки плана эксперимента в них схожи: необходимо назначить количество факторов оптимизации и задать их пороговые значения, после чего произвести настройку визуализации результатов и приступить к проведению эксперимента. В результате будет получена форма целевой функции или поверхности варьируемых параметров.

### Метод поиска глобального экстремума целевой функции

С полученной кривой или поверхностью целевой функции необходимо произвести поиск ее глобального экстремума при помощи одного из существующих методов оптимизации. В данной работе предлагается проводить рассмотрение на примере метода градиентного спуска исходя из того, что он является базовым встроенным инструментом в большинство программных комплексов, позволяющих проводить оптимизацию.

В общем случае в методе градиентного спуска с дроблением шага последовательность поиска точки экстремума целевой функции  $x_k$  следующая [17].

1. В точке  $x_{k-1}$  необходимо определить направление спуска  $\omega_k = -grad f(x_{k-1})$  и вычислить производную  $(grad f(x_{k-1}), \omega_k) = -|\omega_k|^2$  по этому направлению (если  $|\omega_k| = 0$ , то  $x_{k-1}$  – искомая стационарная точка). Далее принимается  $\alpha_k = \alpha_0$ , где  $\alpha_0 > 0$  – некоторое произвольное значение, одинаковое на всех итерациях.

2. Необходимо найти точку  $x_k = x_{k-1} + \kappa_k \cdot \omega_k$  при помощи рекуррентного соотношения:

$$x_k = x_{k-1} + \kappa_k \cdot \omega_k = x_{k-1} - \kappa_k \cdot \text{grad } f(x_{k-1}).$$

Отсюда вычисляем значение  $f(x_k)$ ;

3. Далее необходимо проверить выполнение неравенства:

$$f(x_k) \leq f(x_{k-1}) - \omega_k \cdot |\omega_k|^2 \leq f(x_{k-1}) - \omega \cdot \kappa_k \cdot |\omega_k|^2,$$

где  $\omega \in (0,1)$ . Если оно не выполняется, то необходимо уменьшить значение  $\kappa_k$  и вернуться к предыдущему пункту. В противном случае на  $k$ -ой итерации необходимо зафиксировать использованное в предыдущем пункте значение  $\kappa_k$  и найденную точку  $x_k$ , которая и является экстремумом целевой функции.

### Алгоритм проведения оптимизации системы поддресоривания

На основе представленного анализа можно сформировать четкую последовательность шагов при подборе оптимальных параметров системы поддресоривания. Данный алгоритм универсален для различных подвесок автомобилей с его адаптацией к соответствующим типам элементов, входящих в состав системы поддресоривания. Полный алгоритм оптимизации приведен на блок-схеме (рис. 1).

На первом шаге необходимо назначить переменные – факторы и диапазоны их варьирования. Факторами в данном оптимизационном процессе являются конкретные параметры системы поддресоривания (табл. 2). Они могут иметь свои начальные значения для исходной конфигурации подвески, а если таковых нет, то следует их выбрать из искомым диапазонов значений далее, например, как средние между граничными значениями. После их ввода необходимо назначить диапазоны варьирования тем факторам, выбор которых осуществляется на основании рекомендаций научных исследований: скорости при открытии дросселирующих клапанов  $v_{\text{пш}}$ ; коэффициенту относительного затухания  $\psi_z$ ; отношению коэффициентов при сжатии/отбое  $n_{\text{ам}}$ . Данные диапазоны уже известны и определены для конкретной подвески конкретного ТС. После этого осуществляется подбор диапазонов значений диапазонов варьирования для параметров, ограниченных компоновкой автомобиля: статического прогиба рессоры, длины рессоры, рессорной колеи, длин закручивающихся участков стабилизатора, длин изгибающихся участков стабилизатора и диаметра стабилизатора. Выбор нужно делать не только на основании компоновочных соображений, но и других (номенклатура доступных изделий, сортамент материалов и т.д.).

Далее необходимо рассчитать граничные значения жесткости УЭ и, после определения факторов и граничных условий оптимизации, установить параметры целевой функции, построенной на базе критериев оптимизации. Для этого проводится моделирование с расчетом критериев для исходной конфигурации подвески, после чего определяются весовые коэффициенты  $k_i$  и  $b$ . С ними следует составить целевую функцию  $f$  и вычислить ее значение для исходных значений факторов. Перед проведением основного эксперимента необходимо предварительное моделирование для исключения слабовлияющих факторов, чтобы уменьшить количество испытаний в основном эксперименте. Данную процедуру необходимо выполнить путем проведения моделирования с последовательным перебором граничных значений диапазонов каждого фактора при неизменных исходных значениях остальных. После получения значений целевой функции следует составить последовательности значений критерия для каждого фактора с учетом раннего расчета при исходных параметрах и отследить характер данных последовательностей. При условии их монотонности и разницы крайних значений менее 10 %, фактор можно считать слабовлияющим и исключить его из дальнейшего основного эксперимента. С полученной целевой функцией, набором критериев и окончательным набором факторов необходимо провести полнофакторный эксперимент по классическому плану, который заключается в моделировании режимов движения для получения значений критериев для каждого значения варьируемого параметра. Для каждого фактора

следует рассчитать значение целевой функции  $f$  и по полученным значениям построить  $n$ -мерную поверхность отклика, где  $n$  – количество факторов оптимизации.

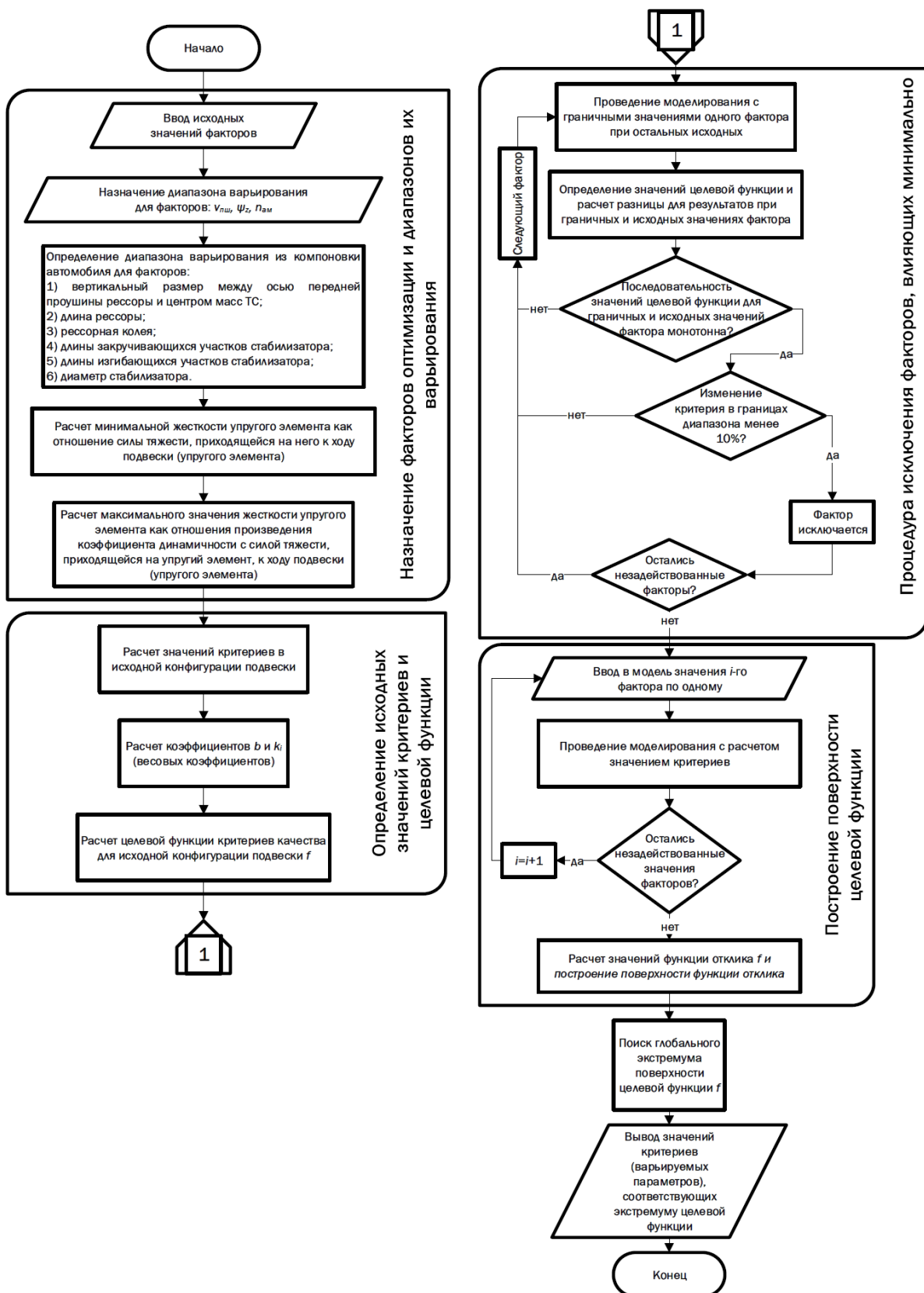


Рис. 1. Алгоритм оптимизации системы поддрессоривания

Fig. 1. Algorithm for optimizing vehicle springing system

На полученной поверхности необходимо найти глобальный экстремум – наименьшее значение целевой функции  $f$  и соответствующие ему значения параметров, которые будут являться оптимальными. Полученные значения параметров и целевой функции целесообразно сравнить с исходными с точки зрения рациональности внесения изменений в существующую конструкцию. Это может быть актуально в рамках снижения затрат на переоборудование и перенастройку производства.

### Заключение

В результате исследования разработан новый метод оптимизации системы поддрессирования, учитывающий ключевые элементы подвески: упругое, демпфирующее, направляющее устройство и стабилизатор поперечной устойчивости, также позволяющий варьировать их параметры. При выполнении алгоритма оптимизации минимизируется количество факторов за счет поиска и исключения слабовлияющих, а сама оптимизация проводится, не только исходя из соображений повышения плавности хода, но и с учетом управляемости и устойчивости ТС. В результате создан новый обобщенный вид целевой функции критериев качества системы поддрессирования, позволяющий комплексно оценить подвеску ТС.

### Библиографический список

1. **Максимов, Р.О.** Повышение комфорта водителей транспортных средств за счет применения управляемых амортизаторов подвески кабины / Р. О. Максимов // Грузовик. – 2023. – № 12. – С. 15-23. – DOI 10.36652/1684-1298-2023-12-15-23. – EDN ALXWJP.
2. **Котиев, Г.О.** Комплексное поддрессирование высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин / Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач. – М. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010 – 183 с.
3. **Жилейкин, М.М.** Повышение быстроходности многоосных колесных машин путем адаптивного управления упруго-демпфирующими элементами системы поддрессирования: диссертация ... доктора технических наук: 05.05.03 / Жилейкин Михаил Михайлович. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 280 с.
4. **Ротенберг, Р.В.** Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода / Р.В. Ротенберг. – М.: Машиностроение, 1972. – 392 с.
5. **Дмитриев, А.А.** Теория и расчет нелинейных систем поддрессирования гусеничных машин / А.А. Дмитриев, В.А., Чобиток, В.А. Тельминов. – М.: «Машиностроение», 1976. – 207 с.
6. ГОСТ 31191.1-2004 (ИСО 2631-1:1997). Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка ее воздействия на человека Часть 1. Общие требования: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2008-07-01. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – М.: Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем, 2009. – 24 с.
7. ГОСТ 12.1.012-90. Вибрационная безопасность. Общие требования: государственный стандарт Союза ССР: дата введения: 01.07.91. Система стандартов безопасности труда. – М.: Стандартиформ, 2006. – 30 с.
8. ГОСТ 31507-2012. Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний. – Введ. 2013-01-09. – М.: Стандартиформ, 2013. – 51 с.
9. ОСТ 37.001.487-89. Управляемость и устойчивость автомобилей. Общие технические требования. – Москва: Типография НАМИ, 1991. – 8 с.
10. **Пархиловский, И.Г.** Автомобильные листовые рессоры / И.Г. Пархиловский. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
11. **Рубанов, П.С.** Методика синтеза геометрии продольного профиля и конструктивных параметров листовой рессоры с применением метода конечных элементов / П.С. Рубанов, Р.О. Максимов, М.В. Четвериков // Тракторы и сельхозмашины. – 2024. – Т. 91, № 3. – С. 331-340. – DOI 10.17816/0321-4443-625745. – EDN YTOPXD.
12. **Четвериков, М.В.** Метод синтеза нагрузочной характеристики демпфирующего элемента системы поддрессирования транспортного средства / М.В. Четвериков, Р.О. Максимов, П.С. Рубанов // Тракторы и сельхозмашины. – 2024. – Т. 91, № 5. – С. 596-610. – DOI 10.17816/0321-4443-629308. – EDN INQWHL.

13. **Seward, D.** Race Car Design. – Lavenham Press Ltd. – Lavenham, 2014. – 287 p.
14. **Раймпель, Й.** Шасси автомобиля: Элементы подвески / Й. Раймпель. Пер. с нем. А.Л. Карпухина; под ред. Г.Г. Гридасова. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
15. **Мавлонов, М.Х.** Метод определения жесткости стабилизатора поперечной устойчивости произвольной формы / М.Х. Мавлонов, М.В. Четвериков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2025. – № 1(148). – С. 104-110. – DOI 10.46960/1816-210X\_2025\_1\_104. – EDN CWINBO.
16. **Шенк, Х** (мл.). Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. Пер. с англ. Е.Г. Коваленко. Под ред. чл.-кор. АН СССР Н. П. Бусленко. – М.: Мир, 1972. – 381 с.+
17. **Кусяк, В.А.** Проектирование автоматизированных мехатронных систем управления силовым агрегатом грузовых автомобилей и автопоездов / В.А. Кусяк, О.С. Руктешель. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2015. – 295 с. – EDN HZRLSQ.

### References

1. Maksimov R.O. Povyshenie komforta voditeley transportnykh sredstv za schet primeneniya upravlyaemykh amortizatorov podveski kabiny [Improving driver comfort by using controlled cab suspension shock absorbers]. *Gruzovik [Truck]*. 2023;(12):15-23. doi: 10.36652/1684-1298-2023-12-15-23. (in Russian).
2. Kotiev G.O., Sarach E.B. Kompleksnoe podressorivanie vysokopodvizhnykh dvukhzvennykh gusenichnykh mashin [Integrated suspension of highly mobile two-link tracked vehicles]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana; 2010. 183 p. (in Russian).
3. Zhileikin M.M. Povyshenie bystrokhodnosti mnogoosnykh kolesnykh mashin putem adaptivnogo upravleniya uprugodempfiruyushchimi elementami sistemy podressorivaniya: dissertatsiya ... doktora tekhnicheskikh nauk [Increasing the speed of multi-axle wheeled vehicles through adaptive control of elastic-damping elements of the suspension system: doctoral dissertation]. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana; 2012. 280 p. (in Russian).
4. Rotenberg R.V. Podveska avtomobilya. Kolebaniya i plavnost' khoda [Vehicle suspension. Oscillations and ride comfort]. Moscow: Mashinostroenie; 1972. 392 p. (in Russian).
5. Dmitriev A.A., Chobitok V.A., Tel'minov A.V. Teoriya i raschet nelineynykh sistem podressorivaniya gusenichnykh mashin [Theory and calculation of nonlinear suspension systems of tracked vehicles]. Moscow: Mashinostroenie; 1976. 207 p. (in Russian).
6. GOST 31191.1-2004 (ISO 2631-1:1997). Vibratsiya i udar. Izmerenie obshchey vibratsii i otsenka ee vozdeystviya na cheloveka. Chast' 1. Obshchie trebovaniya: natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii [Vibration and shock. Measurement of whole-body vibration and assessment of its effects on humans. Part 1. General requirements: national standard of the Russian Federation]. Moscow: Nauchno-issledovatel'skiy tsentr kontrolya i diagnostiki tekhnicheskikh sistem; 2009. 24 p. (in Russian).
7. GOST 12.1.012-90. Vibratsionnaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya: gosudarstvennyy standart Soyuzo SSR. Sistema standartov bezopasnosti truda [Vibration safety. General requirements: state standard of the USSR. Occupational safety standards system]. Moscow: Standartinform; 2006. 30 p. (in Russian).
8. GOST 31507-2012. Avtotransportnye sredstva. Upravlyaemost' i ustoychivost'. Tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy [Motor vehicles. Handling and stability. Technical requirements. Test methods]. Moscow: Standartinform; 2013. 51 p. (in Russian).
9. OST 37.001.487-89. Upravlyaemost' i ustoychivost' avtomobilye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya [Vehicle handling and stability. General technical requirements]. Moscow: Tipografiya NAMI; 1991. 8 p. (in Russian).
10. Parkhilovskiy I.G. Avtomobil'nye listovye resory [Automotive leaf springs]. 2nd ed., rev. and suppl. Moscow: Mashinostroenie; 1978. 232 p. (in Russian).
11. Rubanov P.S., Maksimov R.O., Четвериков M.V. Metodika sinteza geometrii prodol'nogo profilya i konstruktivnykh parametrov listovoy resory s primeneniem metoda konechnykh elementov [Method for synthesizing the longitudinal profile geometry and design parameters of a leaf spring using the finite element method]. *Traktory i sel'khoz mashiny [Tractors and Agricultural Machinery]*. 2024;91(3):331-340. doi: 10.17816/0321-4443-625745. (in Russian).
12. Четвериков M.V., Maksimov R.O., Rubanov P.S. Metod sinteza nagruzochnoy kharakteristiki dempфирuyushchego elementa sistemy podressorivaniya transportnogo sredstva [Method for synthesizing the load characteristic of a damping element of a vehicle suspension system]. *Traktory i*

- sel'khoz mashiny [Tractors and Agricultural Machinery]. 2024;91(5):596-610. doi: 10.17816/0321-4443-629308. (in Russian).
13. Seward D. Race Car Design. Lavenham: Lavenham Press Ltd; 2014. 287 p.
  14. Reimpel' Y. Shassi avtomobilya: Elementy podveski [Automotive chassis: Suspension components]. Karpukhin A.L., translator. Gridasov G.G., editor. Moscow: Mashinostroenie; 1987. 288 p. (in Russian).
  15. Mavlonov M. Kh., Chetverikov M.V. Metod opredeleniya zhestkosti stabilizatora poperechnoy ustoichivosti proizvol'noy formy [Method for determining the stiffness of an arbitrary-shaped anti-roll bar]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2025;(1(148)):104-110. doi: 10.46960/1816-210X\_2025\_1\_104. (in Russian).
  16. Shenk Kh. Teoriya inzhenerenogo eksperimenta [Theory of engineering experiment]. Kovalenko E.G., translator. Buslenko N.P., editor. Moscow: Mir; 1972. 381 p. (in Russian).
  17. Kussyak V.A., Rukshel' O.S. Proektirovanie avtomatizirovannykh mekhatronnykh sistem upravleniya silovym agregatom gruzovykh avtomobiley i avtopoezdov [Design of automated mechatronic control systems for the power unit of trucks and road trains]. Minsk: Belorusskiy natsional'nyy tekhnicheskiy universitet; 2015. 295 p. (in Russian).

*Дата поступления  
в редакцию: 17.11.2025*

*Дата принятия  
к публикации: 18.02.2026*

## НАШИ АВТОРЫ

### ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

**Волокитин Валентин Дмитриевич** – старший преподаватель Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

**Козелков Андрей Сергеевич** – руководитель Научно-исследовательской лаборатории математического моделирования в индустриальных и фундаментальных исследованиях Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук

**Корнев Александр Владимирович** – главный конструктор суперкомпьютерных технологий публичного акционерного общества «Объединенная авиастроительная корпорация»

**Котов Александр Владимирович** – младший научный сотрудник Федерального исследовательского центра Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук

**Мееров Иосиф Борисович** – заведующий кафедрой Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, канд. техн. наук

**Перевалов Сергей Евгеньевич** – младший научный сотрудник Федерального исследовательского центра Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук

**Родимков Юрий Александрович** – инженер 2 категории Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

**Саразов Алексей Владимирович** – старший научный сотрудник Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики, канд. физ.-мат. наук

**Соловьев Александр Андреевич** – заместитель заведующего отделом по научной работе Федерального исследовательского центра Института прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, д-р физ.-мат. наук

**Шамин Алексей Анатольевич** – проректор по информатизации и цифровому развитию Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, канд. экон. наук

### ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

**Доронков Денис Владимирович** – старший научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

**Душев Сергей Анатольевич** – главный конструктор АО «ОКБМ Африкантов», канд. техн. наук

**Кудряшов Дмитрий Андреевич** – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

**Курицин Даниил Дмитриевич** – младший научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Лапшин Денис Александрович** – начальник бюро отдела прочности АО «ОКБМ Африкантов», канд. техн. наук

**Легчанов Максим Александрович** – директор ИЯЭиТФ Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент

**Николаев Данил Сергеевич** – младший научный сотрудник НИЛ Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Пичков Сергей Николаевич** – ведущий конструктор АО «ОКБМ Африкантов», профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Рязанов Антон Владимирович** – старший научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

**Солнцев Дмитрий Николаевич** – заведующий лабораторией Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

**Шорохов Владислав Владимирович** – специалист АО «ОКБМ Африкантов»

## **МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО**

**Бруй Даниил Андреевич** – ассистент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

**Бутарович Дмитрий Олегович** – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, директор ИЦ им. А.А. Липгарта «Группа ГАЗ», канд. техн. наук

**Гараев Рафаэль Ильдарович** – студент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

**Кобзаренко Василий Борисович** – студент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

**Левенков Ярослав Юрьевич** – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

**Летопольский Антон Борисович** – доцент Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), канд. техн. наук

**Манянин Сергей Евгеньевич** – доцент Нижегородского государственного техническо-

го университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Молев Юрий Игоревич** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Прошин Димитрий Николаевич** – старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Тетерина Ирина Алексеевна** – старший научный сотрудник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета (СибАДИ), канд. техн. наук

**Чакров Николай Иванович** – старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Четвериков Михаил Викторович** – инженер-конструктор ООО «Инновационный центр «КАМАЗ»; преподаватель Московского политехнического университета

## 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, подрисовочная подпись 11 жирный кегль, ссылки на рисунки: (рис. 1).

---

## **РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПРИНИМАЮТСЯ:**

**2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации**

**2.3.8 – Информатика и информационные процессы**

Валерий Павлович Хранилов: [\*\*hranilov@nttu.ru\*\*](mailto:hranilov@nttu.ru)

**2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл,  
радиационная безопасность**

Максим Александрович Легчанов: [\*\*legchanov@nttu.ru\*\*](mailto:legchanov@nttu.ru)

**2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы**

Юрий Игоревич Молев: [\*\*rsl@nttu.ru\*\*](mailto:rsl@nttu.ru)

16+

**ТРУДЫ НГТУ  
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

**№ 2 (153)**

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**

*Редакция:*  
603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24  
rsl@nntu.ru  
Свободная цена

Подписано в печать: 10.06.2026. Дата выхода в свет 23.06.2026. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
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