

ISSN 1816-210X

# ТРУДЫ НГТУ

ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

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

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

*Журнал издается с 2010 года*

**№ 3 (146)**

**Нижний Новгород 2024**

УДК 050(06)  
ББК 9я54  
Т 78

Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2024. № 3 (146). – 132 с.

*Выходит 4 раза в год*

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

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

**Главный редактор А.А. Куркин**

### **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

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

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

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

**Ю.И. Молев** – ответственный секретарь рубрики  
«Машиностроение и транспорт: теория, технологии, производство»

В.И. Казакова (ответственный редактор)

А.В. Крылова (ответственный секретарь)

### **РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

**Председатель**

*Сергей Михайлович Дмитриев*

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

### **ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА**

*Пелиновский Дмитрий Ефимович*

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

*Палкович Ласло*

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

*Варлаки Петер*

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

*Виджай Кумар Чакка*

PhD, проф., Университет Шив Надар, Индия

*Ялчинер Ахмет*

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

### **УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:**

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

Электронная версия журнала:  
<https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-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, 2024

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

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

*Published since 2010*

**№ 3 (146)**

**Nizhny Novgorod 2024**



*The journal is issued 4 times a year*

**The journal is included in HAC Ministry of Education and Science**

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

**Editor-in-Chief A.A. Kurkin**

**EDITORIAL BOARD**

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

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

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

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

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

**EDITORIAL COUNCIL**

**Chairman**

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

**Members of Editorial Council**

*Pelinovski Dmitri*

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

*László Palkovics*

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

*Péter Várlaki*

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

*Vijay Kumar Chakka*

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

*Yalciner Akhmet*

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

**EDITOR AND PUBLISHER:**

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

*The certificate on registration of periodic printed editions:*

*ИИ № 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, 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ .....</b>	<b>7</b>
<b>Бураго П.Н., Хранилов В.П., Эгамов А.И.</b> Стратегия управления ресурсом информационной безопасности корпоративных проблемно-ориентированных компьютерных систем .....	<b>7</b>
<b>Санников Н.А., Епифанова А.С., Рыбин А.В., Епифанов С.А.</b> Приложение для удаленного взаимодействия с базой данных наблюдений апвеллингов .....	<b>14</b>
<b>Тряев П.В., Крестьянинов П.А., Малышев Г.С., Наумов А.Е., Герасимов Е.А.</b> Применение сверточных нейронных сетей для выявления дефектов гранул ионообменных сорбентов ядерного класса .....	<b>25</b>
<b>ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ .....</b>	<b>36</b>
<b>Полуничев В.И., Сосин В.М., Савельев А.Ю.</b> Аналитический обзор систем компенсации давления в первом контуре судовых реакторных установок .....	<b>36</b>
<b>Теплякова С.С., Горбунов В.А., Лоншаков Н.А., Мечтаева М.Н., Минеев П.А.</b> Анализ влияния вторичных энергетических ресурсов на эффективность эксплуатации энергоблоков АЭС .....	<b>48</b>
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>62</b>
<b>Бузунов Н.В., Пирожков Р.Д.</b> Имитационная модель гидростатической трансмиссии в режиме реального времени .....	<b>62</b>
<b>Капустин А.Г., Макаров В.С., Марковнина А.И., Гулин М.С.</b> Моделирование оригинальных топливных баков спортивного грузовика, разработанного для участия в автомобильных соревнованиях по пересеченной местности .....	<b>72</b>
<b>Клубничкин Е.Е., Клубничкин В.Е.</b> Выбор критерия оценки влияния типажа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин на эффективность трелевочного процесса .....	<b>82</b>
<b>Лелиовский К.Я., Молев Ю.И., Хамитов А.Р., Вахидов У.Ш., Аникин А.А., Коростелев С.А.</b> Классификация неисправностей специальной техники, работающей на Крайнем Севере .....	<b>97</b>
<b>Рубанов П.С., Гончаров Р.Б., Поляков А.О., Хренов И.О.</b> Совершенствование конструкции несущей системы полуприцепа на стадии проектирования путем параметрической оптимизации .....	<b>108</b>
<b>Филин И.А., Орлов Л.Н., Наумов В.Н., Кулепов В.Ф., Манянин С.Е.</b> Совершенствование кузова автомобиля по требованиям пассивной безопасности при лобовом столкновении .....	<b>120</b>
<b>НАШИ АВТОРЫ .....</b>	<b>128</b>

## CONTENTS

<b>COMPUTER SCIENCE, MANAGEMENT AND SYSTEM ANALYSIS .....</b>	<b>7</b>
<b>P.N. Burago, V.P. Khranilov, A.I. Egamov.</b> Strategy for information security resource management of corporate problem-oriented computer systems .....	<b>7</b>
<b>N.A. Sannikov, A.S. Epifanova, A.V. Rybin, S.A. Epifanov.</b> WEB application for remote interaction with upwelling observations database .....	<b>14</b>
<b>P.V. Tryaev, P.A. Krestianinov, G.S. Malyshev, A.E. Naumov, E.A. Gerasimov.</b> The use of convolutional neural networks to identify defects in nuclear class ion-exchange sorbent granules ..	<b>25</b>
 <b>NUCLEAR POWER AND ATOMIC POWER ENGINEERING .....</b>	 <b>36</b>
<b>V.I. Polunichev, V.M. Sosin, A.Yu. Savelyev.</b> Review of pressure compensation systems in primary circuit of nuclear marine reactors .....	<b>36</b>
<b>S.S. Teplyakova, V.A. Gorbynov, N.A. Lonshakov, M.N. Mehtaeva, P.A. Mineev.</b> Analysis of impact of secondary energy resources on NPP power units efficiency .....	<b>48</b>
 <b>MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION .....</b>	 <b>62</b>
<b>N.V. Buzunov, R.D. Pirozhkov.</b> Real-time simulation model of hydrostatic transmission .....	<b>62</b>
<b>A.G. Kapustin, V.S. Makarov, A.I. Markovkina, M.S. Gulin.</b> Simulation of novel fuel tanks for sports truck designed for participation in cross-terrain automobile competitions .....	<b>72</b>
<b>E.E. Klubnichkin, V.E. Klubnichkin</b> Selection of criterion for assessing impact of type and load capacity of loading and transport vehicles on efficiency of skidding .....	<b>82</b>
<b>K.Ya. Leliovskij, Y.I. Molev, A.R. Khamitov, U.Sh. Vakhidov, A.A. Anikin, S.A. Korostelev.</b> Classification of malfunctions of special equipment operating in the Far North .....	<b>97</b>
<b>P.S. Rubanov, R.B. Goncharov, A.O. Polyakov, I.O. Khrenov.</b> Parametric optimization for improving design of semi-trailer load-bearing system at design stage .....	<b>108</b>
<b>I.A. Filin, L.N. Orlov, V.N. Naumov, V.F. Kulepov, S.E. Manyanin.</b> Car body improvement according to requirements of passive safety in head-on collision .....	<b>120</b>
 <b>AUTHORS .....</b>	 <b>128</b>

---

# ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

---

УДК 519.863

EDN: MPWBAG

## СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСОМ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОРПОРАТИВНЫХ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

**П.Н. Бураго**

ORCID: 0000-0002-8010-906X e-mail: burago.pasha@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

*Нижний Новгород, Россия***В.П. Хранилов**

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

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

*Нижний Новгород, Россия***А.И. Эгамов**

ORCID: 0000-0002-3630-7237 e-mail: albert.egamov@itmm.unn.ru

Национальный исследовательский

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

*Нижний Новгород, Россия*

Рассмотрена задача распределения ресурсов для обеспечения информационной безопасности корпоративных проблемно-ориентированных информационных систем в течение определенного времени (периода). В реальной ситуации ее математическая модель сводится к задаче дискретной оптимизации – модифицированной задаче о назначениях, к которой неприменимы алгоритмы и методы решения, используемые в классическом варианте. Для поиска оптимального решения при определенных условиях применим эвристический метод, основанный только на знании изначальной стоимости средств защиты информации. Проанализированы частные случаи выбора оптимальной стратегии решения и условия, при которых она будет квазиоптимальной. Показана эффективность использования данной стратегии.

**Ключевые слова:** дискретная оптимизация, задача о назначениях, средства защиты информации, эвристическая стратегия.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Бураго, П.Н. Стратегия управления ресурсом информационной безопасности корпоративных проблемно-ориентированных компьютерных систем / П.Н. Бураго, В.П. Хранилов, А.И. Эгамов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 7-13. EDN: MPWBAG

## STRATEGY FOR INFORMATION SECURITY RESOURCE MANAGEMENT OF CORPORATE PROBLEM-ORIENTED COMPUTER SYSTEMS

**P.N. Burago**

ORCID: 0000-0002-8010-906X e-mail: burago.pasha@yandex.ru

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**V.P. Khranilov**

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

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

**A.I. Egamov**

ORCID: **0000-0002-3630-7237** e-mail: **albert.egamov@itmm.unn.ru**

Nizhny Novgorod State University N.I. Lobachevsky  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The article considers the task of allocating financial resources to ensure the information security of corporate problem-oriented information systems for a certain period of time. In a real situation, its mathematical model is reduced to a discrete optimization problem – a modified assignment problem, but the algorithms and solution methods that are applied to the classical assignment problem are not applicable. A heuristic method based only on knowledge of the initial cost of information security tools can be used to find the optimal solution under certain conditions. The special cases in which it is possible to choose the optimal strategy and the conditions under which it will be quasi-optimal are analyzed. The example is given that clearly demonstrates the effectiveness of proposed heuristic strategy.

**Key words:** discrete optimization, assignment problem, information security tools, heuristic strategy.

**FOR CITATION:** P.N. Burago, V.P. Khranilov, A.I. Egamov. Strategy for information security resource management of corporate problem-oriented computer systems. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 7-13. EDN: MPWBAG

## Введение

Большинство задач, связанных с распределением ресурсов, относится к сфере дискретной оптимизации, где невозможно использование градиентных методов, имеющих главное значение в непрерывной оптимизации. В то же время решение таких задач, в силу конечного числа объектов, часто можно найти полным перебором вариантов. Дискретная математика способна предоставить совокупность методов и алгоритмов, относящихся к т.н. *конечной математике*, изучающей конечные числовые структуры. Данное направление получает интенсивное развитие вместе со стремительным развитием компьютерной техники и ее постоянно растущим быстродействием, которое позволяет быстро и качественно обработать практически любое конечное множество. Дискретная оптимизация [1] объединяет такие важные прикладные задачи, как «транспортная задача», «задача о рюкзаке», «задача о коммивояжере» и т.п. В их число входит и «задача о назначениях» [2], которая находит непосредственное применение при решении различных современных математико-экономических проблем.

Обеспечение устойчивого функционирования, безопасности и защиты информации является одним из приоритетных направлений деятельности для руководства любой промышленной компании, в бизнес-модели которой задействованы цифровые активы. Однако стремление к предельной коммерциализации и максимальной прибыли должно быть тесно связано с минимизацией убытков вследствие угроз информационной безопасности (ИБ), а также в связи с неоптимальным финансированием функции ИБ. В данной статье рассмотрена модель выбора оптимального алгоритма распределения инвестиций, выделенных на обеспечение ресурса информационной безопасности компании с учетом угроз и рисков.



## 2. Постановка задачи

Рассмотрим задачу распределения приоритетов при выборе и покупке различных средств защиты, необходимых для обеспечения информационной безопасности компонентов информационного ландшафта компании и минимизации затрат на обеспечение комплексной защиты. Предположим, существует некая проблемно-ориентированная организация, у которой есть  $n$  различных групп информационных активов. Они подвержены различным видам информационных угроз и в данной задаче являются объектами защиты:

- внешний сетевой периметр;
- внутренняя сеть;
- бэк-офисные системы;
- бизнес-системы;
- серверное оборудование;
- СУБД;
- АРМы работников и эксплуатационного персонала;
- интеграционные компоненты;
- инструменты виртуализации и контейнеризации;
- прочее.

В категорию «прочее» могут быть отнесены любые специфические для различных отраслей активы, например, для судоходной отрасли – информационные системы на судах, для финансовой отрасли – банкоматы и платежные терминалы, для телекоммуникационной компании – технологический сегмент сетей связи и т.п.

Альтернативно в данной задаче в качестве таких групп информационных активов могут быть рассмотрены информационные бизнес-системы, состоящие, в том числе, из различных компонентов:

- сетевой инфраструктуры;
- серверного оборудования;
- АРМ;
- СУБД;
- приложений;
- прикладного ПО;
- интеграционных компонентов.

Для обеспечения ИБ каждой группы активов нужно внедрить одно или несколько средств защиты информации (СЗИ). На их закупку и внедрение выделен определенный конечный бюджет, однако расходовать его можно только поэтапно, чтобы равномерно распределить затраты на ИБ для организации по временному периоду, например, в течение года, и избежать вопросов со стороны контролирующих органов, например, совета директоров. Также разовая покупка всех необходимых средств защиты может привести к неоптимальным затратам и простою приобретенных СЗИ, так как ресурсы подразделения ИБ ограничены, и одновременное внедрение всех данных СЗИ не представляется возможным.

Подобная задача о поэтапном выделении финансовых средств также может быть применима для организаций малого и среднего бизнеса, в которых руководитель выделяет их на обеспечение ИБ из полученной прибыли один раз в месяц. Основным риском в данной задаче являются: недоступность актива (группы активов) в связи с реализовавшимся инцидентом ИБ и финансовые потери (включая недополученную прибыль), которые понесет организация в связи с недоступностью определенного актива (группы активов). Стоимость группы активов может быть оценена финансовым подразделением в виде прогноза на предстоящий финансовый период на основании информации о полученной прибыли за текущий период. Под стоимостью актива в данном случае подразумевается прибыль, которую данный актив гене-

рирует за ограниченный отчетный период. Целью является минимизация убытков, которые организация понесет в случае полной или частичной недоступности данного актива.

### 3. Математическая модель минимизации ресурсов

Пусть имеется  $n$  информационных активов организации и средств защиты предприятия. Занумеруем их от 1 до  $n$ . Покупка СЗИ для них осуществляется на периодической основе. Предположим, цена СЗИ для  $i$ -й группы активов в  $j$ -й период равна  $c_{ij}$  рублей,  $c_{ij} > 0$ . Таким образом, определяется матрица  $C$  порядка  $n \times n$ , а на обеспечение всей СЗИ организации будет потрачено  $f(\eta) = \sum_{j=1}^n c_{\eta(j)j}$ , где  $\eta$  – перестановка чисел от 1 до  $n$ , число  $\eta(j)$  означает номер актива, для обеспечения информационной безопасности которого в  $j$ -м периоде купили и внедрили соответствующее СЗИ. Задача руководителя подразделения ИБ состоит в том, чтобы минимизировать функцию  $f(\eta)$ .

При известной платежной матрице  $C$  представленная задача сводится к известной задаче о назначениях. Исторически первым и наиболее популярным из методов решения задачи о назначениях является венгерский алгоритм, разработанный Харальдом Куном в 1955 г. [3, 4]. В реальной жизни изначально (до начала первой покупки) вся матрица  $C$  неизвестна, она заполняется в начале каждого периода – в начале  $j$ -го периода становится известен  $j$ -й столбец. Поэтому для практического решения поставленной задачи нужны другие, эвристические алгоритмы [5]. Схожая задача минимизации финансовых трат на компоненты для защиты от киберугроз рассматривалась в [6], а задача максимизации выхода конечного продукта прибыли на предприятии и агропромышленного комплекса изучалась в [7-9].

Ниже приводится эвристическая стратегия, которая при условии равного отношения цен СЗИ всех групп активов для каждой пары смежных периодов покупок (отношение зависит только от  $j$ ) является оптимальной. Для ее использования достаточно знания только начальных цен СЗИ групп активов (первого столбца матрицы  $C$ ).

Для определенности предположим, что все  $c_{i1}$  различны. Обозначим  $B_{ij} = \frac{c_{ij}}{c_{i1}}$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, n}$  и найдем оптимальную стратегию для руководителя ИБ, минимизирующую траты на покупку средств защиты.

### 4. Эвристическая стратегия

Рассматривается частный случай, когда изменение отношения стоимости активов для каждой пары смежных периодов зависит только от номера периода, т.е.:

$$B_{ij} = b_j, \quad i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Условие равного отношения цен СЗИ всех групп активов для каждой пары смежных периодов покупок и условие (1) эквивалентны. Действительно,

$$\theta_j = \frac{c_{ij+1}}{c_{ij}} = \frac{c_{i1}B_{ij+1}}{c_{i1}B_{ij}} \Rightarrow B_{ij+1} = \theta_j B_{ij},$$

так как  $B_{i1} = 1$  при любом  $i = \overline{1, n}$ , то параметры  $B_{ij}$  зависят только от  $j$  и выполняется условие (1). С другой стороны, при выполнении условия (1) верны равенства

$$\frac{c_{ij+1}}{c_{ij}} = \frac{c_{i1}B_{ij+1}}{c_{i1}B_{ij}} = \frac{b_{j+1}}{b_j}, \quad \text{при всех } i = \overline{1, n}. \quad \text{Эквивалентность доказана.}$$

При этих условиях целевая функция имеет вид:

$$f(\eta) = \sum_{j=1}^n c_{\eta(j)} b_j. \quad (2)$$

Известно [10]:

*Перестановочное неравенство. Имеются два  $m$ -мерных вектора  $\bar{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)^T$  и  $\bar{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)^T$ . Их скалярное произведение  $\bar{\alpha} \cdot \bar{\beta} = \sum_{i=1}^m \alpha_i \beta_i$*

*минимально, если выполняются неравенства:  $\alpha_1 \geq \alpha_2 \geq \dots \geq \alpha_m$  и  $\beta_1 \leq \beta_2 \leq \dots \leq \beta_m$ ;*

*максимально, если выполняются неравенства:  $\alpha_1 \geq \alpha_2 \geq \dots \geq \alpha_m$  и  $\beta_1 \geq \beta_2 \geq \dots \geq \beta_m$ .*

Расставим слева направо числа  $b_j$  в порядке возрастания, а числа  $c_{i1}$  – в порядке убывания. Перестановка  $\mu$  чисел от 1 до  $n$  такая, что  $\mu(j)$  – это номер в конечной последовательности, описанной выше, параметра  $b_j$  при расчете слева направо. Перестановка  $\gamma$  чисел от 1 до  $n$  такая, что  $i = \gamma(s)$ , если число  $c_{i1}$  в последовательности стоит на  $s$ -ом месте. Отсюда следует, что  $\gamma^{-1}(i) = \mu(j)$ , если номера мест в соответствующих последовательностях чисел  $b_j$  и  $c_{i1}$  равны. Таким образом, описанные выше перестановки отвечают случаю, когда значение функции в формуле (2) минимально.

Поэтому для исходной матрицы  $C$  оптимальная перестановка  $\eta^*(j) = \gamma(\mu(j))$  и, чтобы минимизировать  $f(\eta)$ , осуществлять покупки нужно согласно правилу: в  $j$ -м периоде покупать оборудование для  $\gamma(\mu(j))$ -й группы активов.

Для удобства можно переставить строки матрицы  $C$  так, чтобы  $\gamma(\mu(j))$ -я строка была бы  $j$ -й строкой. Получим матрицу  $\tilde{C}$  с элементами  $\tilde{c}_{ij} = \tilde{c}_{i1} b_j$ , в этом случае оптимальной будет являться тождественная перестановка.

## 5. Частные случаи применения

Использование предложенного метода эффективно, когда априори известно расположение относительно друг друга построенной по возрастанию членов последовательности  $b_j$ . Приведем два примера.

На практике нередко встречается случай, когда выполняется условие (1), и цены на СЗИ всех групп активов монотонно возрастают, т.е. последовательность  $b_j$  монотонно возрастает, что означает  $\mu \equiv \varepsilon$ , а значит  $\eta^*(j) = \gamma(j)$ , необходимо придерживаться следующей стратегии (ее можно назвать «по убыванию элементов первого столбца»): осуществлять покупки нужно соответственно убыванию начальной цены  $c_{i1}$ , т.е. начинать с самого дорогого СЗИ первого столбца и заканчивать покупкой самого дешевого.

Предположим, что выполняется условие (1) и известно, что вначале в течение  $k$  периодов цена на СЗИ для всех групп активов будет падать, а потом взлетит, начиная с  $(k+1)$ -го периода, будет выше изначальной и после только возрастать. Этот вариант развития событий тоже часто встречается на практике, особенно при небольших  $k$ . Согласно вышеописанному методу, оптимальным является следующий вариант закупок. Вначале покупается СЗИ для той группы активов, чья начальная цена является  $k$ -ой по счету, если начальные цены расставить в порядке убывания. Затем для того, у которого начальная цена расположена на  $(k-1)$ -ом месте, ..., в  $k$ -й период покупается СЗИ для группы активов с максимальной начальной ценой. Начиная с  $(k+1)$ -го периода покупки осуществляются по убыванию начальной цены СЗИ оставшихся  $n-k$  групп активов.

## 6. Пример

Нетрудно заметить, что подобной стратегией (в этом случае она, как правило, будет квазиоптимальной) можно пользоваться и когда условие (1) не выполняется, но для каждого  $j$ ,  $j = \overline{1, n}$ , все  $B_{ij}$  при любом  $i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , принадлежат малой окрестности некоторой точки  $\tilde{b}_j$ , т.е., когда влияние на цену блоков оказывает, в основном, временной параметр. Приведем пример применения вышеописанной методики в случае невыполнения условия (1). Для получения квазиоптимального решения желательно, чтобы «разброс»  $B_{ij}$  был небольшим, и почти все значения  $B_{ij}$  при фиксированном  $j$  лежали бы по одну сторону от числа 1, т.е. почти все значения  $B_{ij}$  при фиксированном  $j$  были бы не больше начальной цены или не меньше ее. В табл. 1 приведены цены, которые могут быть потрачены для защиты от киберугроз информационных групп активов одной крупной промышленной организации в каждый из восьми месяцев 2022 г., т.е. фактически задана матрица  $C$ . В начале 2022 г., естественно, известны цены только за январь и некая информация о поведении цен в 2021 г. (например, что они всегда не убывали).

*Таблица 1.*  
Цены на СЗИ группы активов за 8 периодов 2022 г. (млн руб.)

*Table 1.*  
Prices for information security tools of the asset group for 8 periods of 2022 (million rubles)

		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	<b>СЗИ – Внешний сетевой периметр</b>	1	11.5	12	12	12.5	12.5	13	14
2	<b>СЗИ – Внутренняя сеть</b>	27.5	28.5	29.8	30	31	31	32	33
3	<b>СЗИ – Бизнес-системы</b>	34.5	35.5	35.5	35.5	36.5	36.5	36.5	37
4	<b>СЗИ – Серверное оборудование</b>	30	30	31	31.5	32.5	33.5	34	35
5	<b>СЗИ – СУБД</b>	34	34	35.5	36	36.8	37.7	38.5	39
6	<b>СЗИ – Интеграционные компоненты</b>	7	7	7.2	7.4	7.5	7.6	7.8	8
7	<b>СЗИ – Бэк-офисные системы; АРМы работников и Инструменты виртуализации</b>	8	8.4	8.8	9	9.2	9.4	9.8	10
8	<b>СЗИ – Прочее</b>	32	33	34	34.7	34.8	35.5	36.5	37.5

Таким образом, применение стратегии «по убыванию элементов первого столбца» позволяет получить значение целевой функции – 195.3. Вычисления по венгерскому алгоритму (в данной модификации задачи не реализуемого на практике) апостериори дают оптимальный результат, равный 193.1, т.е. относительная погрешность предложенного в статье метода – 1.14 %. Эти результаты показывают, что предложенная эвристическая стратегия в данном случае является квазиоптимальной.

Рассмотрим другие интуитивно понятные стратегии. Стратегия покупок, основанная на тождественной перестановке (выбираются элементы, стоящие на главной диагонали матрицы), дает в результате – 198.2. Стратегия покупок, основанная на перестановке элементов тождественной перестановки в обратном порядке (выбираются элементы, стоящие на побочной диагонали), дает в результате – 198.6. Стратегия покупок, когда на каждом этапе выбирается минимальный элемент из «невыбранных» до этого момента строк, дает в результате – 200.9. Стратегия покупок, когда на каждом этапе выбирается максимальный элемент из «невыбранных» до этого момента строк, дает в результате также 195.3, так как при этой страте-

гии принцип выбора элемента столбца схож с принципом выбора стратегии «по убыванию элементов первого столбца». Эти результаты свидетельствуют об эффективности представленной стратегии, которая при определенных условиях имеет несомненное право на практическое применение.

## 7. Заключение

Рассмотрена задача распределения ресурса информационной безопасности корпоративной проблемно-ориентированной информационной системы в течение определенного времени (8 периодов), которая при определенной информации сводится к модифицированной задаче о назначениях. Ее постановка не позволяет найти оптимальное решение априори. Показан оптимальный результат при распределении ресурсов при некоторых дополнительных условиях. Предложена эвристическая стратегия, позволяющая получить оптимальный (или квазиоптимальный) результат. Дополнительные условия не являются искусственными. На примере реального предприятия продемонстрирована эффективность данной стратегии.

## Библиографический список

1. **Леонтьев, В.К.** Дискретная оптимизация // ЖВМ и МФ. 2007. Т. 47. № 2. С. 338-352.
2. **Rainer, В.** Assignment problems / В. Rainer, М. Dell'Amico, S. Martello – Society for Industrial and Applied Mathematics. USA, Philadelphia, 2009. 382 p.
3. **Kuhn, H.W.** The Hungarian Method for the assignment problem. Naval Research Logistics Quarterly. 1955. 2. Pp. 83-97.
4. **Банди, Б.** Основы линейного программирования / Б. Банди – М.: Радиоисвязь, 1989. – 176 с.
5. **Попов, В.Б.** Глава 7. Метаэвристические алгоритмы для задач экономической оптимизации и прогнозирования // Информационная экономика: развитие, управление, модели: коллективная монография. Симферополь, 2017. С. 401-416.
6. **Khranilov, V.P., Burago, P.N., Egamov, A.I.** Mathematical Model DDS for Information Security Management of the Organization. E3S Web of Conferences. 2024. № 537. 09009.
7. **Balandin, D.V.** Mathematical Modelling and Optimization of Scheduling for Processing Beetin Sugar Production / D.V. Balandin et al. / In book: Balandin D., Barkalov K., Meyerov I. (eds). Communications in Computer and Information Science. 2022. № 1750. Pp. 227-238.
8. **Баландин, Д.В.** Математическая модель и комбинированный квазиоптимальный алгоритм процесса переработки сахарной свеклы / Д.В. Баландин и др. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2023 (2). С. 62-76.
9. **Egamov, A.I.** Mathematical Model of Processing Batches of Raw Materials Taking into Account Ripening Process // In book: Balandin D., Barkalov K., Meyerov I. (eds) Communications in Computer and Information Science. 2023. № 1914. Pp. 190-205.
10. **Радзивиловский, Л.В.** Обобщение перестановочного неравенства и монгольское неравенство // Математическое просвещение. 2006. Вып. 10. С. 210-224.

*Дата поступления  
в редакцию: 18.05.2024*

*Дата принятия  
к публикации: 31.07.2024*



УДК 004.415.2

EDN: VMWYAT

## ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ УДАЛЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С БАЗОЙ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ АПВЕЛЛИНГОВ

**Н.А. Санников**

ORCID: 0000-0001-9609-9786 e-mail: sannikov\_na@mail.ru

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

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

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

ORCID: 0000-0001-5084-3610 e-mail: arybin93@gmail.com

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

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

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

Дано описание веб-приложения для удаленного взаимодействия с базой данных наблюдений апвеллингов, содержащей информацию о собранных из литературных источников случаях подъемов глубинных вод к поверхности водоемов. Рассмотрены поля базы данных, схема работы приложения, входящие в него структурные элементы, приведены примеры реализации графического интерфейса. Разработанный программный продукт может применяться при разработке устойчивых стратегий использования природных ресурсов прибрежных зон и оптимизации экономической деятельности на шельфе.

**Ключевые слова:** веб-приложение, Django, Python, база данных, апвеллинг, Мировой океан.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Санников, Н.А. Приложение для удаленного взаимодействия с базой данных наблюдений апвеллингов / Н.А. Санников, А.С. Епифанова, А.В. Рыбин, С.А. Епифанов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 14-24. EDN: VMWYAT

## WEB APPLICATION FOR REMOTE INTERACTION WITH UPWELLING OBSERVATIONS DATABASE

**N.A. Sannikov**

ORCID: 0000-0001-9609-9786 e-mail: sannikov\_na@mail.ru

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

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

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

**A.V. Rybin**

ORCID: **0000-0001-5084-3610** e-mail: **arybin93@gmail.com**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**S.A. Epifanov**

ORCID: **0009-0000-5585-6082** e-mail: **epifanov.s.a@yandex.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The article describes a web application for remote interaction with a database of upwelling observations containing information on cases of motion of deep water towards the ocean surface collected from references. The database fields, the application operation scheme, the structural elements included in it are considered, and examples of the implementation of the graphical interface are given. The results of the study can be used to develop sustainable strategies for the use of natural resources in coastal zones and to optimize economic activity on the shelf.

**Key words:** web application, Django, Python, database, upwelling, World Ocean.

**FOR CITATION:** N.A. Sannikov, A.S. Epifanova, A.V. Rybin, S.A. Epifanov. WEB application for remote interaction with upwelling observations database. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 14-24. EDN: VMWYAT

## Введение

Изучение процессов водообмена в шельфовых морских зонах в настоящее время является задачей, требующей пристального внимания. Динамические явления, происходящие в этих областях, оказывают значительное воздействие на экологическое состояние окружающей среды в морских акваториях. Одним из ключевых процессов, вносящих значительный вклад в водо- и массообмен шельфовых вод, является апвеллинг – процесс подъема воды из глубин водоема к его поверхности [1]. Это явление можно наблюдать как у берегов, так и в центральных районах океанов, морей и озер. Глубинные воды, поднимающиеся к поверхности, характеризуются более низкой температурой, наличием биогенных веществ и растворенных в них химических элементов; поверхностные воды обогащаются питательными веществами, такими как фосфор и азот [2, 3]. В морских акваториях это способствует активному развитию фитопланктона, который играет ключевую роль в пищевой цепи морских экосистем, являясь основным источником пищи для многих морских животных [4]. В то же время апвеллинг может вызывать экологические проблемы (несбалансированная эвтрофикация вод, образование сероводорода [5, 6], климатические изменения температуры вод, изменение структуры морских сообществ, цветение фито- и зоопланктона [5]). Кроме того, этот процесс способен привести к изменению солевого состава толщи воды, что может негативно отразиться на многих морских организмах [7, 8] и нарушить биологическое равновесие.

Таким образом, создание базы данных, содержащей информацию об описанных в литературе случаях апвеллингов, а также веб-приложения для работы с ней является актуальной задачей. Хранение и обработка тематических данных с помощью подобных программных комплексов в последнее время становится неотъемлемым элементом исследований в области океанологии [9-14].

## Схема работы приложения

Для разработки веб-приложения была выбрана бесплатная программная платформа *Django*. Она реализована на объектно-ориентированном языке программирования *Python*, что обеспечивает модульность всего проекта в целом и облегчает как начальную разработку программного продукта, так и дальнейшее его развитие. Кроме того, *Django* изначально

была создана для реализации веб-интерфейсов, поэтому в ней заложен весь необходимый инструментарий для безопасного взаимодействия с записями базы данных.

Кратко схему работы приложения (рис. 1) можно описать следующим образом:

- пользователь с помощью графического интерфейса (браузер) формирует HTTP GET запрос на получение данных и отправляет его на сервер приложения;
- сервер обрабатывает запрос пользователя и формирует ответ в виде шаблонного файла, т.е. т.н. *template* в контексте *Django Framework*, формата *html* и контекстных данных, которые могут состоять как из содержимого базы данных, так и из частей пользовательского интерфейса, которые сформированы со стороны сервера; при этом пользователь не имеет права вносить какие-либо изменения в базу данных – в данном случае ему доступен только просмотр информации.

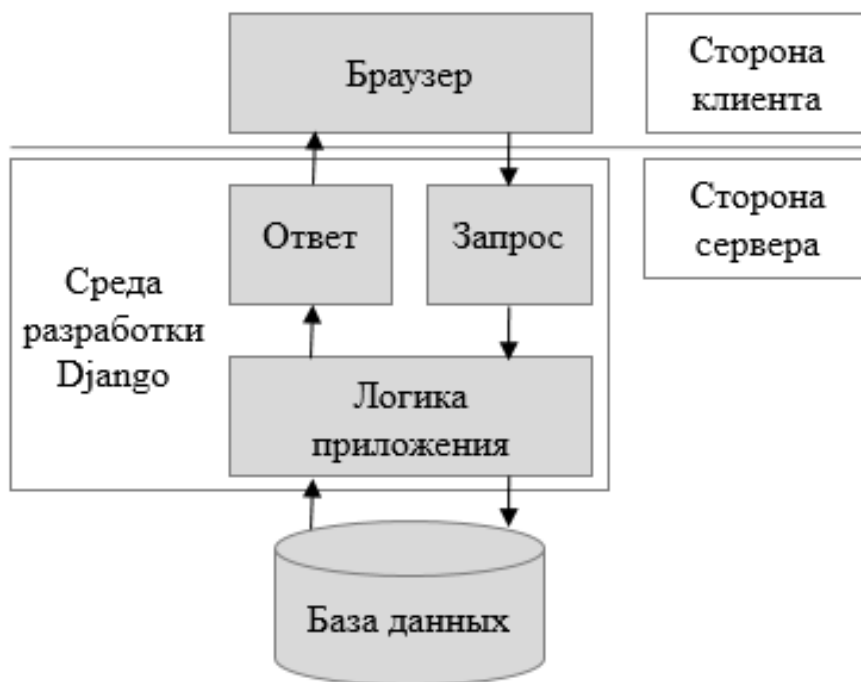


Рис. 1. Блок-схема работы приложения для удаленного взаимодействия с базой данных наблюдений апвеллингов

Fig. 1. Flowchart of the web application for interaction with the upwelling observation database

Добавление записей происходит через отдельно реализованный интерфейс администратора, работающий по схожему принципу.

### Описание полей базы данных

База данных наблюдений апвеллингов в Мировом океане создана на основе реляционной системы управления базой данных *MySQL*. Поскольку на текущий момент база данных активно пополняется, нет полной уверенности в том, что выделены все основные сущности и их атрибуты. Поэтому схема ее на данный момент денормализована и будет нормализовываться в дальнейшем. В табл. 1 представлено описание всех текущих параметров, которые учитываются при добавлении наблюдения.

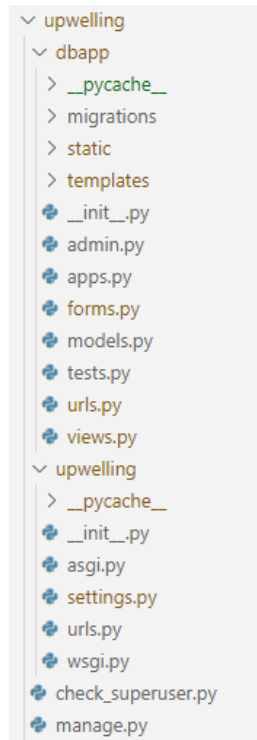
Таблица 1.  
Таблица параметров наблюдаемого явления

Table 1.  
Observed phenomenon parameters table

Поле	Тип данных	Описание
type_welling	Varchar(45)	тип наблюдаемого явления
reservoir	Varchar(45)	название водоема, в котором проводились замеры
measurement_place	Varchar(45)	место, в котором проводились замеры (бухта, мыс и т.п.)
coordinate_y	Float	широта (градусы)
latitude	Varchar(1)	сторона света по широте
coordinate_x	Float	долгота (градусы)
longitude	Varchar(1)	сторона света по долготе
source_title	Varchar(1000)	литературный источник, содержащий информацию о наблюдении
source_url	Varchar(512)	ссылка на источник
strip_length	Float	протяженность полосы (км)
avg_sea_depth	Float	средняя глубина моря (м)
layer_thickness	Float	толщина слоя (м)
width_on_surface	Float	ширина на поверхности (км)
width_on_bottom	Float	ширина у дна (км)
distance_from_shore	Float	расстояние от берега (км)
temperature_diff	Float	разница температур (°C)
temperature_diff_max	Float	максимальный перепад температур между поднятой и окружающей водами (°C)
flow_speed	Float	скорость течения (м/с)
seawater_dens_diff	Float	разность плотностей морской воды (епс)
salinity	Float	соленость (psu)
sea_surf_temp_min	Float	минимальное значение температуры поверхности моря (°C)
sea_surf_temp_max_diff	Float	максимальный перепад температуры поверхности моря между зоной явления и смежными водами (°C)
wind_speed	Float	скорость ветра (м/с)
vertical_speed	Float	вертикальная скорость (м/с)
water_temp_max_out	Float	температура водной массы за пределами апвеллинга $T_{max}$ (°C)
territorial_waters	Varchar(45)	территориальные воды, в которых проводились замеры
start_date	Date	дата начала явления (гг-мм-дд)
end_date	Date	дата окончания явления (гг-мм-дд)
duration	Int	продолжительность явления (дни)

### Структура приложения

Поскольку разработка велась в рамках готовой среды *Django* [15], структура приложения представляет собой шаблонную иерархию файлов с возможностью внедрения собственных реализаций разработчика и выглядит следующим образом (рис. 2):



**Рис. 2. Файловая структура веб-приложения для удаленного взаимодействия с базой данных наблюдений апвеллингов**

**Fig. 2. File structure of the web application for interaction with the upwelling observation database**

Здесь:

- upwelling – корневая директория проекта;
- dbapp – директория приложения, в которой расположены файлы, связанные с взаимодействием с базой данных и пользователем;
- \_\_pycache\_\_ – автоматическая директория, хранящая скомпилированные байт-коды файлов;
- migrations – директория для хранения файлов миграции;
- static – директория с файлами стилей формата css, изображений и скриптов формата javascript;
- templates – директория для хранения шаблонных файлов формата html;
- \_\_init\_\_.py – автоматически сгенерированный файл, позволяет Python распознать директорию как пакет;
- admin.py – исполняемый файл, в котором реализуется функционал панели администратора;
- apps.py – файл с указанием названий подключаемых сторонних приложений;
- forms.py – исполняемый файл, содержащий реализацию форм запроса данных для пользователя;
- models.py – исполняемый файл с описанием таблиц базы данных и их полей;
- tests.py – исполняемый файл приложения, который хранит тесты приложения;
- urls.py – исполняемый файл с описанием путей к различным страницам сайта;
- views.py – исполняемый файл проекта с реализациями функций, генерирующих различные страницы сайта и обрабатывающих запросы пользователя;
- upwelling – директория проекта, в которой расположены основные настоечные файлы;
- asgi.py – автоматически сгенерированный файл, добавляет поддержку взаимодействия между асинхронными веб-серверами и приложениями;



- settings.py – исполняемый файл проекта с настроечными данными для его работы;
  - urls.py – исполняемый файл проекта с описанием путей к различным страницам сайта;
  - wsgi.py – автоматически сгенерированный файл, позволяющий приложению работать с веб-сервером по протоколу WSGI (Web Server Gateway Interface);
  - check\_superuser.py – скрипт для проверки количества суперпользователей в проекте;
  - manage.py – основной файл для управления проектом.
- Наиболее значимые файлы будут рассмотрены ниже.

### Организация работы с базой данных

Вследствие того, что используемая среда разработки основана на объектно-ориентированном языке программирования *Python*, большая часть функционала приложения реализуется в виде классов и методов классов. Так, например, реализация таблиц базы данных и их полей представляет собой набор классов и атрибутов соответственно в файле models.py, т.н. ORM (Object-relational mapping) технология (рис. 3). Такой подход значительно упрощает разработку, так как при использовании команд «python./manage.py makemigrations» и «python ./manage.py migrate» в корневой папке информация о структуре схемы базы данных отправляется на локальный сервер. После выполнения первой команды можно проверить правильность составления запроса, посмотрев содержимое файлов в папке приложения migrations. Предварительно необходимо указать адрес локального сервера *MySQL* и имя базы данных в настроечном файле проекта settings.py. Для добавления, редактирования и удаления записей в среде *Django* используется административная панель, которая так же, как и все модули, реализуется через определение классов в файле admin.py. Благодаря этому разработчик способен выполнять необходимые настройки: определять порядок и количество отображаемых полей базы данных, редактировать шаблон полей для заполнения данных и показывать дочерние таблицы по внешнему ключу (рис. 4).

```
from django.db import models

# Create your models here.

class WellingTable(models.Model):
    type_welling = models.CharField(max_length=45, null=True, blank=True, default=None, verbose_name="Welling type")

class DateTable(models.Model):
    welling_table = models.ForeignKey(WellingTable, on_delete=models.CASCADE, verbose_name="WellingTableFK")
    start_date = models.DateField(null=True, blank=True, default=None, verbose_name="Start date")
    end_date = models.DateField(null=True, blank=True, default=None, verbose_name="End date")
    duration = models.IntegerField(null=True, blank=True, default=None, verbose_name="Duration of observation")

class SpatialTable(models.Model):
    welling_table = models.ForeignKey(WellingTable, on_delete=models.CASCADE, verbose_name="WellingTableFK")
    strip_length = models.FloatField(null=True, blank=True, default=None, verbose_name="Strip length")
    avg_sea_depth = models.FloatField(null=True, blank=True, default=None, verbose_name="Avg sea depth")
    layer_thickness = models.FloatField(null=True, blank=True, default=None, verbose_name="Layer thickness")

class SourceTable(models.Model):
    welling_table = models.ForeignKey(WellingTable, on_delete=models.CASCADE, verbose_name="WellingTableFK")
    source_title = models.CharField(max_length=1000, null=True, blank=True, default=None, verbose_name="Source title")
    source_url = models.CharField(max_length=512, null=True, blank=True, default=None, verbose_name="Source URL")
```

**Рис. 3. Пример реализации таблиц базы данных в виде классов на языке Python в файле models.py**

**Fig. 3. Example of database tables implementation as Python classes in models.py file**

Администрирование Django ДОБРО ПОЖАЛОВАТЬ, RO

Начало · Dbapp · Wellings tables

Выберите welling table для изменения

Q

Действие:   Выбрано 0 объектов из 6

<input type="checkbox"/>	ID	WELLING TYPE	DATE	SPATIAL	SOURCE	LOCATION	PHYSIC
<input type="checkbox"/>	7	апвеллинг	Начало замеров: 15 июля 2006 Конец замеров: 25 августа 2006 Продолжительность: 41 Д.	Протяженность полосы 300.0 км Средняя глубина моря None м Толщина слоя None м	Козлов И. Е., Дайлидене И. Изучение апвеллинга в Балтийском море на основе спутниковых оптических и РЛ-данных //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса – 2010. – Т. 7. – №. 3. – С. 161-167.	Страна: Россия Водоем: Балтийское море Территория: юго-восточная часть Балтийского моря Координаты: 20.6 E 57.0 N	Разница температур: 10.0 °C Макс. перепад темп. между глуб. и пов. водами: None °C Скорость течения: None м/с Разность плотностей морской воды: None eps Соленость: None psu Мин. значение темп. пов. воды: 6.0 °C Макс. перепад темп. пов. воды между зоной явления и смеж. водами: 15.0 °C Скорость ветра: 5.0 м/с Вертикальная скорость: None м/с Темп. вод. массы за пределами апвеллинга Tmax: None °C
<input type="checkbox"/>	6	апвеллинг	Начало замеров: 26 августа 2002 Конец замеров: 23 сентября 2002 Продолжительность: 28 Д.	-	Журбас М. и др. Мезомасштабная изменчивость апвеллинга в юго-восточной Балтике: ИК-изображения и численное моделирование //Океанология. – 2004. – Т. 44. – №. 5. – С. 660-669.	Страна: Россия Водоем: Балтийское море Территория: юго-восточная часть Балтийского моря Координаты: None None None None	Разница температур: None °C Макс. перепад темп. между глуб. и пов. водами: None °C Скорость течения: None м/с Разность плотностей морской воды: None eps Соленость: None psu Мин. значение темп. пов. воды: None °C Макс. перепад темп. пов. воды между зоной явления и смеж. водами: None °C Скорость ветра: 7.0 м/с Вертикальная скорость: None м/с Темп. вод. массы за пределами апвеллинга Tmax: None °C
<input type="checkbox"/>	5	апвеллинг	Начало замеров: 12 августа 2009	Протяженность полосы 20.0 км	Демидов А. Н. и др. Особенности структуры и динамики вод в прибрежной части Балтийского моря вблизи Самбийского полуострова //Вестник Московского	Страна: Россия Водоем: Балтийское море	Разница температур: None °C Макс. перепад темп. между глуб. и

Рис. 4. Пример графического интерфейса панели администратора разработанного приложения

Fig. 4. Example of the graphical interface of the administrator panel of developed web application

Для доступа как к панели администратора, так и к основному функционалу веб-приложения, пользователь должен ввести в адресную строку браузера путь до нужного ему раздела (или перейти по контекстным ссылкам в шаблонах html). Подобный тип запроса обрабатывается модулем в файле `urls.py`. В рамках данной работы существует два файла с подобным названием: один – в папке проекта, другой – в папке приложения. Это сделано для удобства разработки, так как все пути в разделы приложения реализованы только в его директории и нигде более. Перечисление доступных пользователю разделов веб-приложения приведено в файле `urls.py`, расположенном в директории `dbapp`. Шаблоны html страниц с данными формируются и отправляются пользователю путем вызова функций из файла `views.py` модуля `views`.

Модуль `views` представлен, в основном, как набор функций, реализованных разработчиком. В качестве аргумента передается массив данных запроса пользователя и возвращается название шаблонного файла html и сами данные. Именно в этом разделе происходит все взаимодействие с базой данных и обработка хранящихся в ней записей.

### Графический интерфейс пользователя

Графический интерфейс пользователя в среде *Django* представлен в виде файлов формата html, которые представляют собой шаблоны веб-страниц с набором тегов, к которым можно применить дополнительный функционал. Он может быть представлен как в виде скриптов на основе javascript, так и отправкой форм из среды *Django*. Пользователю доступен следующий функционал: просмотр географического распределения зарегистрированных случаев апвеллинга, поиск данных по автору или названию источника, доступ к файлу статьи (если он открыт для общего ознакомления), просмотр гистограмм распределения наблюдений по акваториям, по годам и по сезонам. Визуализация отдельных наблюдений осуществляется с помощью интерактивной карты, реализованной при помощи картографического сервиса Яндекс Карты. На рис. 5 представлен пример отображения записей, реализованный в элементе `uamar.js`, расположенном в директории `static`.

```

ymaps.ready(init);
function init() {
  yaMap = new ymaps.Map("map", {
    center: [59.20, 21.25],
    zoom: 5,
    type: 'yandex#satellite',
    controls: ['zoomControl', 'fullscreenControl', 'rulerControl']
  });
}

```

Рис. 5. Функция, реализующая визуализацию интерактивной карты в файле yamap.js

Fig. 5. Interactive map visualization function in yamap.js file

Подобные файлы вызываются в шаблонах html в разделе <head> (рис. 6). Карта будет расположена в том месте, где указан нужный тег «<div>» с необходимым идентификатором. В рассматриваемом случае необходимый для карты тег будет выглядеть следующим образом: <div id="map"></div>. Результат представлен на рис. 7.

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="ru">
<head>
  {% block title %}<title>Upwelling</title>{% endblock %}
  <meta charset="utf-8" />
  <meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1" />

  <!-- style -->
  {% load static %}
  <link rel="stylesheet" href="{% static 'css/styles.css' %}" />
  <link
    rel="stylesheet"
    href="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/3.3.7/css/bootstrap.min.css" />

  <!-- scripts -->
  <script src="https://ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/1.12.4/jquery.min.js"></script>
  <script src="https://maxcdn.bootstrapcdn.com/bootstrap/3.3.7/js/bootstrap.min.js"></script>
  <script src="https://api-maps.yandex.ru/2.1/?apikey=08bbb439-3bb4-4624-9139-732963ddac86&lang=ru_RU" type="text/javascript"></script>
  <script src="{% static 'script/yamap.js' %}" type="text/javascript"></script>
  {% block head %}{% endblock %}
</head>

```

Рис. 6. Пример подключения статичных файлов в разделе <head>

Fig. 6. Example of connection of static files in the section <head>

#### Разделы сайта

- Теоретическая справка
- Карта
- Распределение по акваториям
- Распределение по годам
- Распределение по сезонам
- Поиск по авторам

#### Карта наблюдений

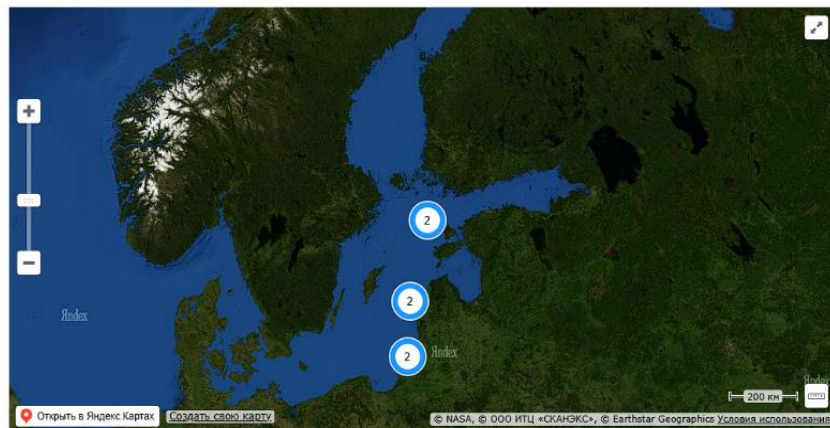


Рис. 7. Окно интерактивной карты веб-приложения

Fig. 7. Web application interactive map window

Для отображения заданного шаблона списка данных со стороны сервера приходят записи из базы данных и формы для их поиска в формате JSON, которые в *Django* реализуются в виде классов на языке *Python* и расположены в файле `forms.py`. В результате может быть сформирован динамический интерфейс (рис. 8).

<p>Разделы сайта</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Теоретическая справка</li> <li>Карта</li> <li>Распределение по акваториям</li> <li>Распределение по годам</li> <li>Распределение по сезонам</li> <li>Поиск по авторам</li> </ul>	<p>Список источников</p> <p>Автор/Название: <input type="text" value="Введите имя автора или н"/> <input type="button" value="Поиск"/></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Козлов И. Е., Дайлидене И. Изучение апвеллинга в Балтийском море на основе спутниковых оптических и РЛ-данных //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7. – №. 3. – С. 161-167.</li> <li>• Голенко М. Н. Структурные особенности апвеллинга в Юго-Восточной Балтике //Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. – 2009. – №. 1. – С. 35-42.</li> <li>• Голенко Н. Н., Голенко М. Н., Щука С. А. Наблюдение и моделирование апвеллинга в Юго-Восточной Балтике // Океанология. – 2009. – Т. 49. – №. 1. – С. 20-27.</li> <li>• Демидов А. Н. и др. Особенности структуры и динамики вод в прибрежной части Балтийского моря вблизи Самбийского полуострова //Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2011. – №. 1. – С. 41-47.</li> <li>• Журбас М. и др. Мезомасштабная изменчивость апвеллинга в юго-восточной Балтике: ИК-изображения и численное моделирование //Океанология. – 2004. – Т. 44. – №. 5. – С. 660-669.</li> <li>• Козлов И. Е., Дайлидене И. Изучение апвеллинга в Балтийском море на основе спутниковых оптических и РЛ-данных //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7. – №. 3. – С. 161-167.</li> </ul>
--	--

**Рис. 8. Отображение реализованного шаблона списка данных**

**Fig. 8. Implemented references list template**

Также в веб-приложении осуществляется первичная обработка данных. На рис. 9, 10 показана реализация постобработки: статистика записей по годам, сезонам и месяцам со стороны сервера и пример графического интерфейса с результатом запроса по временам года соответственно. Для построения гистограмм использовалась бесплатно распространяемая библиотека `matplotlib`.

```
def plot_stat(request):
    data = defaultdict(int)

    if 'year_stat' in request.GET:
        values = DataTable.objects.values("start_date")
        debug = values
        for value in values:
            data[value["start_date"].year] += 1
    elif 'season_stat' in request.GET:
        values = DataTable.objects.values("start_date")
        debug = values
        for value in values:
            if value["start_date"].month in [12, 1, 2]:
                data["Winter"] += 1
            elif value["start_date"].month in [3, 4, 5]:
                data["Spring"] += 1
            elif value["start_date"].month in [6, 7, 8]:
                data["Summer"] += 1
            else:
                data["Fall"] += 1
    elif 'month_stat' in request.GET:
        values = DataTable.objects.values("start_date")
        debug = values
        for value in values:
            data[value["start_date"].month] += 1

    plt.bar(range(len(data)), list(data.values()), align='center')
    plt.xticks(range(len(data)), list(data.keys()))
    plt.yticks(np.arange(0, max(list(data.values()))+1, 1.0))
```

**Рис. 9. Реализация обработки данных в файле `views.py`**

**Fig. 9. Data processing in `views.py` file**





Рис. 10. Пример гистограммы распределения записей базы данных апвеллингов по сезонам

Fig. 10. Example of a histogram of upwelling database records by season

### Выводы

Изучение апвеллинга имеет важное значение для исследований Мирового океана, поскольку данный процесс может оказывать существенное влияние на биологическую продуктивность акваторий, распределение морских ресурсов и равновесие экосистем. Однако, несмотря на то, что изучению этого явления посвящены многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых, на сегодняшний день нам неизвестно ни одного общедоступного и удобного в использовании каталога апвеллингов, содержащего информацию об описанных в литературе случаях глубинного подъема вод за весь период наблюдений. Для решения этой задачи разработаны веб-приложение на основе фреймворка *Django* и интегрированная в него постоянно пополняемая база данных. Пользователю доступен следующий функционал: просмотр географического распределения зарегистрированных случаев апвеллинга на интерактивной Яндекс Карте, поиск данных по автору или названию источника, а также доступ к файлу статьи (если он открыт для общего ознакомления), просмотр гистограмм распределения наблюдений по акваториям, годам и сезонам.

Разработанное приложение может представлять значительный интерес для океанологов, климатологов и специалистов в области морской экологии.

*Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023-0004 «Нелинейная волновая динамика прибрежной зоны в условиях меняющегося климата и антропогенного воздействия»).*

### Библиографический список

1. Сапожников, В.В. Механизм образования и развития апвеллинга в северо-восточной части Черного моря (район Анапа-Новороссийск) / В.В. Сапожников, Ю.Ю. Ткаченко, В.И. Денисов // Географические исследования Краснодарского края. – 2007. С. 136-146.



2. **Шевченко, Г.В.** Гидролого-гидрохимическая структура вод в зоне апвеллинга у юго-западного побережья о. Сахалин / Г.В. Шевченко, В.Е. Марыжихин, В.Н. Частиков // *Океанологические исследования*. 2023. Т. 51. №. 1. С. 54-70.
3. **Духова, Л.А.** Гидрохимическая структура и формирование биологической продуктивности вод в районе Канарского апвеллинга: автореф. дис... канд. геогр. наук: 25.00.28 / Л.А. Духова. – Калининград, 2010. – 23 с.
4. **Гусейнова, Н.О.** Изучение апвеллинга по содержанию хлорофилла а в фитопланктоне западного Каспия за 2017 г. по данным дистанционного зондирования / Н.О. Гусейнова, А.А. Багомаев, Л.Ш. Ахмедова, Б.М. Курамагомедов // *Юг России: экология, развитие*. 2021. № 4 (61). С. 159-172.
5. **Полонский, А.Б.** Современная пространственно-временная изменчивость апвеллингов северо-западной части Черного моря и у побережья Крыма / А.Б. Полонский, М.А. Музылѐва // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2016. №. 4. С. 96-108.
6. **Брянцев, В.А.** Причины черноморских заморозов / Брянцев В.А., Фащук Д.Я. // *Сборник материалов 5-ой Всесоюзной конференции: Вопросы промышленной океанологии Мирового океана*. – Калининград, 1979. С. 23-26.
7. **Жуков, Л.А.** Общая океанология / Л.А. Жуков. – Л.: Гидрометеиздат, 1976.
8. **Gaines, S.** Upwelling. [Электронный ресурс] / S. Gaines, S. Airame // Режим доступа: <https://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/02quest/background/upwelling/upwelling.html> (Дата обращения 27.05.2024).
9. **Епифанова, А.С.** База данных наблюдений внутренних волн в Мировом океане / А.С. Епифанова, А.В. Рыбин, Т.Е. Моисеенко, О.Е. Куркина, А.А. Куркин, Д.Ю. Тюгин // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35. №. 4. С. 395-403.
10. **Епифанова, А.С.** О разработке цифрового атласа наблюдений внутренних волн в мировом океане / А.С. Епифанова, А.А. Куркин, О.Е. Куркина, Т.Е. Моисеенко, А.В. Рыбин // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2019. № 4. С.17-26.
11. **Кокоулина, М.В.** Океанографическая геоинформационная онлайн-система для расчета и анализа характеристик внутренних волн в стратифицированных бассейнах / М.В. Кокоулина, А.С. Епифанова, О.Е. Куркина, А.А. Куркин, М.С. Винокуров, С.А. Епифанов // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2023. № 3. С. 18-29.
12. **Рувинская, Е.А.** Первая версия информационной системы обработки и анализа данных натуральных измерений внутренних волн в океане / Е.А. Рувинская, А.С. Епифанова, М.В. Кокоулина // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2020. № 3(130). С. 53-63.
13. **Тюгин, Д.Ю.** Программный комплекс для численного моделирования внутренних гравитационных волн в мировом океане / Д.Ю. Тюгин, О.Е. Куркина, А.А. Куркин // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011. Т. 4. № 2. С. 32-44.
14. **Тюгин, Д.Ю.** Повышение производительности программного комплекса для моделирования внутренних гравитационных волн IGW Research с помощью Intel® Parallel Studio XE 2013 / Д.Ю. Тюгин, А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский, О.Е. Куркина // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2012. Т. 5. № 3. С. 89-95.
15. Django [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.djangoproject.com/>

**Дата поступления  
в редакцию: 27.05.2024**

**Дата принятия  
к публикации: 16.07.2024**

УДК 004.032.26

EDN: ZTGOBW

**ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ  
ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ГРАНУЛ  
ИОНООБМЕННЫХ СОРБЕНТОВ ЯДЕРНОГО КЛАССА**

**П.В. Тряев**

ORCID: 0000-0001-6143-8223 e-mail: [tryaev@okbm.nnov.ru](mailto:tryaev@okbm.nnov.ru)

АО «ОКБМ Африкантов»  
*Нижний Новгород, Россия*

**П.А. Крестьянинов**

ORCID: 0009-0008-5134-2787 e-mail: [pashakr@list.ru](mailto:pashakr@list.ru)

АО «ОКБМ Африкантов»  
*Нижний Новгород, Россия*

**Г.С. Малышев**

ORCID: 0000-0002-8147-988X e-mail: [gsmalyshev@okbm.nnov.ru](mailto:gsmalyshev@okbm.nnov.ru)

АО «ОКБМ Африкантов»  
*Нижний Новгород, Россия*

**А.Е. Наумов**

ORCID: 0009-0003-5993-9928 e-mail: [info@aleksandrnaumov.ru](mailto:info@aleksandrnaumov.ru)

АО «ОКБМ Африкантов»  
*Нижний Новгород, Россия*

**Е.А. Герасимов**

ORCID: 0009-0000-5641-0912 e-mail: [zenyger@rambler.ru](mailto:zenyger@rambler.ru)

АО «ОКБМ Африкантов»  
*Нижний Новгород, Россия*

Исследуются возможности сверточных нейронных сетей в задаче распознавания дефектов гранул ионообменных сорбентов ядерного класса: трещин, сколов. Показано, что использование предобученной нейронной сети позволяет обучить полносвязный классификатор даже для случая критически малого набора обучения. Демонстрируется эффективность обучения нейронной сети при малой обучающей выборке для распознавания дефектов. Предложен вариант объяснения эффективности обучения при малом обучающем наборе данных. Приводятся вероятности, с которыми сеть классифицирует тот или иной дефект, а также указываются предсказательные вероятности, ниже которых результат работы сети можно считать сомнительным. Рассматриваются перспективы использования сверточных нейронных сетей в задаче бинарной классификации дефектов гранул ионообменных сорбентов.

**Ключевые слова:** гранула ионообменного сорбента, сверточные нейронные сети, предобученные нейронные сети, распознавание изображений, дефекты гранулы сорбента, бинарная классификация.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Тряев, П.В. Применение сверточных нейронных сетей для выявления дефектов гранул ионообменных сорбентов ядерного класса / П.В. Тряев, П.А. Крестьянинов, Г.С. Малышев, А.Е. Наумов, Е.А. Герасимов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 25-35. EDN: ZTGOBW

# THE USE OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS TO IDENTIFY DEFECTS IN NUCLEAR CLASS ION-EXCHANGE SORBENT GRANULES

**P.V. Tryaev**

ORCID: 0000-0001-6143-8223 e-mail: [tryaev@okbm.nnov.ru](mailto:tryaev@okbm.nnov.ru)

JSC «Afrikantov OKBM»

*Nizhny Novgorod, Russia*

**P.A. Krestianinov**

ORCID: 0009-0008-5134-2787 e-mail: [pashakr@list.ru](mailto:pashakr@list.ru)

JSC «Afrikantov OKBM»

*Nizhny Novgorod, Russia*

**G.S. Malyshev**

ORCID: 0000-0002-8147-988X e-mail: [gsmalyshev@okbm.nnov.ru](mailto:gsmalyshev@okbm.nnov.ru)

J JSC «Afrikantov OKBM»

*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.Ye. Naumov**

ORCID: 0009-0003-5993-9928 e-mail: [info@aleksandrnaumov.ru](mailto:info@aleksandrnaumov.ru)

JSC «Afrikantov OKBM»

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Ye.A. Gerasimov**

ORCID: 0009-0000-5641-0912 e-mail: [zenyger@rambler.ru](mailto:zenyger@rambler.ru)

JSC «Afrikantov OKBM»

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** This paper deals with the possibilities of convolutional neural networks in the problem of identifying defects in nuclear class ion-exchange sorbents granules: cracks and chips. It is shown that the use of a pre-trained neural network allows training a fully connected classifier even for the case of a critically small training set. The effectiveness of neural network training with a small training data set for defect identification is demonstrated. An attempt is made to explain the effectiveness of training with a small training data set. The probabilities of classification of a particular defect by the neural network are given, as well as predictive probabilities are indicated below which the result of the network can be considered doubtful. Prospects for the use of convolutional neural networks in the problem of binary classification of defects in ion-exchange sorbent granules are considered.

**Key words:** ion-exchange sorbent granule, convolutional neural networks, pre-trained neural networks, image recognition, sorbent granule defects, binary classification

**FOR CITATION:** P.V. Tryaev, P.A. Krestianinov, G.S. Malyshev, A.Ye. Naumov, Ye.A. Gerasimov. The use of convolutional neural networks to identify defects in nuclear class ion-exchange sorbent granules. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 25-35. EDN: ZTGOBW

## Введение

Системы очистки водных теплоносителей вторых контуров АЭС с ВВЭР, плавучих АЭС, судовых ядерных энергетических установок вносят значимый вклад в обеспечение надежной и безопасной эксплуатации. Благодаря их работе водные теплоносители очищаются от широкого спектра загрязнений, показатели качества водно-химических режимов поддерживаются в установленных нормативной документацией диапазонах. Ионообменные фильтры систем очистки вторых контуров загружены ионообменными сорбентами ядерного класса. Они представляют из себя полимерные гранулы сферической формы диаметром от

0,4 до 1,25 мм. В гранулах сорбентов в процессе их изготовления, подготовки к загрузке в систему очистки, эксплуатации в фильтрах возникают дефекты в виде трещин, сколов. При эксплуатации в фильтрах трещины развиваются, что в конечном итоге приводит к фрагментации дефектных гранул. Часть образовавшихся фрагментов гранул будет иметь линейные размеры менее 0,4 мм. Такие частицы не смогут задерживаться фильтрующими устройствами системы очистки и будут выходить в контур, переноситься теплоносителем в полости контура. Под действием рабочих температур они будут подвержены термодеструкции с выделением коррозионно-агрессивных примесей: хлорид-ионов, серной кислоты и др. Это может привести к ухудшению коррозионной обстановки в контуре, протеканию интенсивной общей и локальной коррозии оборудования, трубопроводов [1]. Чтобы исключить загрузку фильтра партией сорбентов с высоким содержанием дефектных гранул, предотвратить эксплуатацию загрузки фильтра, содержащую значительное количество дефектных гранул, следует контролировать наличие дефектов в отобранных представительных пробах гранул сорбентов посредством их визуального осмотра с помощью оптического микроскопа с увеличением не менее  $50\times$ . Данную задачу можно решить, минимизируя человеческий фактор [2] с помощью искусственных нейронных сетей (НС).

В настоящее время практически все системы распознавания изображений строятся на базе сверточных НС [2]. Наиболее широкое применение нейронные сети нашли в задаче распознавания дефектов на поверхностях [3-8]. Однако в этих работах для обучения сети использовались большие наборы данных (не менее 500 изображений на категорию). В то же время особый практический интерес представляют задачи, в которых не требуется крупных наборов обучения. В данной работе показывается, что именно к таким задачам можно отнести распознавание дефектов, т.е. в случае этой задачи не обязательно использовать большие обучающие датасеты. Предпринимается попытка объяснения эффективности обучения сети при малом обучающем наборе данных в случае обнаружения дефектов.

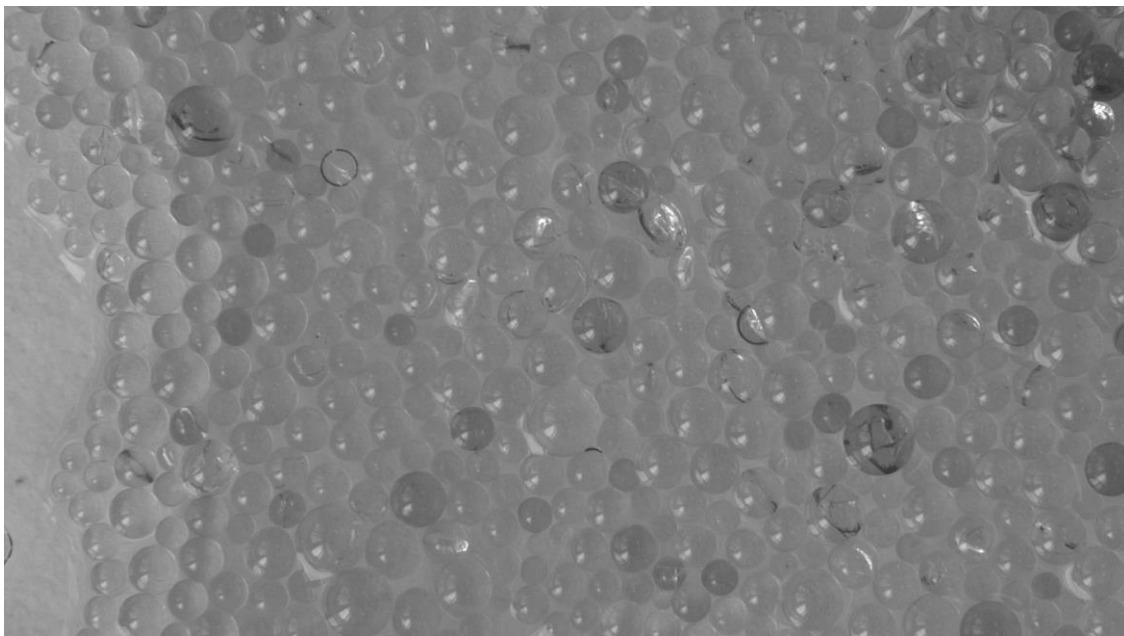
Одна из целей настоящей работы – оценка той предсказательной вероятности сети, ниже которой результат работы сети можно считать сомнительным. Если при классификации неоднородности сеть вынесла вердикт с вероятностью меньшей указанной оценки, то классифицированную неоднородность необходимо будет направить на дополнительное исследование, которое будет проводиться сотрудником лаборатории. Если сеть классифицировала неоднородность с вероятностью, превышающей указанную оценку, вердикт нейронной сети можно считать достоверным.

## 1. Подготовка обучающего набора и набора валидации

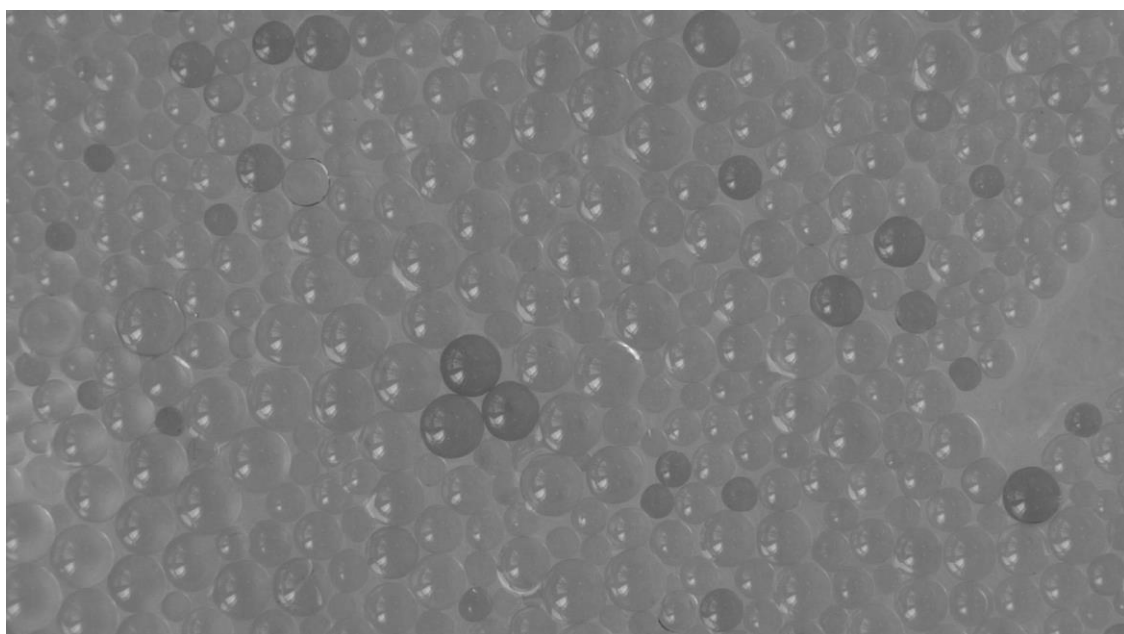
Функционирование обученной НС зависит от значительного числа факторов [2]: архитектуры сети, начальной инициализации весов и порогов сети, способа нормировки обучающих данных, подаваемых на вход сети, размера обучающего набора, выбранного алгоритма градиентного спуска, начальной скорости обучения (параметр, учитываемый в алгоритме градиентного спуска), числа эпох обучения. К настоящему времени не существует универсальных рекомендаций по подбору указанных параметров. Самые успешные НС, нашедшие коммерческое применение, были получены путем продолжительных вычислительных экспериментов.

В настоящее время основная проблема, препятствующая повсеместному внедрению сетей – малый объем обучающих изображений. Для каждой из двух классифицируемых категорий имелось только 40 изображений, т.е. весь обучающий набор состоял всего из 80 изображений. На рис. 1 представлены изображения типичных образцов из тренировочного набора. 14 изображений (по 7 изображений на категорию) было использовано для проверки сети на этапе обучения (валидации). Для обучения коммерческих сетей используют не менее тысячи изображений на категорию, то есть имеющийся в наличии обучающий набор на порядок меньше, чем при обучении коммерческих сетей. Поэтому на текущем этапе ис-

следований ставится задача продемонстрировать принципиальную возможность использования нейронных сетей для задач распознавания дефектов на гранулах сорбентов, а также подобрать архитектуру нейронной сети, которая бы позволила удачно решить задачу распознавания дефектов. Кроме того, ставилась задача продемонстрировать, что даже для случая малого набора обучения можно получить сеть, не делающую грубых ошибок, когда гранула сорбента с дефектом классифицируется сетью как бездефектный образец.



а)



б)

**Рис. 1. Изображения типичных образцов из тренировочного набора:**  
*а – гранулы сорбента с дефектами, б – гранулы сорбента без дефектов*

**Fig. 1. Images of typical samples from the training set:**  
*a – sorbent granules with defects; b – sorbent granules without defects*

Корректное обучение сети невозможно осуществить без набора валидации, который на этапе обучения позволяет отследить эпоху, с которой начинается переобучение сети. Пе-

реобучение НС – это фундаментальная проблема, решить которую удалось только в последние десятилетия. Дело в том, что в процессе обучения сеть научится классифицировать изображения из обучающего набора с высокой точностью (даже при малом наборе обучения эта точность может быть близка к 100 %). Но любая обученная сеть будет работать с данными, которых не было в обучающем наборе. Если НС переобучена, то на любых данных, даже несущественно отличающихся от тренировочных, работа сети будет непредсказуемой. Поэтому после каждой обучающей итерации необходимо вычислять перекрестную энтропию именно для набора валидации, который не пересекается с обучающим набором. До тех пор, пока потери падают, пусть даже неравномерно, на валидационном наборе, процесс обучения сети можно считать корректным. Как только будет отмечен рост перекрестной энтропии, необходимо остановить обучение, так как рост потерь на наборе валидации свидетельствует о переобучении сети.

## 2. Выбор архитектуры нейронной сети для решения задачи классификации дефектов

Начальные слои сверточной НС выделяют на изображении наиболее обобщенные (низкоуровневые) признаки (например, границы и текстуры), в то время как более глубокие слои выделяют абстрактные понятия, то есть признаки высокого уровня (такие, как «нос кошки» или «перо птицы») [8]. Когда речь заходит о дефектах, говорить о каких бы то ни было их абстрактных признаках достаточно сложно, т.е. основная информация должна быть заложена в низкоуровневых признаках, самыми сложными из которых могут быть, например, ломанные линии – признак трещин на грануле сорбента. На основании данных положений авторы статей [9-11] заключают, что для распознавания дефектов можно использовать сравнительно неглубокие сети достаточно простой архитектуры, например, VGG16.

В настоящей работе архитектура сети VGG16 также была выбрана в качестве базовой при решении задачи распознавания дефектов. Сеть VGG16 состоит из пяти базовых блоков: первые два блока содержат по два, а последние три блока – по три слоя свертки. После указанных блоков добавляется полносвязный классификатор. Простая архитектура сети позволяет не только ускорить процесс обучения, но и дает возможность использовать сравнительно малый набор обучения. При различной начальной инициализации весов и порогов сети результат обучения может кардинально отличаться, а для критически малых наборов обучения случайная инициализация весов и порогов не позволит обучить сеть до приемлемых значений точности распознавания. Во избежание трудностей, связанных с начальной инициализацией весов и порогов сети, было решено использовать сеть VGG16, уже обученную на миллионе изображений (1000 изображений на категорию) из тренировочного набора ImageNet [12]. Данная сеть была разработана Кареном Симоньяном и Эндрю Циссерманом в 2014 г. [13]. Модель VGG16 входит в состав фреймворка Keras, а возможности данной библиотеки позволяют модернизировать сеть под свои задачи. В частности, пользователь может удалить полносвязный классификатор на 1000 категорий и добавить классификатор с нужной ему архитектурой. Сеть VGG16, представленная в Keras, обучалась распознавать объекты, которые не имеют никакого отношения к дефектам, поэтому изначально не совсем очевидна обоснованность использования предобученной сети. Однако карты признаков сверточной сети определяют присутствие на объекте универсальных обобщенных признаков, которые, как правило, не зависят от конкретики решаемой задачи. Поэтому сверточная основа сети всегда может быть использована для решения задач классификации. Иными словами, для выявления универсальных признаков сеть можно обучать абсолютно на любом наборе данных, так как все исследуемые объекты всегда несут определенные низкоуровневые признаки. Сложные абстрактные признаки (которые в задаче с распознаванием дефектов нам не интересны), характерные для конкретных классов, «зашиты» в глубоких слоях. Задача распознавания дефектов интересна как раз тем, что для них нет необходимости выделять высокоуровневые абстрактные признаки (о чем уже говорилось выше), в то время как более универ-

сальные (низкоуровневые) признаки, характерные для всех объектов, независимо от их природы, хорошо выявляются даже посредством малого числа слоев.

Сверточная основа сети VGG16 не дообучалась. Обучался только полносвязный классификатор, имеющий один скрытый слой из 64 нейронов с функцией активации ReLU. Далее взвешенная сумма выходов данных нейронов подавалась на один выходной нейрон с функцией активации сигмоида. В качестве метода оптимизации (метода градиентного спуска) был выбран метод RMSprop [2], впервые предложенный Джеффом Хинтоном. При обучении сети с помощью функций библиотеки Keras начальная скорость обучения [2] в алгоритме RMSprop устанавливалась в  $2 \cdot 10^{-5}$ , а остальные параметры алгоритма RMSprop были оставлены по умолчанию. Данные параметры можно посмотреть в описании функций библиотеки Keras [14]. Каждую итерацию на вход сети подавалось по пять изображений (минибатч) из обучающего набора. Дело в том, что начальным этапом оценки антиградиента функции потерь является вычисление перекрестной энтропии для обучающего набора. Однако использование всего обучающего набора на каждой итерации обучения приводит к существенным временным затратам, а также повышается вероятность переобучения сети. Поэтому общепризнанным подходом является вычисление перекрестной энтропии не на всем обучающем наборе, а только на небольшой партии из обучающего набора (такая партия называется минибатчем [12]). Естественно, что в данном случае могут быть получены только оценочные значения для компонентов антиградиента функции ошибки. Тем не менее, практика показала высокую эффективность такого подхода. Так как размер обучающего пакета составлял 80 изображений, а размер одного минибатча был равен пяти, то за одну эпоху выполнялось 16 обучающих итераций. Кроме того, на каждой новой эпохе минибатчи формируются заново, причем, случайным образом.

Время обучения заняло порядка минуты на CPU Intel Xeon W-2145 с тактовой частотой 3,7 ГГц, объем оперативной памяти – 32 Гб. Полносвязный классификатор обучался в течение 50 эпох, после чего было принято остановить обучение, так как значения точности распознавания (процент правильно распознанных изображений из набора валидации) от эпохи к эпохе существенно не изменялось (рис. 2). После окончания восьмой эпохи обучения процент правильно распознанных валидационных изображений скачкообразно изменялся от 78,57 % до 85,71 %. Это соответствует одиннадцати и двенадцати правильно распознанным изображениям из четырнадцати валидационных, т.е. на протяжении более сорока эпох обучаемая нейросеть делала от двух до трех ошибочных вердиктов из четырнадцати возможных. Сами скачкообразные изменения в графике точности распознавания связаны только с малым количеством валидационных изображений.

График потерь (перекрестной энтропии) представлен на рис. 2. Необходимо отметить, что, несмотря на малость обучающего набора, эффект переобучения не проявился, так как потери снижались практически на каждой эпохе обучения. Поведение графика точности распознавания (рис. 2) свидетельствует о корректности процесса обучения: действительно, до восьмой эпохи включительно наблюдается монотонный рост точности распознавания на наборе валидации, после чего точность распознавания стабилизировалась, о чем уже было сказано выше. Для графика точности распознавания на тренировочном наборе наблюдается немонотонное возрастание процента правильно распознанных изображений. Вероятно, дальнейшее обучение полносвязного классификатора позволило еще больше увеличить точность распознавания на тренировочном наборе, но с практической точки зрения точность обучения корректнее оценивать по набору валидации.

Еще одним подтверждением корректности процесса обучения являются стартовые значения точности распознавания для тренировочного и валидационного наборов: эти значения близки к 50 %, что является ожидаемым значением для случая бинарной классификации. Из графика на рис. 3 видно, что после обучения сети точность классификации изображений на наборе валидации достигает 85,71 % (12 изображений из 14 валидационных). Естественно, что на данном этапе обученная сеть не найдет коммерческого применения. Тем не менее,

продемонстрирована принципиальная возможность использования предобученных нейронных сетей простой архитектуры для задач распознавания дефектов на гранулах сорбента. Расширенное на порядок количество обучающих изображений позволит существенно повысить точность распознавания.

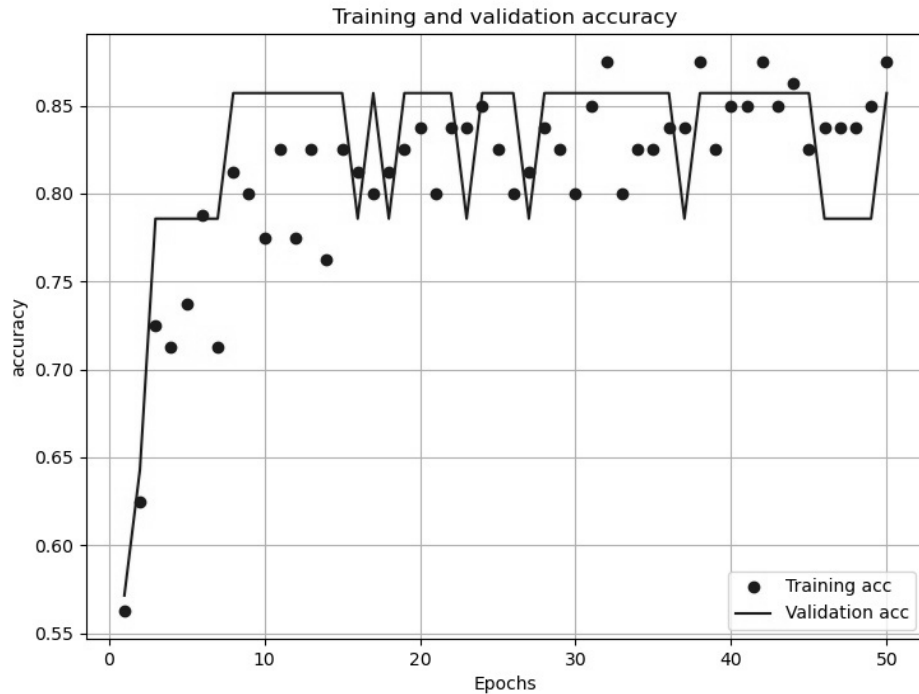


Рис. 2. Процесс изменения доли правильно распознанных изображений в процессе обучения  
Fig. 2. The process of changing the proportion of correctly recognized images in the learning process

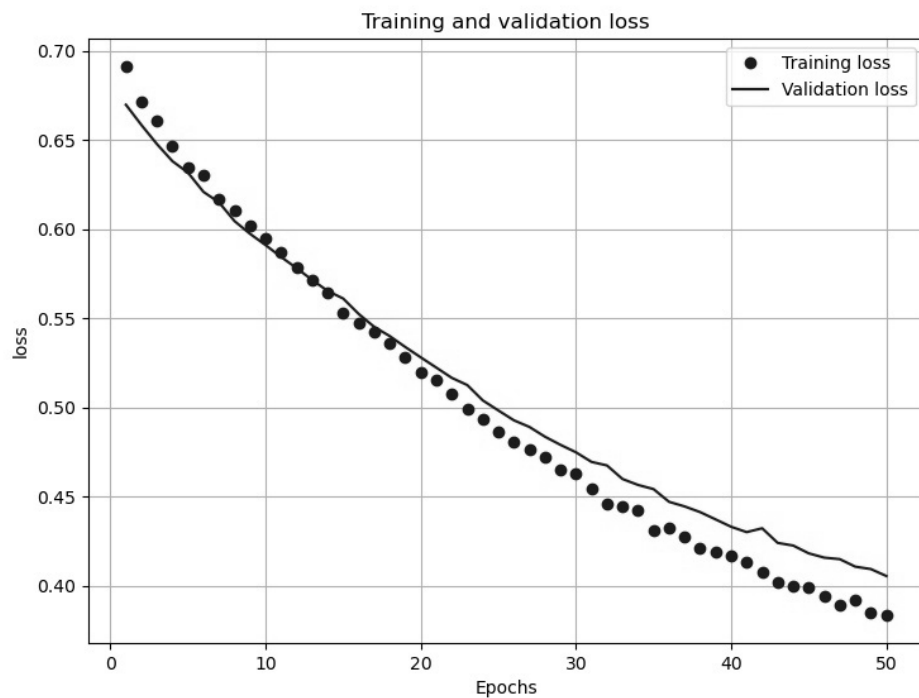
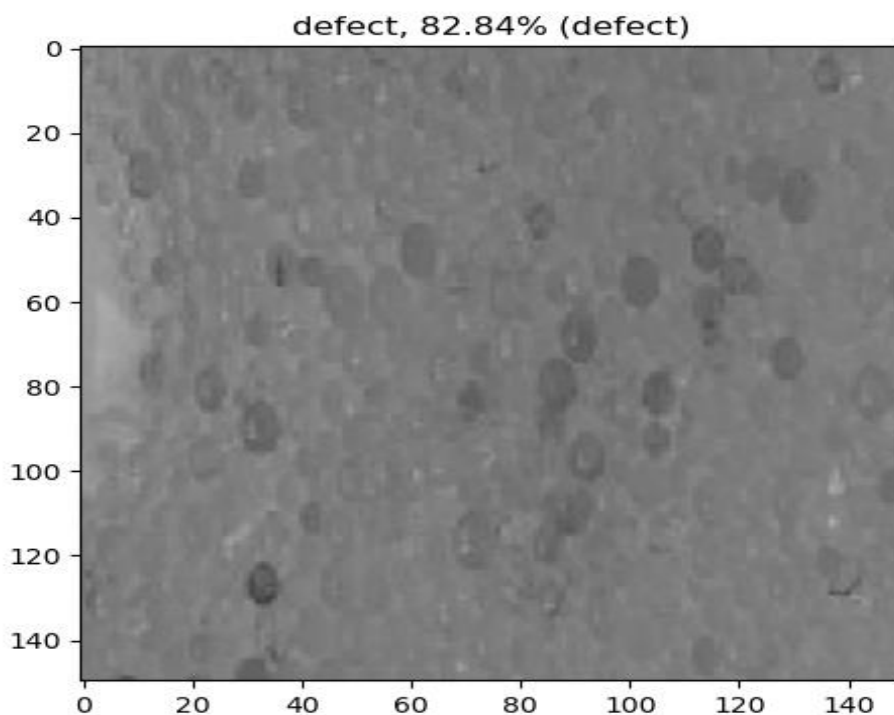


Рис. 3. Процесс изменения перекрестной энтропии в процессе обучения  
Fig. 3. The process of changing cross-entropy in the learning process

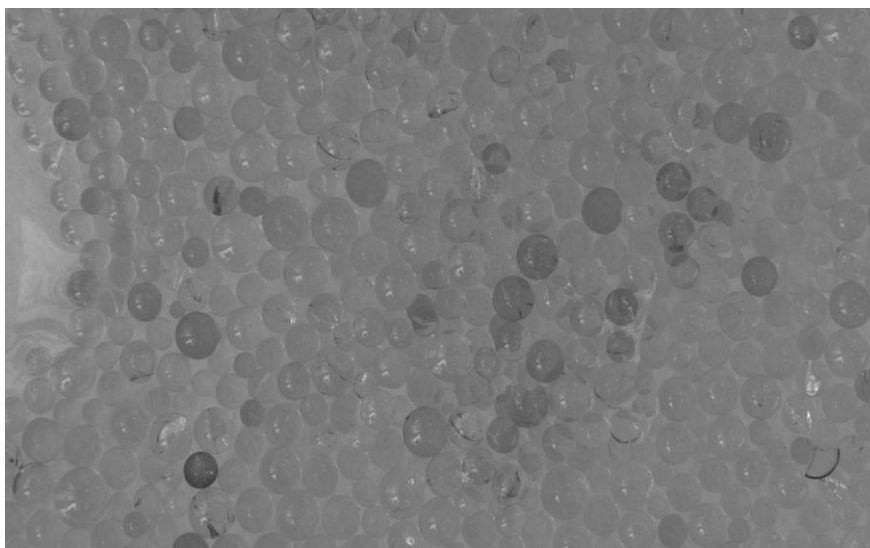


### 3. Анализ результатов работы обученной сети

Рассмотрим результаты работы сети. Пример правильно распознанного сорбента с дефектами из валидационного набора представлен на рис. 4.



а)



б)

**Рис. 4. Пример правильно распознанного сорбента с дефектами:**

*а – изображение, поданное на нейронную сеть,*

*б – исходное изображение, из которого был получен рис. 4а*

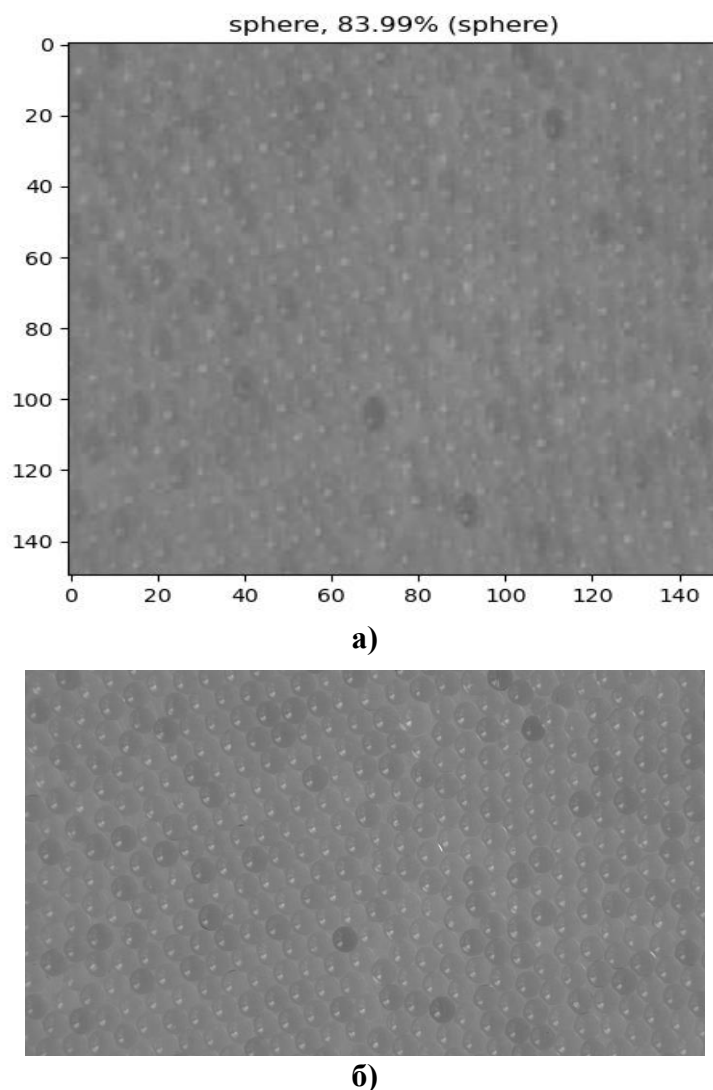
**Fig. 4. Example of a properly recognized sorbent with defects:**

*a – image submitted to a neural network; b – original image used for Figure 4a*

В круглых скобках на рис. 4 а указана истинная категория (метка класса), без скобок указана метка, предсказанная сетью. Процент на рисунке – это предсказательная вероятность принадлежности к классу. На рис. 4 а показано черно-белое изображение с 256 уровнями яр-

кости размером 150 на 150 пикселей. Именно такую размерность имеют изображения, подаваемые на сеть VGG16, т.е. перед обучением сети необходимо было произвести трансформацию исходного цветного изображения (рис. 4б) к черно-белому изображению размера 150 на 150 [12]. Кроме того, яркость каждого пикселя полученного изображения была нормирована на 255 (максимальный уровень яркости для восьмибитной яркости), так как эффективное обучение сети невозможно без предварительной нормировки обучающих и валидационных данных. Изображение на рис. 4 а тяжело воспринимается человеческим глазом (возникают трудности с определением трещин и сколов на гранулах сорбента), в то время как для нейронной сети такие входные изображения являются естественными.

Пример правильно распознанного сорбента без дефектов из валидационного набора представлен на рис. 5.



**Рис. 5. Пример правильно распознанного сорбента без дефектов:**

*a – изображение, поданное на нейронную сеть,*

*б – исходное изображение, из которого был получен рис. 5а.*

*В круглых скобках на рис. 5а указана истинная категория (метка класса), без скобок указана метка, предсказанная сетью. % на рис. 5а – предсказательная вероятность принадлежности к классу*

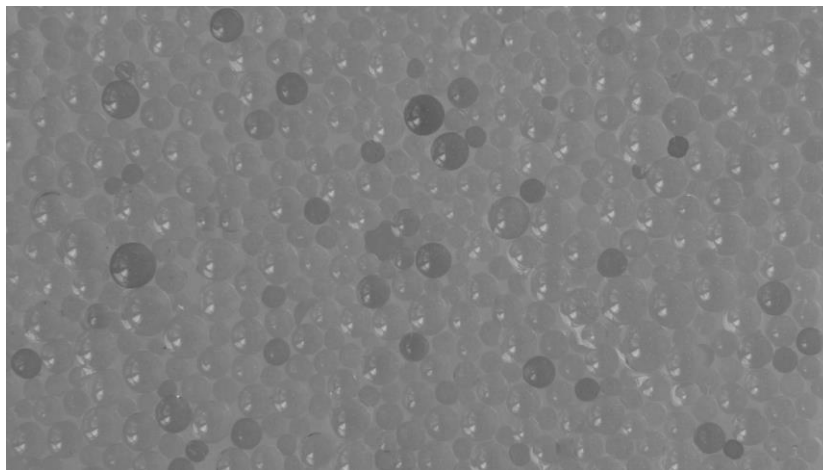
**Fig. 5. Example of a properly recognized sorbent without defects:**

*a – image submitted to a neural network; b – original image used for Figure 5a.*

*In parentheses in Figure. 5a is the true category (class label), without parentheses is the predicted label.*

*The percentage in Figure 5a is the predictive probability of belonging to a class by the network. The percentage in Figure 5a is the predictive probability of belonging to a class*

Особый интерес представляют ошибочные вердикты, вынесенные сетью. В валидационном наборе из 14 изображений были неправильно идентифицированы только 2 (на момент окончания обучения). На рис. 6 показан пример изображения бездефектного образца, ошибочно идентифицированного сетью как гранула сорбента с дефектом. Тем не менее, предсказательная вероятность для него близка к 50 % (как и для других ошибочно распознанных образцов), т.е. обученная сеть «сомневается» в вынесенном вердикте. Кроме того, грубых ошибок, когда изображение гранулы сорбента с дефектом было классифицировано как бездефектная гранула, допущено не было.



**Рис. 6. Два бездефектных образца, неправильно классифицируемые сетью как гранула сорбента с дефектом**

**Fig. 6. Two samples without defect incorrectly classified by the network as a defective sorbent**

#### **4. Рекомендации по использованию обученной нейронной сети**

Для формирования рекомендаций по использованию сети необходимо, в первую очередь, исходить из анализа ошибок, допущенных сетью. Из всех тренировочных и валидационных изображений (всего 94) 12 были классифицированы неверно. Для всех этих изображений предсказательная вероятность составила менее 60 %, поэтому можно заключить, что все те, для которых сеть вынесла вердикт с предсказательной вероятностью менее 60 %, должны направляться опытному специалисту для дополнительного исследования. Помимо указанных 12, в тренировочном и валидационном наборах нашлось еще 5 изображений, для которых сеть вынесла правильный вердикт с предсказательной вероятностью, меньшей 60 %. Таким образом, если исследователя интересует только факт наличия дефектов в пробах гранул сорбентов, обученная сеть экономит 82 % времени на исследование образцов (77 изображений из 94).

#### **Заключение**

В результате работы показано, что при малом обучающем наборе (40 изображений на категорию) использование предобученной сети позволяет получить достаточно высокий процент правильно распознанных изображений: 85,71 % на наборе валидации при том, что обучался только полносвязный классификатор, а сверточная основа сети оставалась без изменений.

Предложено объяснение высокого процента правильно распознанных дефектов при условии малости выборки, использованной для обучения сети: данный эффект, скорее всего, связан с тем, что для дефектов не требуется выявление каких бы то ни было абстрактных

признаков. В то же время наиболее обобщенные признаки, характерные, в том числе, и для дефектов, должны выявляться уже первыми сверточными слоям предобученной сети.

Путем анализа количества ошибок, допущенных сетью, были даны рекомендации по практическому использованию сети. Если исследователя интересует наличие дефектных гранул сорбентов в пробе, то обученная нейронная сеть позволит экономить до 82 % времени на ее исследование.

### Библиографический список

1. **Кочеткова, А.В.** Влияние на работоспособность оборудования второго контура судовых ядерных энергетических установок попадания в контур сорбентов из фильтров / А.В. Кочеткова, Н.Г. Сандлер, П.В. Тряев, П.А. Крестьянинов, К.Г. Соломаха. // Взгляд в будущее – 2017. Материалы XV молодежной научно-технической конференции. – СПб: АО «Ц», 2017. – 844 с.
2. **Архангельская, Е.В.** Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей / Е.В. Архангельская, А.А. Кадуринов, С.И. Николенко. – СПб.: Питер, 2020. – 481 с.
3. **Siyu, Zhang.** Visual inspection of steel surface defects based on domain adaptation and adaptive convolutional neural network / Siyu Zhang, Qiju Zhang, Jiefei Gu, Lei Su // 15 May 2021, Mechanical Systems and Signal Processing 153(3):107541.
5. **Zijian, Kuang.** Computer Vision and Normalizing Flow-Based Defect Detection / Zijian Kuang, Xinran Tie, Lihang Ying, Shi Jin // <https://arxiv.org/abs/2012.06737>.
6. **Desai, K. A.** Swarit Anand Singh, Automated surface defect detection framework using machine vision and convolutional neural networks // Journal of Intelligent Manufacturing. 2022. Vol. 34. P. 1995-2011, (2023) <https://link.springer.com/article/10.1007/s10845-021-01878-w>.
7. **Xu, L.** A Weakly Supervised Surface Defect Detection Based on Convolutional Neural Network / L. Xu, Sh. Lv, Y. Deng, X. Li. IEEE Access PP(99):1-1 March 2020.
8. **Perez, H.** Learning for Detecting Building Defects Using Convolutional Neural Networks / H. Perez, Joseph H., M. Tah, A. Mosavi. <https://arxiv.org/abs/1908.04392>, [Submitted on 6 Aug 2019].
9. **Шолле, Ф.** Глубокое обучение на Python/ Ф. Шолле. – СПб.: Питер, 2020. – 400 с.
10. **Малышев, Г.С.** Использование предобученной нейронной сети для выявления дефектов на изделиях из силицированного графита в АО «ОКБМ Африкантов» / Г.С. Малышев, И.В. Друмов, И.А. Иляхинский, М.А. Камнев, О.В. Андреев, А.А. Абрамов // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. № 2. С. 17-20.
11. **Друмов, И.В.** Выявление дефектов на изделиях из силицированного графита с помощью нейронных сетей / И.В. Друмов, М.А. Камнев, Г.С. Малышев, Г.В. Терехин // Автоматизация в промышленности. 2022. № 01. DOI: 10.25728/avtprom.2022.01.05
12. **Ak, R.** Detection and Segmentation of Manufacturing Defects with Convolutional Neural Networks and Transfer Learning Max Ferguson / R. Ak, Y.-T. T. Lee, K. H. Law // Submitted on 7 Aug 2018 (v1), last revised 3 Sep 2018 (this version, v2) <https://arxiv.org/abs/1808.02518>.
13. **Malyshev, G.S.** Choice of neural network architecture when recognizing objects that do not have high-level features / G.S. Malyshev, V.V. Andreev, O.V. Andreeva, O.A. Chistyakov, D.N. Sveshnikov // CEUR Workshop Proceedings, Vol-3027. 2021. С. 1073-1081
14. **Simonyan, K.** Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition / K. Simonyan, A. Zisserman // arXiv:1409.1556v6 [cs. CV], 10 April – 2015.

*Дата поступления  
в редакцию: 25.05.2024*

*Дата принятия  
к публикации: 10.07.2024*

# ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 620.9+519.2

EDN: MLYKHH

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СИСТЕМ КОМПЕНСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ СУДОВЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

**В.И. Полуничев**ORCID: 0000-0003-1859-9616 e-mail: [dep59@okbm.nnov.ru](mailto:dep59@okbm.nnov.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***В.М. Сосин**ORCID: 0009-0004-5821-6290 e-mail: [vmsosin@yandex.ru](mailto:vmsosin@yandex.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***А.Ю. Савельев**ORCID: 0009-0009-2010-699X e-mail: [alesha.savelev.com@mail.ru](mailto:alesha.savelev.com@mail.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Представлен анализ систем компенсации давления (СКД) в первом контуре реакторных установок с ВВР, использующихся на отечественных и зарубежных судах. Проведено сравнение систем с точки зрения габаритов, точности поддержания давления, переноса и распределения радиолитических газов, влияния на водно-газовый и химический режим теплоносителя. Разработана методика оценки распределения радиолитических газов в воде первого контура и оборотов СКД, приведены варианты дегазации теплоносителя для обеспечения безопасной эксплуатации установок. Представлена иллюстрация происходящих процессов, определены приоритеты систем по рассмотренным параметрам, которые могут способствовать обоснованному выбору оптимальных вариантов систем компенсации перспективных реакторных установок для судов и атомных станций малой мощности.

**Ключевые слова:** атомные суда, судовые реакторные установки, газовая и паровая системы компенсации давления, радиолиз воды, радиолитические газы, водно-химический режим.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Полуничев, В.И. Аналитический обзор систем компенсации давления в первом контуре судовых реакторных установок / В.И. Полуничев, В.М. Сосин, А.Ю. Савельев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 36-47. EDN: MLYKHH

## REVIEW OF PRESSURE COMPENSATION SYSTEMS IN PRIMARY CIRCUIT OF NUCLEAR MARINE REACTORS

**V.I. Polunichev**ORCID: 0000-0003-1859-9616 e-mail: [dep59@okbm.nnov.ru](mailto:dep59@okbm.nnov.ru)Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia***V.M. Sosin**ORCID: 0009-0004-5821-6290 e-mail: [vmsosin@yandex.ru](mailto:vmsosin@yandex.ru)Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.Yu. Savelyev**

ORCID: 0009-0009-2010-699X e-mail: alesha.savelev.com@mail.ru

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** This paper presents an analysis of pressure compensation systems in the primary circuit of water-water energetic reactors (WVER) used on domestic and foreign ships. The systems are compared in terms of dimensions, pressure maintenance accuracy, transfer and distribution of radiolytic gases, influence on water-gas and chemical regime of coolant. The methodology of estimation of radiolytic gases distribution in the primary circuit water and equipment of the pressure compensation system is developed, variants of coolant degassing to ensure safe operation of the reactors are given. An illustration of the processes taking place is made, some priorities of the systems according to the considered parameters are determined, which can contribute to a reasonable choice of optimal variants when designing prospective reactors for ships and small sized nuclear power plants.

**Key words:** nuclear-powered ship, ship reactor plants, gas and steam compensation systems, water radiolysis, radiolytic gases, water chemistry regime.

**FOR CITATION:** V.I. Polunichev, V.M. Sosin, A.Yu. Savelyev. Review of pressure compensation systems in primary circuit of nuclear marine reactors. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 36-47. EDN: MLYKHH

## Введение

Одной из систем, влияющих на надежность работы реакторной установки, является система компенсации давления (СКД) первого контура. Она предназначена для приема и возврата воды первого контура при температурных изменениях ее объема, создания и поддержания давления в контуре в необходимых пределах во всех режимах работы установки. Кроме того, система влияет на габариты установки, водно-газовый и химический режим теплоносителя, перенос газов и их распределение, в том числе, радиолитических, которые, в свою очередь, влияют на ресурс и надежность работы оборудования и установки в целом.

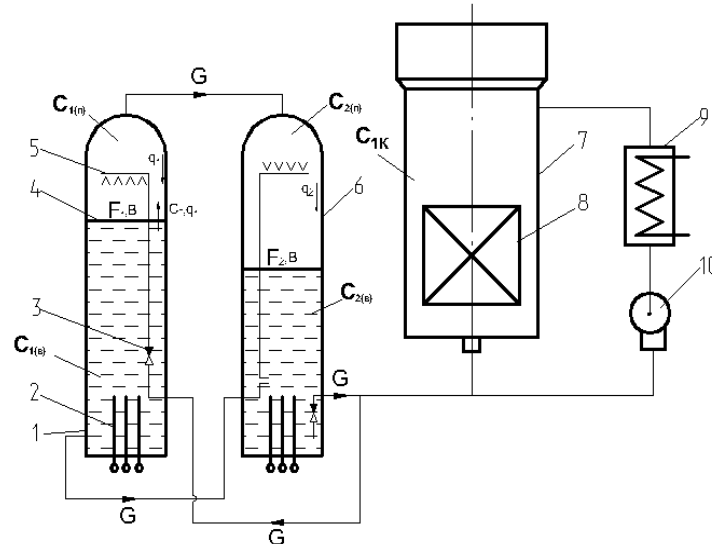
Реальное применение в мировой атомной энергетике нашли два типа систем компенсации – паровая и газовая. В отечественной судовой энергетике паровая система компенсации (ПСКД) использовалась в единственной РУ (ОК-150) атомного ледокола «Ленин». В дальнейшем на отечественных атомных судах и АСММ применялась газовая система компенсации давления (ГСКД). На зарубежных атомных судах «Саванна» (США), «Отто Ган» (ФРГ) и «Муцу» (Япония) использовались ВВР с паровыми системами компенсации давления, которые имели свои особенности, некоторые из них будут рассмотрены в данной работе.

Результаты выполненного анализа интересны для проектантов с точки зрения конструктивных особенностей систем компенсации, опыта их эксплуатации и влияния на надежность работы реакторных установок.

## Система компенсации давления реакторной установки ОК-150 атомного ледокола «Ленин»

Первая реакторная установка ОК-150 ледокола «Ленин» имела паровую систему компенсации давления (рис. 1). В состав системы входили три «горячих» (ГКД) и один «холодный» компенсатор давления (ХКД). Давление в системе создавалось паром, генерируемым в компенсаторах электронагревателями. В ГКД нагреватели работали во всех режимах, в ХКД – только при разогреве установки. По расчету при номинальном давлении 19,6 МПа в ГКД температура воды соответствует температуре насыщения – 362 °С, в ХКД – 345 °С. По опытным данным температура воды в ХКД составляет 278-333 °С. При повышении температуры в первом контуре теплоноситель из «холодной» ветки циркуляции после парогенератора поступает в ГКД, при снижении – из ХКД в реактор. Для реализации такого перемещения теплоносителя в системе установлены обратные клапаны. В нижней части подъемной трубы душиру-

ющего устройства ХКД имелось переливное отверстие для выравнивания в стационарных режимах массовых уровней воды в компенсаторах. Ограничение повышения давления в переходных и аварийных режимах обеспечивалось за счет снижения мощности электронагревателей и впрыска воды с пониженной температурой в паровое пространство ГКД. Снижение давления компенсировалось вскипанием воды в ГКД, находящейся на линии насыщения, и повышением мощности электронагревателей. Разогрев и расхолаживание установки проводилось без дренажа и подпитки первого контура теплоносителем.



**Рис. 1. ПСКД РУ ОК-150 ледокола «Ленин»:**

1 – «горячий» компенсатор, 2 – электронагреватель, 3 – обратный клапан, 4 – уровень воды, 5 – душирующее устройство, 6 – «холодный» компенсатор, 7 – реактор, 8 – активная зона, 9 – парогенератор, 10 – главный циркуляционный насос

**Fig. 1. Steam pressure compensation system of the OK-150 reactor of the icebreaker Lenin:**

1 – «hot» compensator, 2 – electric heater, 3 – check valve, 4 – water level, 5 – sprayer, 6 – «cold» compensator, 7 – reactor, 8 – reactor core, 9 – steam generator, 10 – main circulation pump

В процессе работы подобной установки в реакторе происходит радиолиз воды первого контура с образованием радиолитических газов. Радиолитические газы, включающие водород, растворяются в теплоносителе и за счет массообмена переносятся в оборудование системы компенсации и первого контура и распределяются с определенными концентрациями в водяных и паровых объемах в соответствии с тепло-гидравлическими параметрами. Перенос газа, осуществляется по следующей схеме. Газовый раствор из реактора поступает через душирующее устройство в ГКД, в котором вода нагревается до температуры насыщения и газ выделяется в паровой объем. Образующаяся парогазовая смесь по трубопроводу поступает в ХКД, где пар частично конденсируется, и концентрация газа в паре повышается. Одновременно происходит растворение газа на зеркале воды, в струях и конденсате, стекающем по стенкам корпуса, и перенос его в воду ХКД и далее в реактор. В реакторе часть поступивших радиолитических газов, в том числе, водород, под действием радиационного облучения взаимодействуют, снижая концентрацию. Это создает предпосылки для организации самоподдерживающегося ВХР первого контура. Иллюстрацию происходящих процессов газопереноса и распределения концентраций радиолитических газов в первом контуре и системе компенсации давления РУ ОК-150 выполним на результатах расчета.

### Расчет распределения концентраций радиолитических газов в воде первого контура и оборудовании ПСКД РУ ОК-150

Процессы газопереноса при расчете концентрации радиолитических газов в системе компенсации исследуются в соответствии с расчетной схемой (рис. 1). Поток газа через поверхность раздела фаз за счет массообмена может быть найден из уравнения:

$$Q = \beta \cdot F(C_B^H - C^П) \quad (1)$$

где  $C^П$  – концентрация газа в паре компенсатора давления;  $\beta$  – коэффициент массообмена на поверхности раздела фаз;  $F$  – площадь поверхности раздела фаз;  $C_B^H$  – концентрация насыщения газа в жидкости.

Процесс выхода радиолитических газов с потоком пара из воды компенсатора давления ( $Q_1$ ) и обратный переход воды из паровой фазы ( $Q_2$ ) определяется следующими формулами:

$$Q_1 = q_1 \cdot C_n^{ГКД} \quad (2)$$

$$Q_2 = q_2 \cdot C^П \quad (3)$$

где  $q_1$  – поток паро-газовой смеси из воды компенсатора давления в паровой объем;  $q_2$  – поток конденсата из парового объема в воду компенсатора давления;  $C_n^{ГКД}$  – концентрация газа в паре, уносимом в паровой объем компенсатора давления.

В соответствии с расчетной схемой процесс массопереноса газов и распределения концентраций в оборудовании описывается следующим образом.

Изменения концентраций газа:

– в объеме воды 1-го контура

$$m_{1к} \frac{dc_{1к}}{dt} = Z(t) - C_{1к} \cdot G + C_2^B \cdot G \quad (4)$$

где  $m$  – масса;  $t$  – время;  $Z(t)$  – скорость образования радиолитических газов в активной зоне;  $F_1$  – площадь зеркала воды в ХКД.

• в объеме воды ГКД

$$m_1^B \frac{dc_1^B}{dt} = -\beta \cdot F_1(C_1^B - C_1^П) - q_1 \cdot C_n^{ГКД} + q_1 \cdot C_1^П - C_1^B \cdot G \quad (5)$$

• в паровом объеме ГКД

$$m_1^П \frac{dc_1^П}{dt} = C_{1к} \cdot G - C_1^П \cdot G + \beta \cdot F_1(C_1^B - C_1^П) + q_1 \cdot C_n^{ГКД} - q_1 \cdot C_1^П \quad (6)$$

• в объеме воды ХКД

$$m_2^B \frac{dc_2^B}{dt} = \beta \cdot F_2(C_2^П - C_2^B) + q_2 \cdot C_2^П - C_2^B \cdot G \quad (7)$$

где  $F_2$  – площадь зеркала воды в ХКД.

• в паровом объеме ХКД

$$m_2^П \frac{dc_2^П}{dt} = C_1^B \cdot G + C_1^П \cdot G - \beta \cdot F_2(C_2^П - C_2^B) - q_2 \cdot C_2^П \quad (8)$$

$Z(t)$  – скорость образования радиолитических газов, поступающих в активную зону из ХКД при радиационном облучении (в результате радиолитических процессов образуются короткоживущие неустойчивые радикалы в больших концентрациях, которые впоследствии рекомбинируют в устойчивые молекулы, накапливающиеся в малой концентрации при проходе через активную зону) [4]. Учет скорости образования радиолитических газов в активной зоне задан убывающей функцией от 100 до  $0 \frac{нсм^3}{с}$  за 1 час. Данная функция задана исходя из условия, что при увеличении концентрации газов ( $H_2$ ) радиолиз снижается до нуля.

Решение системы уравнений (4) – (8) приведено на рис. 2. При этом приняты следующие начальные условия:  $C_{1к} = C_1^B = C_1^П = C_2^B = C_2^П = 0 \frac{нсм^3}{кг}$ .



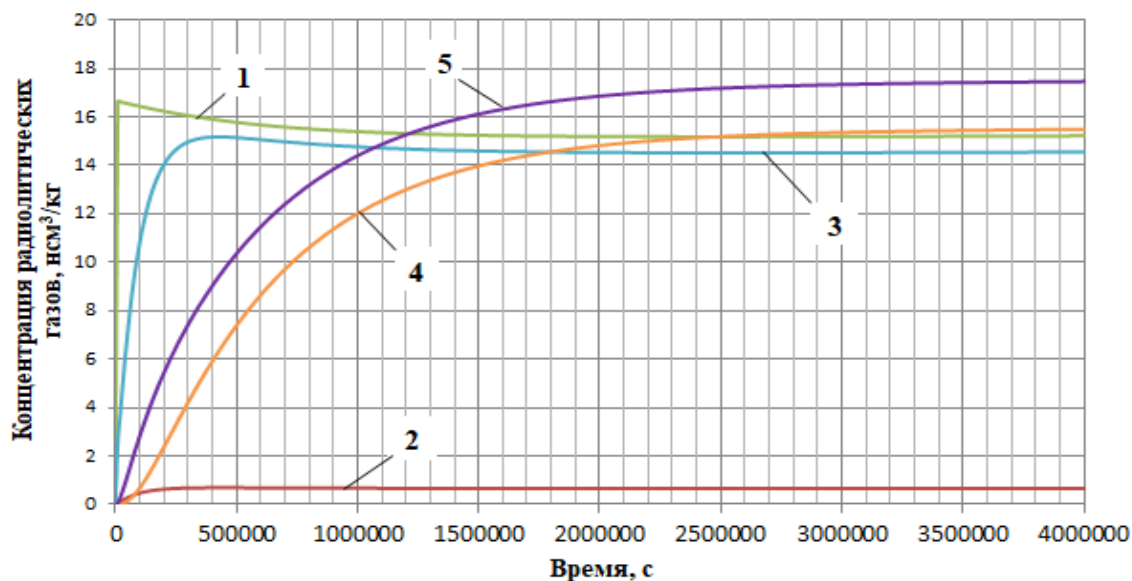


Рис. 2. Распределения концентраций радиолитических газов в воде 1-го контура и оборудовании ПСКД РУ ОК-150: 1 –  $C_{1K}$ ; 2 –  $C_1^B$ ; 3 –  $C_1^П$ ; 4 –  $C_2^B$ ; 5 –  $C_2^П$ .

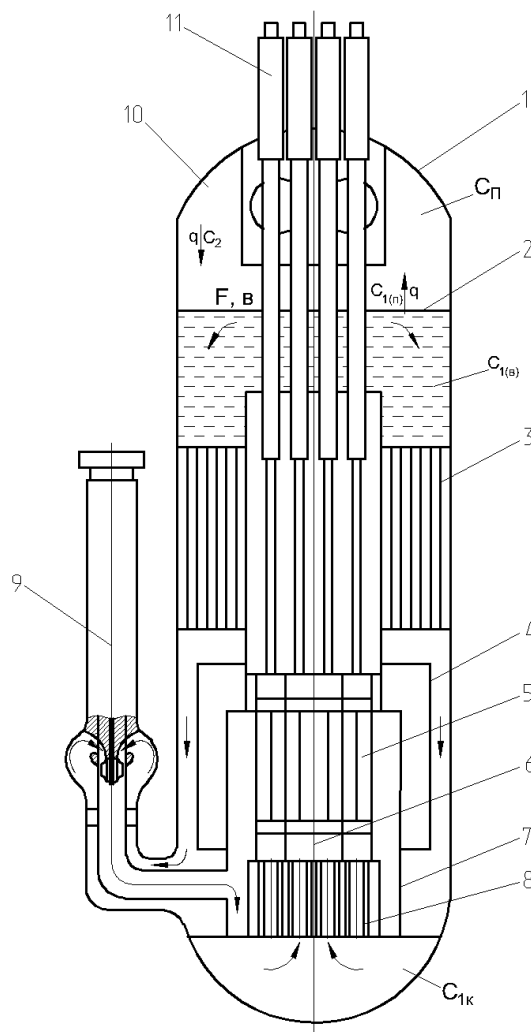
Fig. 2. Distributions of radiolytic gas concentrations in the primary circuit water and equipment of the steam pressure compensation system of the ОК-150 reactor: 1 –  $C_{1K}$ ; 2 –  $C_1^B$ ; 3 –  $C_1^П$ ; 4 –  $C_2^B$ ; 5 –  $C_2^П$ .

Из графика следует, что в процессе работы установки вода и пар в ГКД дегазируются, а в ХКД насыщаются газом до высоких концентраций, и растворенный газ интенсивно переносится в реактор и там рекомбинирует. В процессе работы установки в воде первого устанавливается равновесная концентрация радиолитических газов близкая к концентрации в воде ХКД, в других объемах СКД – в соответствии с графиком на рис. 2. При избыточном содержании в теплоносителе водорода наиболее эффективную дегазацию производить путем отбора парогазовой смеси из ХКД во внешнюю систему утилизации радиолитических газов.

Достоинствами системы являются обеспечение высокой точности поддержания давления в первом контуре. В стационарных режимах отклонение давления от номинального составляло  $19,6 \pm 0,49$  МПа (в ВВЭР-1000 – не более  $15,7 \pm 0,29$  МПа), гарантированное отсутствие вскипания воды в трубопроводе отвода теплоносителя из ХКД в реактор, малый объем системы компенсации по сравнению с другими вариантами вынесенных систем из-за пониженной температуры воды в ХКД.

### Система компенсации давления судна «Отто Ган»

В РУ атомного судна «Отто Ган» использовался парогенерирующий блок (ПГБ) интегрального типа со встроенными в корпус парогенераторами и паровым компенсатором давления (рис. 3). Давление в парогенерирующем блоке поддерживается за счет пара над уровнем теплоносителя, генерируемого за счет испарения с поверхности раздела фаз и частичного кипения теплоносителя в активной зоне. Электронагреватели в данной ПСКД не используются. При номинальной мощности объемное паросодержание в теплоносителе составляет около 6 %. Радиолитический газ в реакторах с присутствием объемного кипения протекает интенсивнее по сравнению с ВВЭР. Газ, растворенный в теплоносителе, выделяется и переносится с паром в паровую полость реактора. Пар в компенсаторе конденсируется на стенках корпуса, конденсат с растворенным газом стекает в теплоноситель. Концентрация газа в паре при этом повышается. Для исключения избыточной концентрации радиолитических газов в данной установке используется система дегазации теплоносителя, обеспечивающая отвод парогазовой смеси из парового объема компенсатора с последующим снижением давления, охлаждением и сбросом газа в газосборники и возвращением конденсата в контур подпиточными насосами [8].



**Рис. 3. Схема реактора судна «Отто Ган» со встроенной ПСКД:**

1 – крышка реактора, 2 – уровень воды, 3 – парогенератор, 4 – тепловой экран, 5 – активная зона (АЗ), 6 – корзина АЗ, 7 – разделительная обечайка, 8 – фильтр, 9 – насос, 10 – парогазовый объем КД, 11 – приводы регулирующих стержней

**Fig. 3. Scheme of the ship Otto Hahn reactor with integrated steam pressure compensation system:**

1 – reactor head, 2 – water level, 3 – steam generator, 4 – heat shield, 5 – reactor core, 6 – core support barrel, 7 – separating shell, 8 – filter, 9 – pump, 10 – steam-gas volume of the pressure compensator, 11 – control rod drives

### Расчет распределения концентраций радиолитических газов в воде 1-го контура и паровом объеме РУ судна «Отто Ган»

Оценочный расчет изменения концентраций радиолитических газов на участках 1-го контура выполнен следующим образом.

Изменение концентрации газа:

- для воды 1-го контура

$$m_{1k} \frac{dC_{1k}}{dt} = Z(t) - \beta \cdot F(C^B - C^П) - q \cdot C_{п}^{1k} + q \cdot C^П \quad (9)$$

- для пара в объеме встроенного КД

$$m_{п} \frac{dC_{п}}{dt} = \beta \cdot F(C^B - C^П) + q \cdot C_{п}^{1k} - q \cdot C^П \quad (10)$$

Решение системы уравнений (9) – (10) приведено на рис. 4. При этом принимаются следующие начальные условия:  $C_{1К} = C^П = 0 \frac{\text{нсм}^3}{\text{кг}}$ .

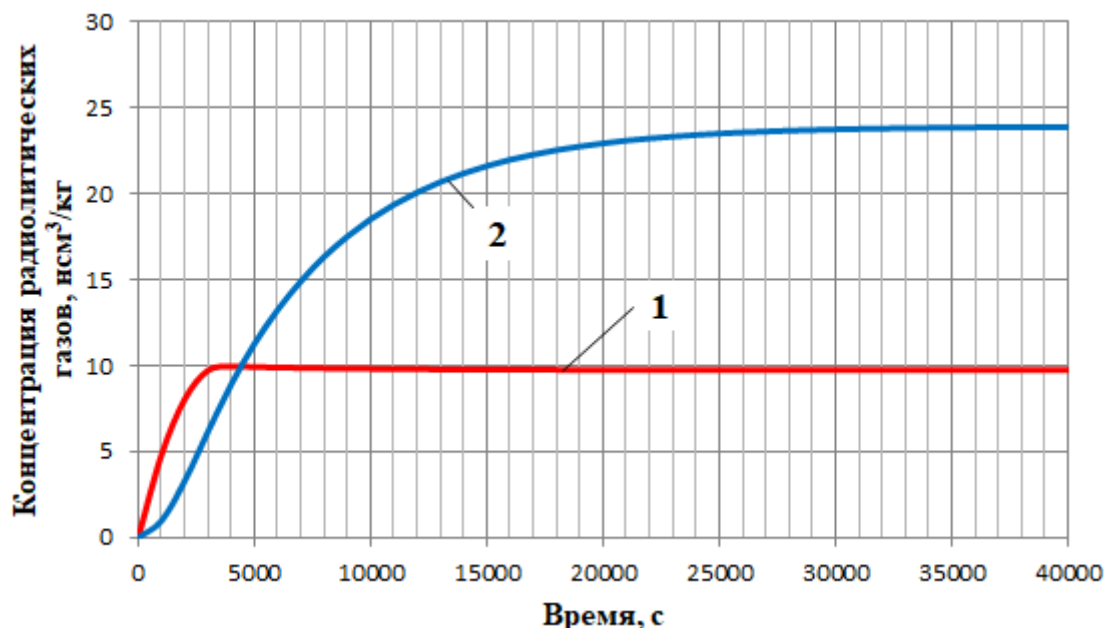


Рис. 4. Распределения концентраций радиолитических газов в воде 1-го контура и оборудовании РУ судна «Отто Ган»: 1 –  $C_{1К}$ ; 2 –  $C^П$ .

Fig. 4. Distributions of radiolytic gas concentrations in the primary circuit water and reactor equipment of the ship Otto Hahn: 1 –  $C_{1К}$ ; 2 –  $C^П$ .

Из графика следует, что в процессе работы устанавливаются равновесные концентрации в паровом объеме компенсатора и воде первого контура, при этом концентрация газа в паре значительно выше, чем в воде. При избыточном содержании в теплоносителе водорода наиболее эффективно дегазацию производить путем отбора парогазовой смеси во внешнюю систему утилизации газа.

Достоинствами встроенной системы компенсации РУ «Отто Ган» являются отсутствие электронагревателей, компактное размещение компенсатора в ПГБ. С точки зрения компоновки парогенерирующего блока установка являлась наиболее прогрессивной во время ее создания и остается до настоящего времени. Существенными недостатками являются объемное кипение теплоносителя в активной зоне и связанный с этим повышенный радиолиз воды в активной зоне, необходимость системы поддержания водно-газового и химического режима, зависимость давления в контуре от выходной температуры из активной зоны.

### Система компенсации давления судов «Саванна» и «Муцу»

В РУ судов «Саванна» и «Муцу» для поддержания давления в первом контуре применена вынесенная ПСКД, представленная на рис. 5,6. ПСКД имеет конструкцию, аналогичную системе ВВЭР-1000. Поддержание давления в первом контуре осуществляется за счет работы электронагревателей КД и впрыска «холодного» теплоносителя в компенсатор.

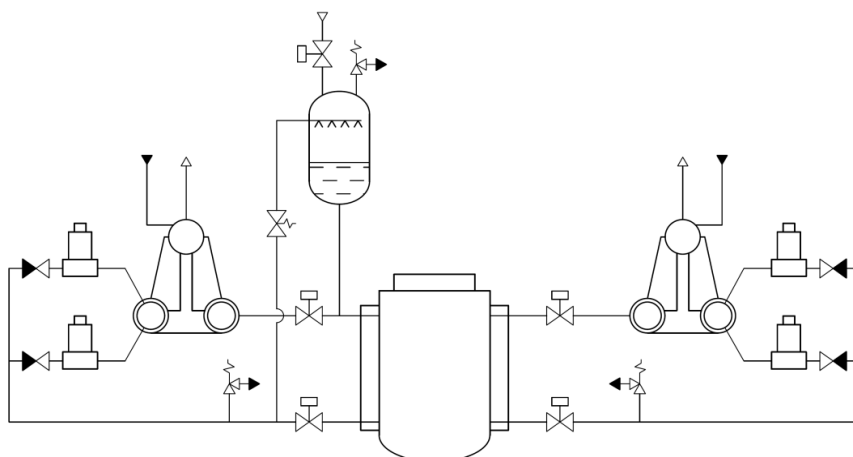


Рис. 5. Принципиальная схема 1-го контура РУ судна «Саванна»

Fig. 5. Schematic diagram of the primary circuit of the ship Savannah reactor

Главным отличием от системы компенсации ОК-150 является отсутствие ХКД. Локализация газообразных продуктов, выделяющихся из воды компенсатора, происходит в паровой полости ПКД за счет конденсации пара на стенках корпуса и струях впрыскиваемой воды. При достижении критической концентрации газа (водорода) в паре, которую можно определить по снижению температуры парогазовой среды в ПКД, необходимо предпринимать меры по ее снижению. На установках «Саванна» [6], и «Муцу» [7] используется система непрерывной газоочистки. При повышенном удельном газосодержании в первом контуре теплоноситель прокачивается через теплообменник, затем через дроссельное устройство подается в расширительную емкость. При снижении давления из теплоносителя выделяется растворенный газ, который компрессором нагнетается в газосборник. Дегазированный теплоноситель из расширительной емкости подается в первый контур подпиточным насосом.

Для иллюстрации процесса газопереноса выполнен оценочный расчет на основе схемы (рис. 6).

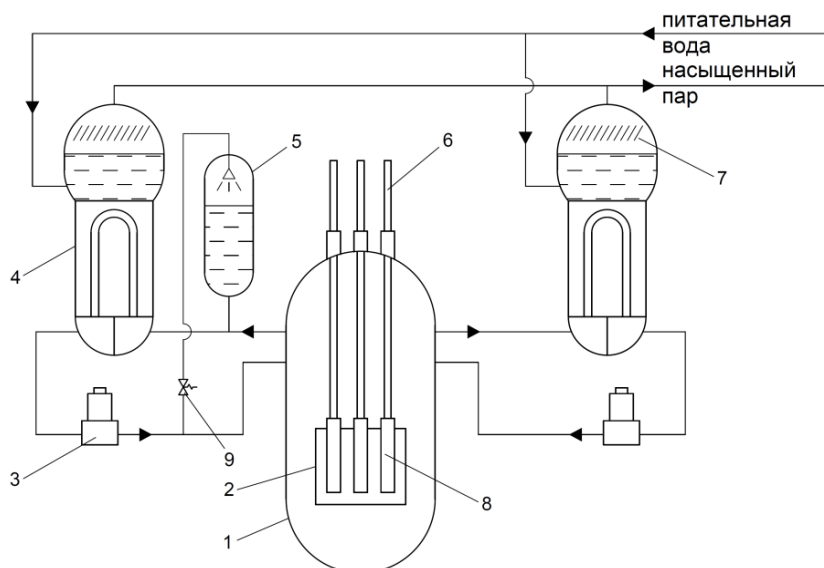


Рис. 6. Принципиальная схема РУ судна «Муцу»:

1 – реактор, 2 – активная зона, 3 – насос, 4 – парогенератор, 5 – компенсатор давления, 6 – СУЗ, 7 – сепаратор, 8 – стержни регулирования

Fig. 6. Schematic diagram of the ship Mutsu reactor:

1 – reactor, 2 – reactor core, 3 – pump, 4 – steam generator, 5 – pressure compensator, 6 – control and protection system, 7 – separator, 8 – control rods

### Расчет распределения концентраций радиолитических газов в воде 1-го контура и паровом объеме РУ судна «Саванна» и «Муцу»

В соответствии с расчетной схемой процессы массопереноса газов и распределения концентраций в оборудовании описываются следующими уравнениями.

Концентрации газа:

- для воды 1-го контура

$$m_{1к} \frac{dc_{1к}}{dt} = Z(t) - C_{1к} \cdot G + C^B \cdot G \quad (11)$$

- для воды в КД

$$m_B \frac{dC_B}{dt} = C_{1к} \cdot G - C^B \cdot G - \beta \cdot F(C^B - C^П) - q \cdot C_n^{1к} + q \cdot C^П \quad (12)$$

- для пара в объеме КД

$$m_n \frac{dC_n}{dt} = \beta \cdot F(C^B - C^П) + q \cdot C_n^{1к} - q \cdot C^П \quad (13)$$

Решение системы уравнений (11) – (13) приведено на рис. 7. При этом принимаются следующие исходные данные:  $C_{1к} = C^П = C^B = 0 \frac{\text{нсм}^3}{\text{кг}}$ .

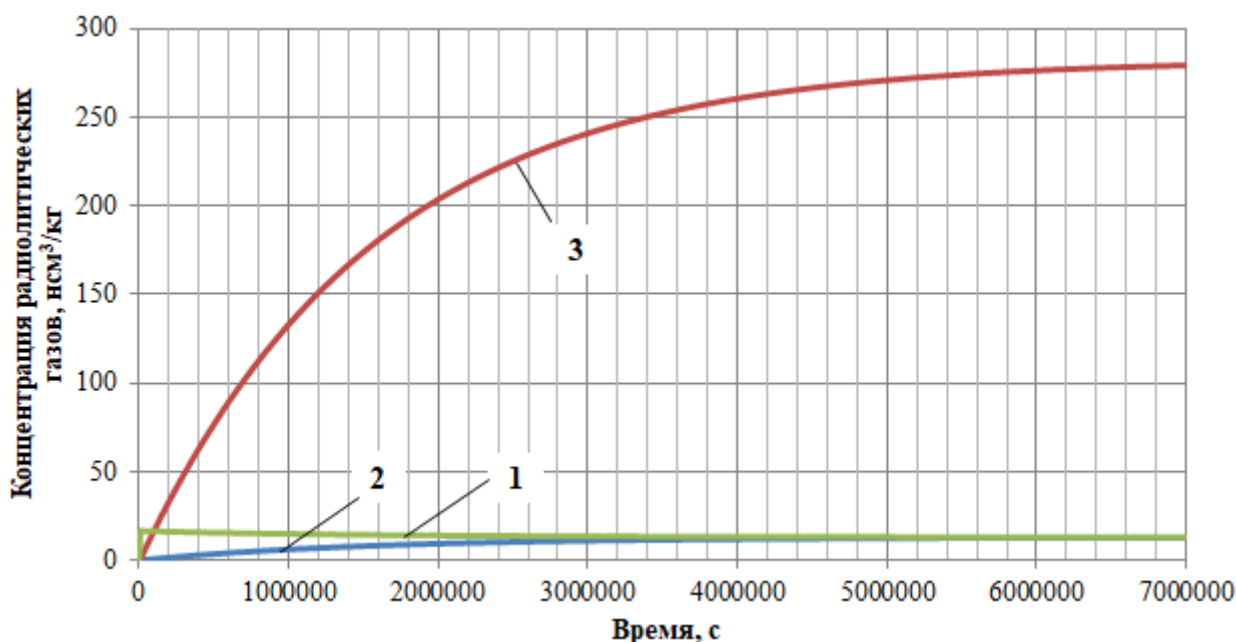


Рис. 7. Распределения концентраций радиолитических газов в воде 1-го контура и оборудовании РУ судна «Саванна» и «Муцу»:

1 -  $C_{1к}$ ; 2 -  $C^B$ ; 3 -  $C^П$

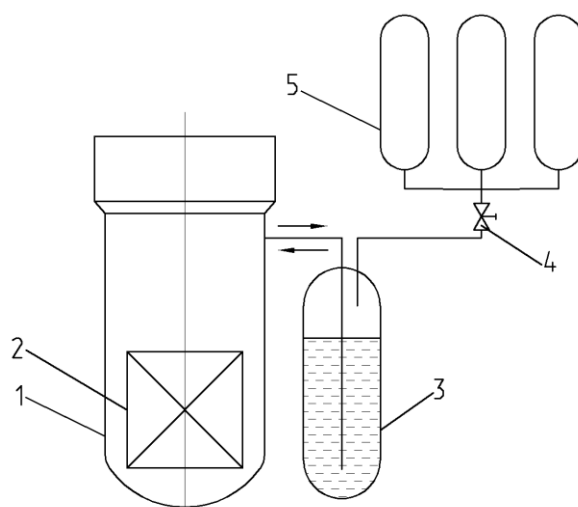
Fig. 7. Distributions of radiolytic gas concentrations in the primary circuit water and reactor equipment of the ships Savannah and Mutsu: 1 -  $C_{1к}$ ; 2 -  $C^B$ ; 3 -  $C^П$

Из графика видно, что вода, находящаяся на линии насыщения, дегазируется в КД, а пар насыщается радиолитическими газами до высоких концентраций. При работе установки происходит конденсация пара из парогазовой смеси на стенках компенсатора и перенос конденсата в воду компенсатора, тем самым снижается концентрация в паровом объеме. В результате устанавливаются равновесные концентрации в оборудовании системы компенсации и в 1-ом контуре.

Главным недостатком данной ПСКД является проблема отвода из парового пространства радиолитических неконденсирующихся газов, поступающих в него в результате дегазации теплоносителя первого контура.

### Газовая система компенсации давления отечественных судовых реакторных установок типа ОК-900

При модернизации ледокола «Ленин» реакторные установки ОК-150 с паровой системой компенсации были демонтированы, на их место установлены РУ ОК-900 блочной компоновки с газовой системой компенсации (рис. 8). Основными элементами системы являются компенсаторы, газовые баллоны и соединяющие их трубопроводы. Рабочим телом в системе является азот. Водяная полость компенсатора соединена с реактором, газовая – с газовыми баллонами, в которых находится основная часть газа. В некоторых вариантах весь газ сосредоточен в компенсаторах давления.



**Рис. 8. Схема газовой системы компенсации РУ типа ОК-900:**

1 – реактор, 2 – активная зона, 3 – компенсатор давления, 4 – запорная арматура, 5 – газовые баллоны

**Fig. 8. Scheme of gas compensation system of the ОК-900 reactor:**

1 – reactor, 2 – reactor core, 3 – pressure compensator, 4 – isolation valve, 5 – gas cylinders

При работе установки азот растворяется в воде компенсатора и за счет массообмена переносится в 1-ый контур, достигая равновесной концентрации.

Изменение концентрации азота в воде КД с течением времени описывается формулой [5]:

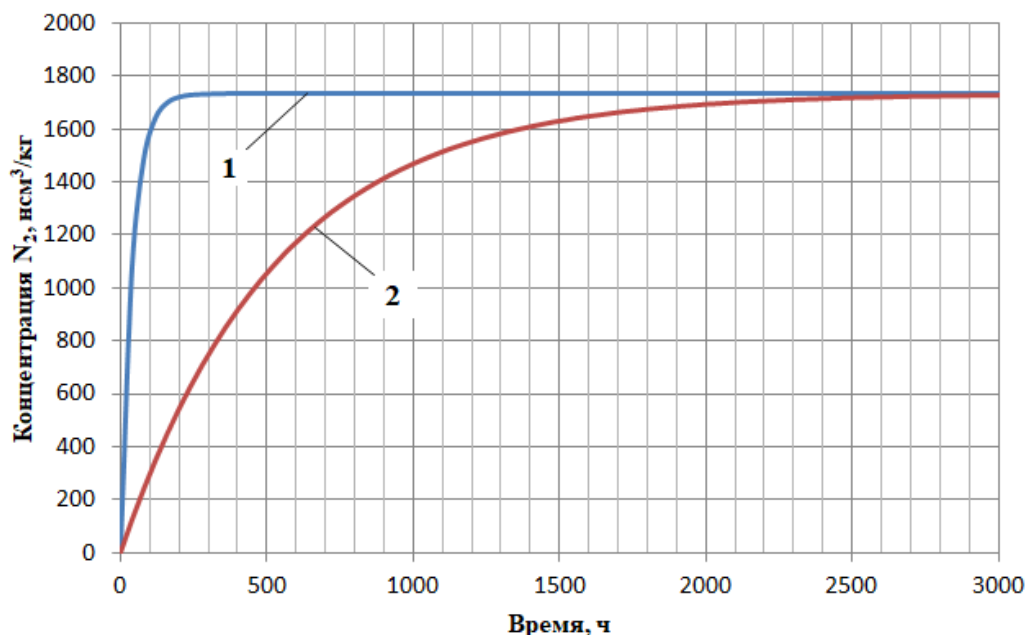
$$V_{\text{КД}} \cdot \frac{dC_{\text{КД}}}{dt} = \alpha \cdot S \cdot (C_{\text{КД}}^{\text{н}} - C_{\text{КД}}) \quad (14)$$

где  $V_{\text{КД}}$  – объем воды в КД;  $C_{\text{КД}}$  – концентрация газа в воде КД;  $S$  – площадь поверхности раздела фаз;  $\alpha$  – коэффициент массообмена между водной и газовой фазой;  $C_{\text{КД}}^{\text{н}}$  – концентрация насыщения в воде компенсатора.

Изменение концентрации азота в воде 1-го контура:

$$G_{1\text{К}} \cdot \frac{dC_{1\text{К}}}{dt} = \beta \cdot (C_{\text{КД}}^{\text{н}} - C_{1\text{К}}) \quad (15)$$

где:  $G_{1\text{К}}$  – масса воды в первом контуре;  $C_{1\text{К}}$  – концентрация газа в воде первого контура;  $\beta$  – коэффициент массообмена между 1-ым контуром и КД.



**Рис. 9. Изменение концентрации газа в ГСКД и теплоносителе 1-го контура:**  
1 –  $C_{КД}$ , 2 –  $C_{1К}$

**Fig. 9. Change in gas concentration in the gas pressure compensation system and the primary circuit coolant: 1 –  $C_{КД}$ , 2 –  $C_{1К}$**

На рис. 9 показан характер повышения концентрации растворенного азота в воде КД и теплоносителе 1-го контура в начале работы РУ. Для решения уравнений 14, 15 принимались следующие исходные данные:  $C_{КД}^H = 1734 \frac{\text{нсм}^3}{\text{кг}}$ ,  $V_{КД} = 2\text{м}^3$ ,  $S = 1\text{м}^2$ ,  $\alpha = 0,05 \frac{\text{м}}{\text{ч}}$ ,  $\beta = 0,01 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ,  $G_{1К} = 19160\text{кг}$ . Из графика видно, что насыщение воды КД азотом ( $C_{КД} = C_{КД}^H$ ) происходит достаточно быстро (примерно 120 час с момента подачи газа в КД) по сравнению с теплоносителем первого контура.

При аммиачном ВХР в теплоноситель первого контура вводится аммиак для поддержания необходимой концентрации водорода. Присутствие водорода обеспечивает подавление радиолиза и поддерживает концентрацию кислорода в теплоносителе не более 10 мкг/кг. Источниками водорода являются радиолиз воды, радиолитическое разложения аммиака при аммиачном водно-химическом режиме, коррозионные процессы конструкционных материалов [5]. Водород растворяется в теплоносителе до равновесной концентрации. В компенсаторе давления он выделяется из воды в газовый объем компенсатора и перемешивается с азотом в компенсаторе и газовых баллонах. Для предотвращения превышения нормативных значений концентрации водорода предусматриваются варианты дегазации теплоносителя: поэтапное снижение давления в первом контуре до атмосферного и удаление газа из оборудования, поглощение водорода специальным сорбентом в ионообменном фильтре, замена газа в системе компенсации и др.

Принципиальным отличием газовой системы компенсации от паровой системы является высокая концентрация растворенных газов в теплоносителе первого контура и воде системы компенсации. Процессы растворения, выделения и переноса газа, влияние его на работу активной зоны и оборудования первого контура, водно-газовый и химический режим рассмотрены в работах [9-11] и в данной статье не приводятся.

## Заключение

Результаты выполненного анализа СКД реакторных установок с ВВР и разработанная методика оценки переноса и распределения радиолитических газов в воде 1-го контура и оборудовании СКД могут быть полезны при разработке реакторных установок для судов и атомных станций малой мощности.

## Библиографический список

1. **Козн, П.** Технология воды энергетических реакторов. – М.: Атомиздат. 1973. – 327 с.
2. **Герасимов, В.В.** Водный режим атомных электростанций / В.В. Герасимов, А.И. Касперович, О.И. Мартынова. – М.: Атомиздат. 1976. – 398 с.
3. **Полуничев, В.И.** Анализ и оптимизация систем компенсации давления первого контура в реакторных установках с ВВР / В.И. Полуничев, С.А. Горбатов, Ю.А. Тимофеев // Научно-технический вестник Поволжья. 2020. № 6. С. 36-39.
4. **Бекман, И.Н.** Атомная и ядерная физика: радиоактивность и ионизирующие излучения: учебник для среднего профессионального образования / И.Н. Бекман. – М.: Юрайт, 2020. – 493 с.
5. **Полуничев, В.И.** Исследование процессов образования и переноса водорода в первом контуре водо-водяных реакторов с газовой системой компенсации давления и его химического взаимодействия с конструкционными материалами / В.И. Полуничев, Д.И. Новиков, М.А. Дюжий // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 67-76.
6. **Поздеев А.В.** Судовые атомные энергетические установки / А.В. Поздеев. – Л.: Судостроение, 1964. – 820 с.
7. Nuclear Engineering and Design. V.10. 1969.
8. **Kostrzewa, S.** Die Reaktorlage des Kernenergie-Forschungsschiffes NS “Otto Hahn” / S. Kostrzewa // Electrotechnische Zeitschrift, Helf. 20. 1969.
9. **Полуничев, В.И.** Возможные пути повышения ресурса активных зон с циркониевыми элементами ТВС для перспективных судов и АСММ / В.И. Полуничев, А.Ф. Филимонов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 4. С. 104-112.
10. **Полуничев, В.И.** Исследование процессов растворения, выделения и переноса газов в первом контуре реакторных установок и их влияния на точность поддержания давления в первом контуре / В.И. Полуничев, М.С. Кабина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 3 (142). С. 71- 81.
11. **Филимонов, А.Ф.** Газовыделение и газоперенос в оборудовании первого контура Реакторных установок с газовой системой компенсации давления / А.Ф. Филимонов, В.И. Полуничев, А.Е. Помысухина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 3 (106). С. 101-110.

*Дата поступления  
в редакцию: 03.04.2024*

*Дата принятия  
к публикации: 10.07.2024*



УДК 620.9+519.2

EDN: IDLUUU

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС

**С.С. Теплякова**

ORCID: 0009-0003-2691-0934 e-mail: svetlana20212120@mail.ru

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина  
*Иваново, Россия***В.А. Горбунов**

ORCID: 0000-0002-8629-4219 e-mail: gorbynov.w@mail.ru

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина  
*Иваново, Россия***Н.А. Лоншаков**

ORCID: 0000-0001-5353-9964 e-mail: nik-lon@mail.ru

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина  
*Иваново, Россия***М.Н. Мечтаева**

ORCID: 0009-0008-8245-1564 e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина  
*Иваново, Россия***П.А. Минеев**

ORCID: 0009-0004-8023-716X e-mail: pasha.mineevr@yandex.ru

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина  
*Иваново, Россия*

Проведена оценка влияния вторичных энергетических ресурсов на эффективность эксплуатации энергоблока АЭС. Методология исследования основана на принципе предельного энергосбережения. Регенеративный подогрев питательной воды является мощным фактором повышения тепловой экономичности АЭС. В качестве направления по использованию вторичных энергоресурсов второго контура была выбрана регенерация. Рассмотрены задачи по определению предельных характеристик, показывающие эффективность эксплуатации энергоблока, и проведено их сравнение с реальными значениями энергоблока № 3 с реактором ВВЭР-1000 Калининской АЭС. Рассмотрены варианты с различной мощностью работы блока с условной электрической мощностью от 750 до 1070 МВт. Предложены для анализа две целевые функции по оценке эффективности энергосбережения в регенеративных системах регенеративного подогрева воды. Предложенные целевые функции позволят составить технико-экономические рекомендации к повышению эффективности эксплуатации энергетического оборудования и систем и полезно использовать подведенную энергию при производстве электрической и тепловой мощностей.

**Ключевые слова:** АЭС, энергосбережение, вторичные энергетические ресурсы, регенерация, КИУМ, коэффициент предельной регенерации, коэффициент использования энергии.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Теплякова, С.С. Анализ влияния вторичных энергетических ресурсов на эффективность эксплуатации энергоблоков АЭС / С.С. Теплякова, В.А. Горбунов, Н.А. Лоншаков, М.Н. Мечтаева, П.А. Минеев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 48-61. EDN: IDLUUU

## ANALYSIS OF IMPACT OF SECONDARY ENERGY RESOURCES ON NPP POWER UNITS EFFICIENCY

**S.S. Teplyakova**

ORCID: 0009-0003-2691-0934 e-mail: svetlana20212120@mail.ru

Ivanovo State Power Engineering University

*Ivanovo, Russia*

**V.A. Gorbynov**

ORCID: 0000-0002-8629-4219 e-mail: gorbynov.w@mai.ru

Ivanovo State Power Engineering University

*Ivanovo, Russia*

**N.A. Lonshakov**

ORCID: 0000-0001-5353-9964 e-mail: nik-lon@mail.ru

Ivanovo State Power Engineering University

*Ivanovo, Russia*

**M.N. Mechtaeva**

ORCID: 0009-0008-8245-1564 e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

Ivanovo State Power Engineering University

*Ivanovo, Russia*

**P.A. Mineev**

ORCID: 0009-0004-8023-716X e-mail: pasha.mineevr@yandex.ru

Ivanovo State Power Engineering University

*Ivanovo, Russia*

**Abstract.** This article presents an assessment of the impact of secondary energy resources on the efficiency of a nuclear power plant (NPP) power unit operation. The principle of maximum energy saving was applied in the study. Regenerative heating of feedwater is a powerful factor in increasing the NPP thermal efficiency. Regeneration was chosen as the direction for using secondary energy resources of the second circuit. The limiting characteristics showing the efficiency of the power unit operation were determined and compared with the real values of power unit No. 3 with a WWER-1000 reactor of the Kalinin NPP. Options with different operating capacities of the unit with a nominal electrical power from 750 to 1070 MW were considered. Two objective functions for evaluating the efficiency of energy saving in regenerative systems of regenerative water heating are proposed for analysis. The proposed objective functions will allow to draw up technical and economic recommendations for improving the efficiency of operation of power equipment and systems, thus effectively using the supplied energy in the production of electrical and thermal power.

**Key words:** nuclear power plant, energy saving, secondary energy resources, regeneration, capacity factor, marginal regeneration factor, energy utilization factor.

**FOR CITATION:** S.S. Teplyakova, V.A. Gorbynov, N.A. Lonshakov, M.N. Mechtaeva, P.A. Mineev. Analysis of impact of secondary energy resources on NPP power units efficiency. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 48-61. EDN: IDLUUU

### Введение

В настоящее время для отечественной энергетики актуальным является получение необходимой выработки тепловой и электрической энергии [1] на основе принципа эффективного и рационального использования энергетических ресурсов. Возникает необходимость оценки и поиск путей энергосбережения. Основным принципом в области использования атомной энергии является обеспечение безопасности [2, 3]. Наиболее распространенная характеристика эффективности работы АЭС – коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), равный отношению фактической энерговыработки реакторной установ-

ки за определенный период к теоретической энерговыработке при работе без остановок при номинальной мощности. КИУМ не отражает эффективность использования энергии на АЭС, в то время как величина цехового передела для получения ядерного топлива достаточно высока и со временем продолжает увеличиваться. Объясняется это большими затратами на проектирование, возведение, эксплуатацию станции и вывод из эксплуатации после выработки ресурса. Тенденция развития атомной энергетики и постепенное замещение ею углеводородной энергетики ставит задачу переноса и применения лучших практик углеводородной энергетики в атомной.

В углеводородной энергетике большое внимание уделяется энергоэффективности и использованию вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). Оценка и анализ использования энергетических отходов внутреннего использования при утилизации ВЭР является непростой задачей, в которой необходимо учесть особенности работы для второго контура каждого элемента тепломеханического оборудования. Под энергетическими отходами понимается часть энергии, которая прямо или косвенно не используется как полезная для выпуска готовой продукции или услуг. Под вторичными энергоресурсами (ВЭР) понимается энергетический потенциал отходов продукции, побочных и промежуточных отходов, образующихся в технологических установках (системах), который не используется в самой установке, но может быть частично или полностью использован для энергоснабжения других установок.

Для первичного преобразования ядерной энергии в тепловую на АЭС широко используются водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР). Второй контур состоит из тепломеханического оборудования (рис. 1).

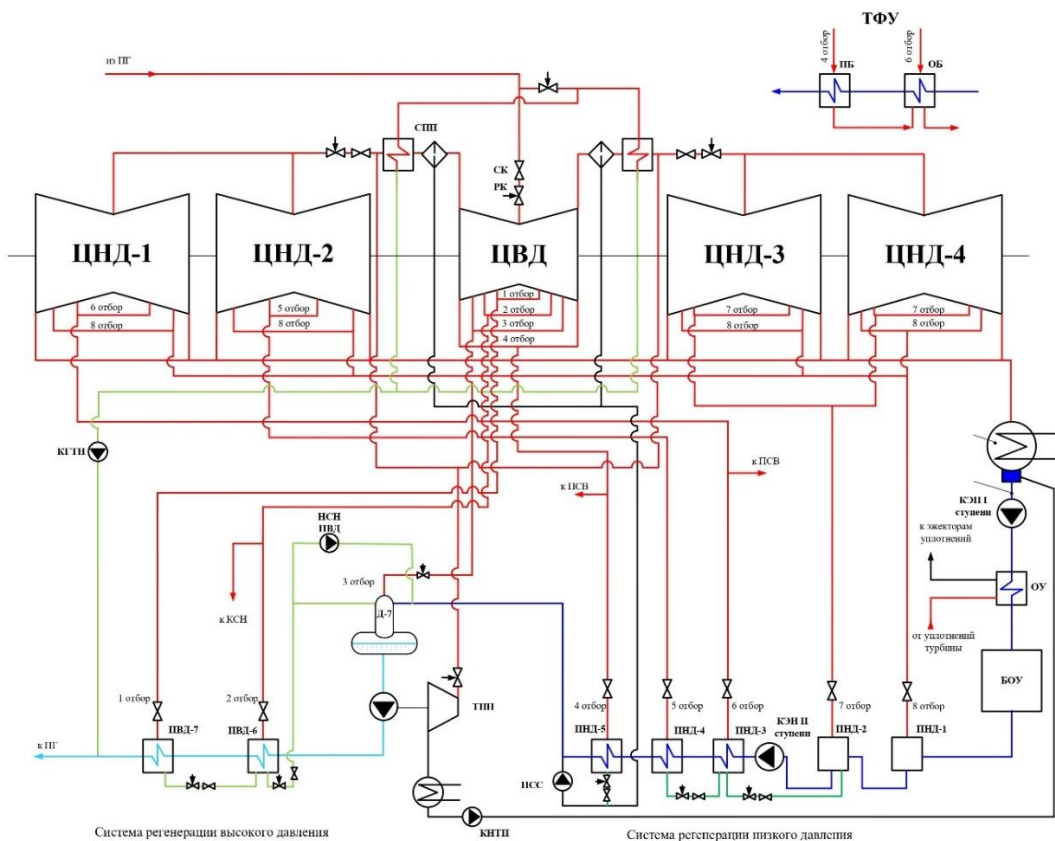


Рис. 1. Расчетная тепловая схема второго контура АЭС с реактором ВВЭР

Fig. 1. Calculated thermal scheme of the second circuit of a NPP with a water-water energetic reactors (WVER) reactor

Объектом исследования является система регенеративного подогрева воды, включающая в себя комплекс систем [4-6]:

- 1) систему регенерации высокого давления;
- 2) систему регенерации низкого давления;
- 3) деаэрационную установку;
- 4) систему сепарации и промежуточного перегрева пара.

Система регенеративного подогрева воды паротурбинных установок тепловых и атомных электрических станций представляют собой сложную систему взаимосвязанного между собой оборудования, объединяющую в себе особенности эксплуатации, как подогреватели низкого давления, деаэратор, подогреватели высокого давления, так и перекачивающие конденсатные и питательные насосы.

Целью данной работы является исследование оценки влияния вторичных энергетических ресурсов на эффективность эксплуатации энергоблока АЭС. В статье рассматриваются вторичные энергоресурсы, которые возвращаются обратно в технологическую установку за счет регенерации, и в результате этого сокращают количество подведенной энергии при неизменной величине поступления энергии в технологическую установку.

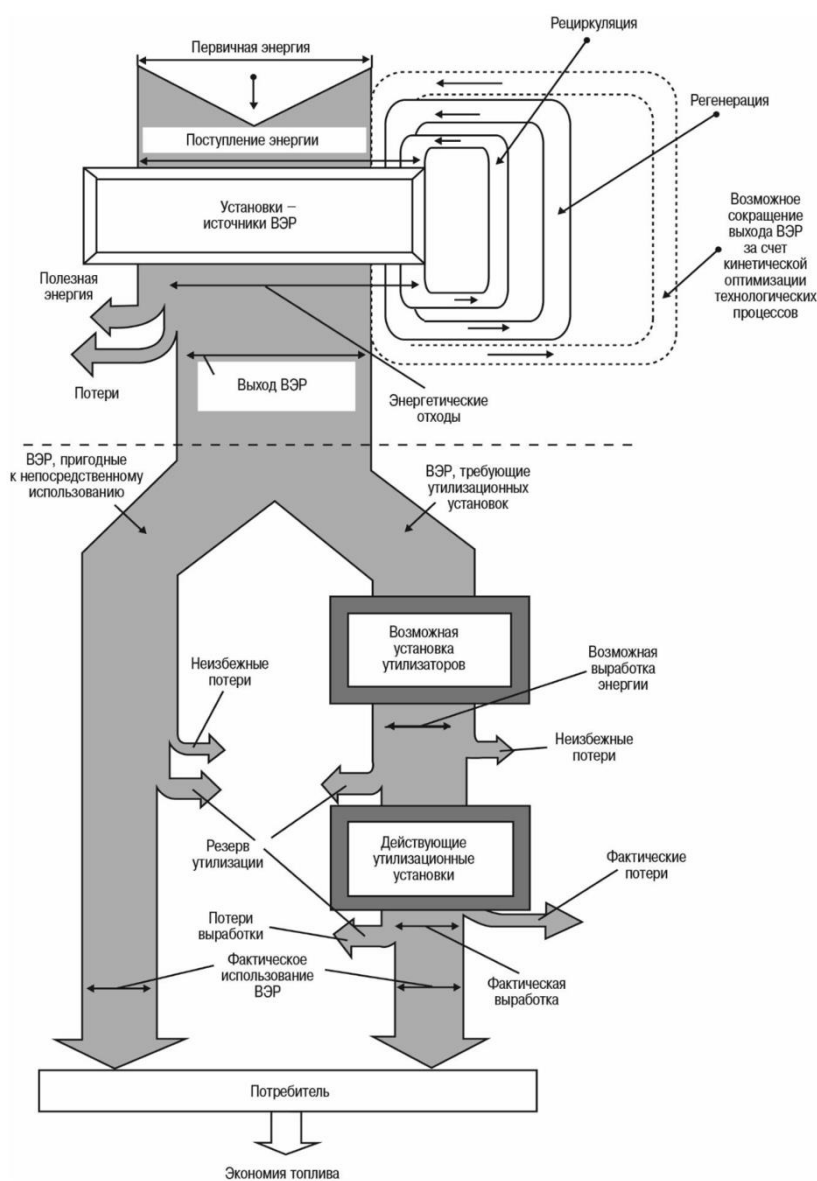


Рис. 2. Принципиальная схема использования энергоресурсов при утилизации ВЭР

Fig. 2. Schematic diagram of energy resource use during utilization of secondary energy resources

Все экспериментальные значения параметров были получены в ходе промышленного эксперимента на энергоблоке № 3 Калининской АЭС.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ направления по использованию вторичных энергоресурсов второго контура для повышения эффективности эксплуатации энергоблока АЭС;
- оценка эффективности внутреннего использования ВЭР, используя принцип предельного энергосбережения.

### Материалы и методы исследования

В качестве метода исследования был использован принцип предельного энергосбережения [7,8]. С учетом этого проведен поиск характеристики термодинамически идеальных технологических установок, наделенных некоторыми свойствами, теоретически обеспечивающими минимальный расход топлива (теплоты) на проведение теплотехнологического процесса. Приведенная на рис. 2 схема показывает основные направления исследования для выбора направления использования ВЭР. Необходимо обратить внимание на внутреннее использование ВЭР, которое имеет преимущества по сравнению с внешним. *Во-первых*, вторичные энергетические ресурсы используются в самой установке, что позволяет не думать о совмещении графиков работы технологической установки (источника ВЭР) и энергетической потребителя ВЭР. *Во-вторых*, затраты на реализацию мероприятий по внутреннему использованию ВЭР на порядок меньше, чем при внешнем использовании. Однако с точки зрения эффективности передачи энергии, внешнее использование ВЭР установки эффективнее внутреннего.

Все направления по утилизации ВЭР (рис. 2) можно распределить по затратам на их реализацию в следующей последовательности: рециркуляция; регенерация; непосредственное использование ВЭР; использование ВЭР через утилизационные установки. В качестве направления по использованию вторичных энергоресурсов второго контура была выбрана регенерация. Регенеративный подогрев питательной воды является мощным фактором повышения тепловой экономичности АЭС и осуществляется на АЭС всех типов. Он осуществляется отработавшим в турбине паром, который конденсируется затем в подогревателях. Выделенная этим паром теплота фазового перехода возвращается в реактор. Регенеративный подогрев конденсата снижает потерю теплоты с отработавшим паром и повышает эффективность использования энергии топлива. На электрических станциях с паротурбинными установками используется цикл Ренкина, термодинамический КПД которого ниже такового у цикла Карно. Внедрение регенеративного подогрева в цикл Ренкина заметно приближает его к предельно возможному значению – к КПД цикла Карно. В двухконтурных ядерных энергетических установках (ЯЭУ) АЭС с теплоносителем «вода под давлением» с использованием регенеративного теплообмена цикл Ренкина на сухом насыщенном паре имеет широкое распространение. В диаграмме T-S такой цикл имеет вид 1-2-3-4-1 (рис. 3).

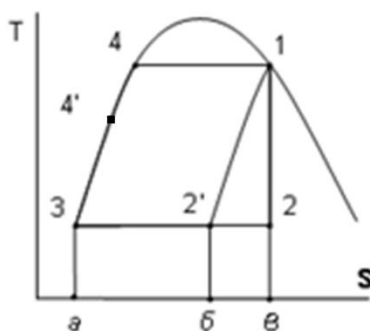


Рис. 3. Цикл Ренкина и предельный регенеративный цикл на насыщенном паре

Fig. 3. Rankine cycle and limiting regenerative cycle on saturated steam

На рис. 3 показан цикл Ренкина на насыщенном паре. Он ограничен замкнутой линией 1-2-3-4. Если расширение пара ниже точки 1 сочетать с отводом теплоты к питательной воде, процесс пойдет по линии 1-2', равноудаленной от линии 3-4. При обратном теплообмене температура питательной воды  $T_{п.в}$  в точке 4 будет равна температуре насыщения в точке 1, выше, чем в цикле Ренкина (точка 3), поэтому возрастет средний температурный уровень подвода тепла, следовательно, увеличится КПД. Цикл 1-2'-3-4 называют предельным регенеративным циклом [4,9,10]. Это цикл с максимально возможной тепловой экономичностью. Значения термического КПД предельного регенеративного цикла и КПД цикла Карно при одинаковых значениях начальной и конечной температуре циклов близки. Теплота, подведенная в реакторе к 1 кг в предельном регенеративном цикле [11, 12],

$$q_{п.э.} = i_1 - i_4, \quad (1)$$

где  $i_1$  – энтальпия пара после парогенератора, кДж/кг;  $i_4$  – энтальпия воды перед парогенератором, кДж/кг.

Теплота, отведенная в холодном источнике (конденсаторе),

$$q_k = (s_2' - s_3) \cdot T_2. \quad (2)$$

Так как  $s_2' - s_3 = s_1 - s_4$ , то

$$q_k = (s_1 - s_4) \cdot T_2, \quad (3)$$

где  $s_1$  – энтропия пара на входе в конденсатор, кДж/(кг\*К);  $s_4$  – энтропия воды на входе в парогенератор, кДж/(кг\*К);  $T_2$  – температура конденсата К.

С помощью выражений (1-2) можно выразить КПД предельного регенеративного цикла:

$$\eta_{пр} = 1 - \frac{q_k}{q_{п.э.}} = 1 - T_2 \frac{(s_1 - s_4)}{(i_1 - i_4)} \quad (4)$$

Значения КПД предельного регенеративного цикла при бесконечном количестве регенеративных отборов в зависимости от условной мощности представлены табл. 1. Для примера во всех расчетах приведены значения параметров и условных мощностей, которые были получены в режиме эксплуатации энергоблока № 3 Калининской АЭС.

**Таблица 1.**  
**Значения КПД предельного регенеративного цикла при бесконечном количестве регенеративных отборов в зависимости от условной мощности**

**Table 1.**  
**Efficiency values of the limiting regenerative cycle with an infinite number of regenerative extractions depending on the nominal power**

Условная мощность	МВт	750	1020	1030	1037	1070
Давление воды перед парогенератором	МПа	6,6	6,8	6,8	6,8	7,0
Давление воды после конденсатора	кПа	5,23	5,23	5,23	5,23	5,10
Энтропия воды перед парогенератором в точке 4	кДж/(кг·К)	5,844	5,829	5,829	5,829	5,815
Энтропия в точке 1	кДж/(кг·К)	8,378	8,378	8,378	8,378	8,387
Изменение энтропии воды от конденсатора до парогенератора	кДж/(кг·К)	2,534	2,549	2,549	2,549	2,572
Температура отвода тепла,	К	307,6	306,5	306,5	306,5	307,6
Теплота, отведенная в холодном источнике (конденсаторе)	кДж/кг	779,6	781,3	781,3	781,3	791,2
Температура подвода пара после парогенератора	К	552	552	552	552	553
Энтальпия пара после парогенератора	кДж/кг	2781	2781	2781	2781	2780
Давление пара после парогенератора	МПа	6,30	6,30	6,30	6,30	6,40
Энтальпия конденсата перед парогенератором	кДж/кг	1230	1230	1230	1230	1236

Окончание табл. 1.

Значения КПД предельного регенеративного цикла при бесконечном количестве регенеративных отборов в зависимости от условной мощности

Table 1 (continued).

Efficiency values of the limiting regenerative cycle with an infinite number of regenerative extractions depending on the nominal power

Теплота, подведенная в горячем источнике (парогенераторе)	кДж/кг	1551	1551	1551	1551	1544
КПД предельного регенеративного цикла	–	0,497	0,496	0,496	0,496	0,488

Из термодинамики следует, что если между двумя источниками тепла с температурами  $T_1$  и  $T_2$  организовать рабочий цикл (рис. 4), то его экономичность, измеряемая термическим КПД  $\eta_t$  существенно зависит от вида цикла. Предельно возможное (т.е. максимальное) значение КПД  $\eta_t$  имеет цикл Карно, состоящий из двух изотерм подвода и отвода тепла ( $T_1$  и  $T_2$ ) и двух адиабат – расширения  $s_1$  и сжатия  $s_4$  рабочего тела между этими изотермами.

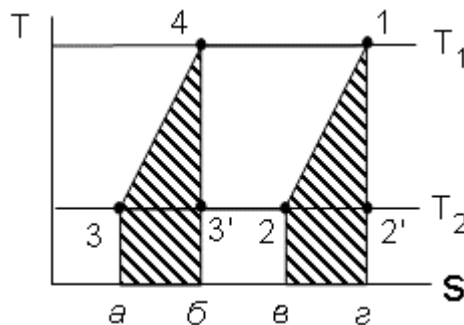


Рис. 4. Цикл Карно и обобщенный цикл Карно в диаграмме T – S

Fig. 4. Carnot cycle and generalized Carnot cycle in TS diagram

КПД такого цикла составляет

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (5)$$

Термический КПД у любых других циклов между этими же источниками тепла будет ниже, в том числе и у цикла Ренкина. Но существует цикл, равноценный по экономичности циклу Карно – обобщенный цикл Карно. Цикл 1-2'-3'-4'-1 – цикл Карно, а цикл 1-2-3-4-1 – обобщенный цикл Карно. КПД такого цикла в зависимости от условной мощности приведен в табл. 2. При бесконечно большом числе ступеней подогрева термический КПД цикла определяется однозначно, но если число ступеней конечно, то КПД цикла будет различным в зависимости от того, как распределены температуры подогрева между отдельными ступенями. Поскольку использование свежего пара в системе регенеративного подогрева неэффективно, последняя ступень подогрева питательной воды осуществляется непосредственно в парогенераторе.

Температура конденсата после последнего регенеративного подогревателя будет несколько ниже температуры насыщения в точке 1 и равна температуре в точке 4' (рис. 3) и поэтому КПД регенеративного цикла будет выше (табл. 3).

Если принять, что система регенерации должна иметь одинаковые по мощности отборы, то можно определить зависимость величины перепада температур на каждом отборе от их количества:

$$\Delta t = \frac{(T_1 - T_2)}{z + 1}, \quad (6)$$

где  $z$  – количество отборов.

**Таблица 2.**  
Значения предельно возможного значения КПД обобщенного цикла Карно  
в зависимости от условной мощности блока

**Table 2.**  
Values of the maximum possible efficiency of the generalized Carnot cycle  
depending on the nominal power of the unit

Условная мощность	Температура подвода тепла	Температура отвода тепла	Предельно возможное значение КПД обобщенного цикла Карно
МВт	К	К	-
750	545,9	307,6	0,437
1020	547,7	306,5	0,440
1030	547,7	306,5	0,440
1037	547,7	306,5	0,440
1070	547,0	307,6	0,438

Температура питательной воды на входе в парогенератор равна температуре питательной воды на выходе из подогревателя высокого давления перед парогенератором. Это значение температуры питательной воды, при котором КПД максимальный, называется термодинамически оптимальной температурой регенеративного подогрева Топ.

Значения КПД регенеративного цикла для существующей тепловой схемы, представленной на рис. 1 в зависимости от условной мощности представлены в табл. 3.

**Таблица 3.**  
Значения КПД регенеративного цикла для существующей тепловой схемы,  
представленной на рис. 1, в зависимости от условной мощности блока

**Table 3.**  
Efficiency values of the regenerative cycle for the existing thermal circuit shown in Figure 1  
depending on the nominal power of the unit

Условная мощность	МВт	750	1020	1030	1037	1070
Давление воды перед парогенератором	МПа	6,3	6,3	6,3	6,3	6,4
Давление воды после конденсатора	кПа	5,23	5,23	5,23	5,23	5,10
Энтропия воды перед парогенератором в точке 4'	кДж/(кг·К)	6,583	6,530	6,524	6,521	6,333
Энтропия в точке 1	кДж/(кг·К)	8,378	8,378	8,378	8,378	8,387
Изменение энтропии воды от конденсатора до парогенератора	кДж/(кг·К)	1,796	1,848	1,855	1,858	2,054
Температура отвода тепла	К	307,6	306,5	306,5	306,5	307,6
Теплота, отведенная в холодном источнике (конденсаторе)	кДж/кг	552,4	566,5	568,4	569,4	631,7
Температура подвода пара после парогенератора	К	545,9	547,7	547,7	547,7	547
Энтальпия пара после парогенератора	кДж/кг	2787	2785	2785	2785	2786
Давление пара после парогенератора	МПа	6,30	6,30	6,30	6,30	6,40
Энтальпия конденсата перед парогенератором	кДж/кг	773	794	797	799	912
Теплота, подведенная в горячем источнике (парогенераторе)	кДж/кг	2014	1991	1988	1986	1874
КПД регенеративного цикла	-	0,726	0,715	0,714	0,713	0,663

Регенеративный подогрев характеризуют безразмерной величиной степенью регенерации, отношением фактического подогрева питательной воды к максимально возможному подогреву:



$$\sigma_p = \frac{(T_{оп} - T_2)}{(T_1 - T_2)}. \quad (7)$$

Для смешивающих подогревателей термодинамическая оптимальная степень регенерации, соответствующая максимальному КПД

$$\sigma_p = \frac{(T_{пв}^{опт} - T_2)}{(T_1 - T_2)} = \frac{z}{z+1}. \quad (8)$$

где  $T_{пв}^{опт}$  – оптимальная температура питательной воды для смешивающих подогревателей. Вариационные расчеты показывают, что максимум КПД соответствует таким же значениям  $\sigma_p$  и для других подогревателей.

Экономически оптимальная степень регенерации для двухконтурных АЭС, удовлетворяющая этому условию, составляет 85-90 % от термодинамического оптимума

$$\sigma_p^э = k \cdot \sigma_p, \quad (9)$$

где  $k = 0,85 - 0,9$ .

На тепловой схеме (рис. 1) представлены 8 регенеративных подогревателей. Оптимальная степень регенерации, соответствующая максимальному термодинамическому КПД, равна 0,889. При этом оптимальная температура питательной воды после последнего регенеративного подогревателя, определенная по формуле (8), приведена в табл. 4. Значения экономически оптимальной температуры питательной воды после последней ступени регенеративного подогрева для тепловой схемы (рис. 1), в зависимости от условной мощности блока представлены в табл. 4.

**Таблица 4.**

**Экономически оптимальная температура питательной воды после последней ступени регенеративного подогрева в зависимости от условной мощности блока**

**Table 4.**

**Economically optimal temperature of feedwater after the last stage of regenerative heating depending on the nominal power of the unit**

Условная мощность	МВт	750	1020	1030	1037	1070
Температура отвода тепла, $T_2$	К	307,6	306,5	306,5	306,5	307,6
Температура отвода тепла, $T_1$	К	546	548	548	548	547
Температура конденсата после последнего рег. теплообменника	° С	180	187	188	188	213
Оптимальная температура конденсата после последнего рег. теплообменника	° С	215- 225	216- 226	216- 226	216- 226	215- 226

Для определения эффекта регенерации используется коэффициент использования энергии (КИЭ), который носит несколько названий, в том числе коэффициент использования энергии (топлива, объема, отдачи, реализации, использования) химического тепла.

Этот коэффициент упоминается в «большой» энергетике [13], так и промышленной [14]

$$\eta_m = \frac{Q_x - Q_{э.ух}}{Q_x}, \quad (10)$$

где  $Q_x$  – химическая энергия топлива, которую применительно к атомной энергетике можно заменить на тепловую энергию, поступающую в парогенератор  $Q_{пг}$ ;  $Q_{э.ух}$  – энергия уходящих газов, применительно к атомной энергетике заменяется на энергию отвода тепловой энергии в конденсаторе  $Q_k$ .

После всех преобразований коэффициент использования энергии применительно к атомной энергетике выражается следующим образом:

$$\eta_m = \frac{Q_{пе} - Q_k}{Q_{пе}} \quad (11)$$

Из уравнения теплового баланса паротурбинной установки:

$$Q_{пе} = N_{эл} + Q_p + Q_k, \quad (12)$$

где  $N_{эл}$  – электрическая энергия, получаемая на клеммах генератора;  $Q_p$  – энергия, поступающая в парогенератор от регенеративных отборов.

С учетом изложенного можно записать:

$$Q_k = Q_{пе} - N_{эл} - Q_p, \quad (13)$$

при этом, подставляя в выражение (11) соотношение (13), получаем:

$$\eta_m = \frac{N_{эл} + Q_p}{Q_{пе}}, \quad (14)$$

После добавления в числитель затрат на теплоснабжение  $Q_m$ , выражение коэффициента использования энергии (КИЭ) соответствует общепринятому в энергетике:

$$\eta_m = \frac{N_{эл} + Q_p + Q_m}{Q_{пе}} \quad (15)$$

В табл. 5 приведены результаты расчета коэффициента использования энергии (КИЭ) без учета нагрева питательной воды паром из отборов турбины. В качестве полезной мощности учитывалась условная мощность электрической энергии. Коэффициент определялся по формуле (11). Результаты расчета коэффициента использования энергии (КИЭ) с учетом регенеративных отборов приведены в табл. 6.

Таблица 5.

**Коэффициент использования энергии для АЭС без регенеративных отборов**

Table 5.

**Energy utilization factor for NPP without regenerative extraction**

Условная мощность	МВт	750	1020	1030	1037	1070
Расход пара после ПГ	т/ч	4202	5519	5568	5592	5985
Температура пара после парогенератора	°С	272,9	274,7	274,7	274,7	274,0
Энтальпия пара после парогенератора	кДж/кг	2787	2785	2785	2785	2786
Температура пара в конденсаторе	°С	34,6	33,5	33,5	33,5	34,6
Энтальпия конденсата после конденсатора	кДж/кг	145	149,4	149,4	149,4	145
Энтальпия пара после турбины на линии насыщения	кДж/кг	2564	2562	2562	2562	2564
Энтальпия пара после турбины (с учетом влажности)	кДж/кг	2144	2120	2119	2117	2142
Тепловая энергия, поступающая в парогенератор $Q_{пг}$	МВт	3084	4040	4076	4094	4390
Тепловая энергия, которую необходимо отвести в конденсаторе $Q_k$	МВт	2334	3020	3046	3057	3320
КИЭ в установке без учета регенерации	-	0,243	0,252	0,253	0,253	0,244

Таблица 6.

**Коэффициент использования энергии для АЭС с регенеративными отборами**

Table 6.

**Energy utilization factor for NPPs with regenerative extraction**

Условная мощность	МВт	750	1020	1030	1037	1070
Расход пара после ПГ	т/ч	4202	5519	5568	5592	5985
Температура пара после парогенератора	°С	272,9	274,7	274,7	274,7	274,0
Энтальпия пара после парогенератора	кДж/кг	2787	2785	2785	2785	2786
Температура пара в конденсаторе	°С	34,6	33,5	33,5	33,5	34,6

Окончание табл. 6.

Коэффициент использования энергии для АЭС с регенеративными отборами

Table 6 (continued)

Коэффициент использования энергии для АЭС с регенеративными отборами

Энтальпия конденсата после конденсатора	кДж/кг	145	149,4	149,4	149,4	145
Энтальпия пара после турбины	кДж/кг	2564	2562	2562	2562	2564
Энтальпия пара после турбины (с учетом влажности)	кДж/кг	2144	2120	2119	2117	2142
Тепловая энергия, поступающая в парогенератор $Q_{\text{пр}}$	МВт	3084	4040	4076	4094	4390
Температура воды перед парогенератором	°С	186	198,2	198,2	198,2	216,6
Энтальпия конденсата после конденсатора	кДж/кг	789,9	844,3	844,3	844,3	928
Тепловая энергия, поступающая в парогенератор от регенеративных отборов	МВт	753	1065	1075	1079	1302
Тепловая энергия, которую необходимо отвести в конденсаторе $Q_{\text{к}}$	МВт	1581	1955	1972	1977	2019
КИЭ в установке с регенерацией	-	0,487	0,516	0,516	0,517	0,540

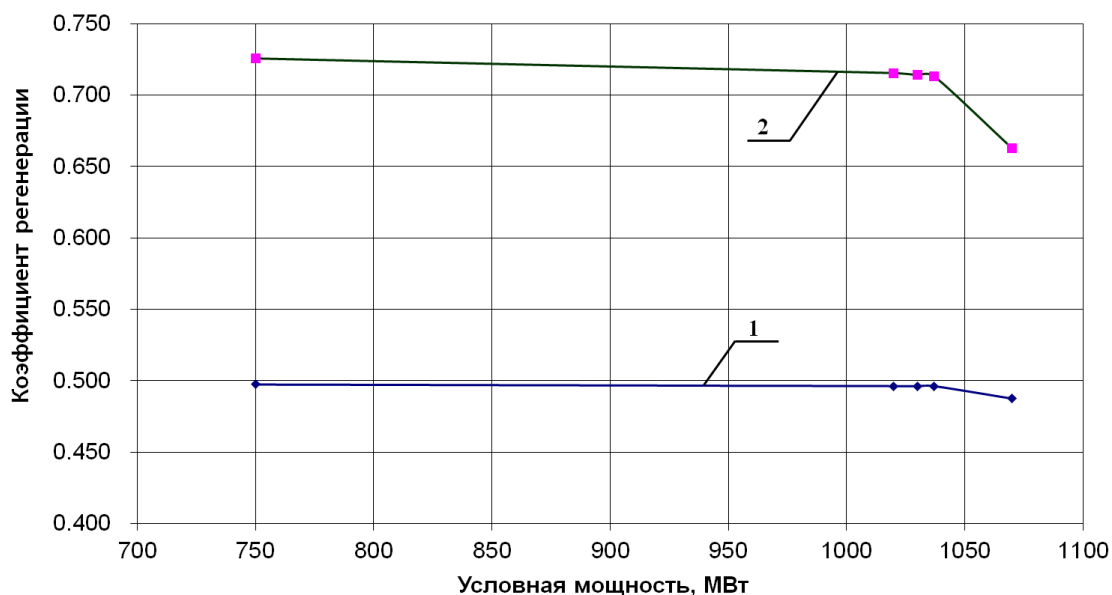
### Расчеты и результаты исследования

В ходе исследований рассмотрены задачи по определению предельных характеристик, показывающие эффективность эксплуатации энергоблока и проведено их сравнение с реальными значениями энергоблока № 3 с реактором ВВЭР-1000 Калининской АЭС. Рассмотрены варианты с различной мощностью работы блока с условной электрической мощностью от 750 до 1070 МВт. Все экспериментальные значения параметров были получены в ходе промышленного эксперимента на энергоблоке № 3 Калининской АЭС.

Предложены для анализа две целевые функции по оценке эффективности энергосбережения в регенеративных системах регенеративного подогрева воды. Первая функция, ранее известная в энергетике, – КПД регенеративного цикла. При этом определена предельная характеристика энергосбережения, к значению которой необходимо стремиться КПД предельного регенеративного цикла, для получения максимального энергосбережения. Графики зависимости величин КПД регенеративного и предельного регенеративного циклов от величины условной мощности для тепловой схемы паротурбинной установки на энергоблоке № 3 Калининской АЭС представлены на рис. 5.

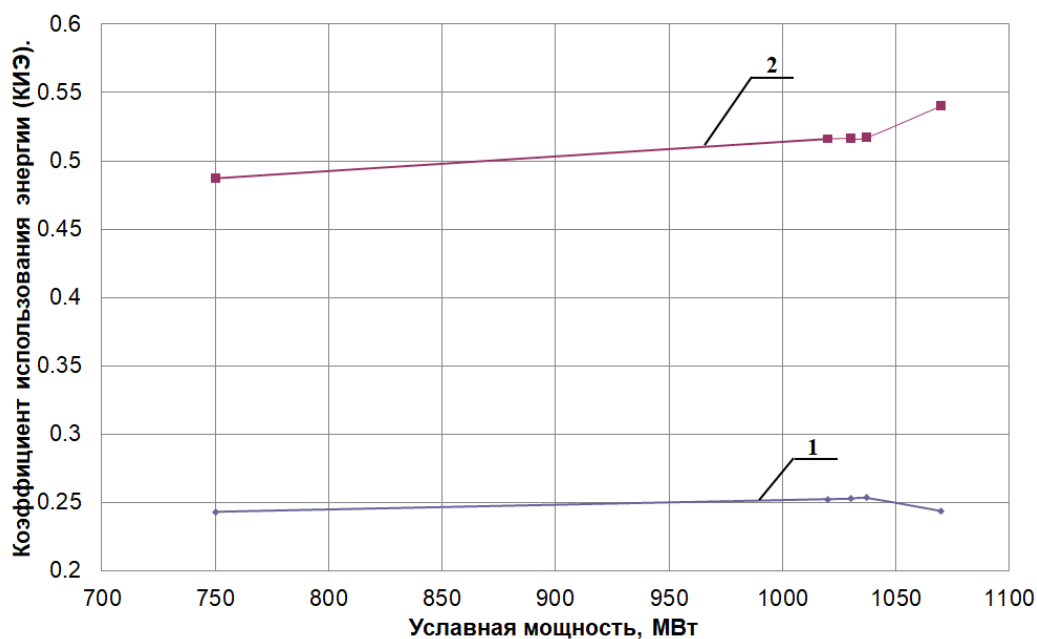
Вторая функция ранее в атомной энергетике не использовалась, это коэффициент использования энергии (КИЭ). Предельно минимальными значениями КИЭ будут значения, определенные для установок без регенеративных отборов. Максимальным теоретическим (недостижимым) значением коэффициента использования энергии (КИЭ) будет единица. Графики зависимости величин КИЭ для АЭС без регенерации и для АЭС с регенеративными отборами от величины условной мощности для тепловой схемы паротурбинной установки на энергоблоке №3 Калининской АЭС приведены на рис. 6.

Анализ графиков показывает, что есть большой резерв по повышению эффективности использования регенеративных отборов турбин на АЭС. Необходимо во время эксплуатации блоков оценивать приведенные целевые функции, при этом коэффициент регенерации должен стремиться к предельному коэффициенту регенерации, т.е. должен быть как можно меньшим, а коэффициент использования энергии (КИЭ) должен стремиться к единице.



**Рис. 5. Коэффициент регенеративного цикла в зависимости от условной мощности:**  
 1 – коэффициент предельного регенеративного цикла; 2 – коэффициент регенеративного цикла

**Fig. 5. Regenerative cycle factor depending on the nominal power:**  
 1 – limiting regenerative cycle factor; 2 – regenerative cycle factor



**Рис. 6. Коэффициент использования энергии (КИЭ) в зависимости от условной мощности:**  
 1 – КИЭ без регенеративного подогрева; 2 – КИЭ с регенеративным подогревом

**Fig. 6. Energy utilization factor depending on the nominal power:**  
 1 – without regenerative heating; 2 – with regenerative heating

### Выводы

Проанализировано два коэффициента, по которым можно оценить влияние вторичных энергетических ресурсов на эффективность работы энергоблока № 3 Калининской АЭС. В качестве направления по использованию вторичных энергоресурсов второго контура была выбрана регенерация. На основе принципа предельного энергосбережения определены пре-

дельные (максимальные) значения этих коэффициентов в зависимости от удельной мощности.

В результате исследования получены следующие выводы.

1. КПД предельного регенеративного цикла для АЭС изменяется от 0,497 до 0,488. С увеличением условной мощности блока АЭС предельный КПД регенеративного цикла уменьшается.
2. Реальный КПД регенеративного цикла на АЭС выше и изменяется от 0,726 до 0,668. Задачей повышения эффективности эксплуатации системы регенерации является максимально приближать значение КПД регенеративного цикла к КПД предельного регенеративного топливного цикла.
3. Проведенный анализ показал минимальные значения коэффициента использования энергии (КИЭ) для АЭС без использования систем регенерации. Значения коэффициента использования энергии варьируются в диапазоне от 0,243 до 0,253. В зависимости значения КИЭ от величины условной мощности наблюдается оптимум. Ниже этого значения КИЭ на АЭС с реакторами ВВЭР-1000 быть не может.
4. Реальный КИЭ с использованием системы регенеративного подогрева воды паротурбинной установки энергоблока № 3 Калининской АЭС меняется от 0,497 до 0,540. Наилучшее значение этого коэффициента стремится к единице. Это возможно при отсутствии потерь в конденсаторе и при использовании тепловых отходов после турбины для целей теплоснабжения. Установлено, что с увеличением условной мощности коэффициент использования энергии (КИЭ) также увеличивается.
5. Для оценки эффективности систем регенерации второго контура АЭС предложено использовать коэффициент использования энергии (КИЭ) после его модернизации и адаптации к атомной энергетике.

Представленные результаты по анализу эффективности эксплуатации энергоблоков открывают возможность оценки регенеративных систем подогрева воды энергоблоков АЭС с использованием характеристик: КПД регенеративного цикла и коэффициента использования энергии (КИЭ). Предложенные целевые функции позволят составить технико-экономические рекомендации к повышению эффективности эксплуатации энергетического оборудования и систем и полезно использовать подведенную энергию при производстве электрической и тепловой мощностей.

### Библиографический список

1. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 № 261-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс] URL [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_93978/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/) (дата обращения 20 марта 2024 г.).
2. Федеральный закон «Об использовании атомной энергии» от 21.11.1995 № 170-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс] URL [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_8450/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8450/) (дата обращения 20 марта 2024 г.).
3. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 14.11.2023) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [Электронный ресурс] URL <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-21071997-n-116-fz-o/> (дата обращения 20 марта 2024 г.).
4. **Маргулова, Т.Х.** Атомные электрические станции / Т.Х. Маргулова – М.: Высшая школа, 1978. – 360 с.
5. **Ефимочкин, Г.И.** Совершенствование тепловых схем энергоблоков / Г.И. Ефимочкин, Б.И. Шмуклер, Г.Д. Авруцкий // Теплоэнергетика. 2000. № 4. С. 48-53.
6. **Шарапов, В.И.** Расчет энергетической эффективности усовершенствованных схем подогрева исходной воды в системах регенерации паровых турбин ТЭЦ / В.И. Шарапов, А.В. Кузьмин // Труды Академэнерго. 2017. № 3. С. 53-65.
7. **Ключников, А.Д.** Основные направления реализации предельного энергосбережения в тепло-технологии // Промышленная энергетика. 1986. № 10. С. 3-5.

8. **Данилов, Н.И.** Основы энергосбережения / Н.И. Данилов, Я.М. Щелоков. – Екатеринбург: ГУ СО «Институт энергосбережения», 2008. – 526 с.
9. Турбины тепловых и атомных электрических станций / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 488 с.
10. **Александров, А.А.** Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок / А.А. Александров. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 158 с.
11. **Кудинов, В.А.** Техническая термодинамика и теплопередача / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, Е.В. Стефанюк, – М.: Юрайт, – 2011. – 560 с.
12. Основные методические положения по планированию использования вторичных энергетических ресурсов // НИИ планирования и нормативов – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 64 с.
13. **Трухний А.Д.** Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки/ А.Д. Трухний, В.Б. Ломакин – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 540 с.
14. **Сушон, С.П.** Вторичные энергетические ресурсы промышленности СССР / С.П. Сушон, А.Г. Завалке, М.И. Минц. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 03.04.2024*

*Дата принятия  
к публикации: 19.06.2024*

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.016

EDN: MOGMFK

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

**Н.В. Бузунов**ORCID: 0000-0003-0368-4199 e-mail: [buzunovnv@bmstu.ru](mailto:buzunovnv@bmstu.ru)Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
Москва, Россия**Р.Д. Пирожков**ORCID: 0000-0002-1666-777X e-mail: [pirozhkov@bmstu.ru](mailto:pirozhkov@bmstu.ru)Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
Москва, Россия

Представлена математическая имитационная модель гидравлического привода для реализации вычислительных экспериментов в режиме реального времени. Описан подход к учету КПД гидромашин и гидропривода в целом, обеспечивающий устойчивость работы имитационной модели в переходных режимах. Показано, что разработанная модель позволяет получить качественное совпадение характеристик имитационной модели и объекта моделирования. Продемонстрирована относительная простота модели, позволяющая проводить расчеты в том случае, когда нет возможности получить точные данные о параметрах моделируемых гидромашин.

**Ключевые слова:** гидравлический привод, аксиально-поршневый гидропривод, имитационное моделирование, модель гидростатической трансмиссии.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Бузунов, Н.В. Имитационная модель гидростатической трансмиссии в режиме реального времени / Н.В. Бузунов, Р.Д. Пирожков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 62-71. EDN: MOGMFK

## REAL-TIME SIMULATION MODEL OF HYDROSTATIC TRANSMISSION

**N.V. Buzunov**ORCID: 0000-0003-0368-4199 e-mail: [buzunovnv@bmstu.ru](mailto:buzunovnv@bmstu.ru)Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russia**R.D. Pirozhkov**ORCID: 0000-0002-1666-777X e-mail: [pirozhkov@bmstu.ru](mailto:pirozhkov@bmstu.ru)Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russia

**Abstract.** The article presents a real-time mathematical simulation model of a hydraulic drive. An approach to taking into account the efficiency of hydraulic machines and hydraulic drives as a whole is described, ensuring the stability of the simulation model in transient modes. It is shown that the developed model allows obtaining a high-quality match between the characteristics of the simulation model and the modeling object. The relative simplicity of the model is demonstrated, allowing calculations to be carried out even in cases where it is not possible to obtain accurate data on the parameters of the simulated hydraulic machines.

**Key words:** hydraulic drive, axial piston hydraulic drive, simulation modeling, hydrostatic transmission model.

**FOR CITATION:** N.V. Buzunov, R.D. Pirozhkov. Real-time simulation model of hydrostatic transmission. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 62-71. EDN: MOGMFK

## Введение

В настоящее время неотъемлемой частью разработки новых транспортных средств и сопутствующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ является применение имитационных моделей. Оно позволяет рассмотреть широкий спектр эксплуатационных режимов проектируемой машины и сделать вывод о правильности подбора применяемых компонентов, эксплуатационных качествах машины, эффективности ее применения в тех или иных ситуациях. Отдельно можно рассмотреть имитационные модели реального времени, дающие возможность вычислительных экспериментов с привлечением операторов проектируемых машин с целью получения обратной связи. Также они позволяют проводить компонентное тестирование физических модулей управления системами машины во взаимодействии с имитационной моделью.

Одним из основных требований к разрабатываемой модели гидростатического привода является обеспечение ее работы в режиме реального времени. Выполнение данного требования обуславливается совокупными возможностями модели:

- использования наиболее эффективные с точки зрения временных затрат решатели;
- увеличения временного шага расчета модели без значительных потерь в точности.

Практика показывает, что дискретные решатели с фиксированным временным шагом обладают наибольшей скоростью расчета, но при этом не всегда могут обеспечить устойчивую работу модели. Указанная «неустойчивость» заключается в широком диапазоне изменения рабочих параметров модели между временными шагами. Такое поведение наблюдается в переходных режимах, а также при наличии в модели отдельных элементов высокой «жесткости». Под элементами высокой «жесткости» понимаются элементы, имеющие на несколько порядков больше изменение выходных параметров относительно незначительного изменения входных параметров. Для использования модели в режиме реального времени желательно обеспечить ее устойчивую работу при использовании наиболее простых и быстрых методов решения, таких как метод Эйлера или методы Рунге-Кутты.

### 1. Теоретические зависимости, используемые в математической модели гидростатического привода

Типичная схема регулируемого гидростатического привода с аксиально-поршневыми гидромашинами представлена на рис. 1. Подобный гидропривод находит широкое применение в транспортном машиностроении при необходимости получить бесступенчатую передачу или в силу компоновочных соображений [1, 2]. На рис. 2 представлены примеры образцов техники, в которых может применяться гидростатический привод.

В рассматриваемой модели гидростатического привода гидролинии высокого давления и подпитки представляются в виде замкнутых емкостей постоянного объема. Изменение давления в линиях происходит за счет сжимаемости гидравлической жидкости, согласно уравнению (1):

$$p = \frac{E_{\text{ж}}}{V_{\text{ж}}} \int L_{\text{сж}} dt, \quad (1)$$

где  $p$  – давление в линии;  $E_{\text{ж}}$  – приведенный объемный модуль упругости рабочей жидкости;  $V_{\text{ж}}$  – объем гидролинии с учетом частей рабочих объемов гидронасоса и гидромотора, связанных с данной линией;  $L_{\text{сж}}$  – объем жидкости, поступивший в гидролинию.



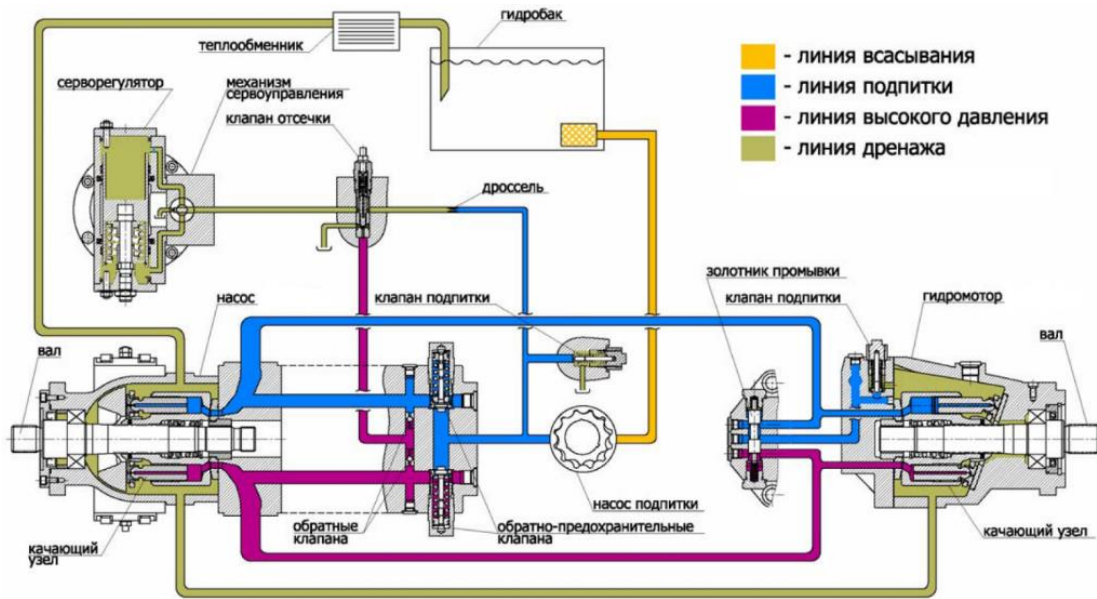


Рис. 1. Схема аксиально-поршневого гидропривода

Fig. 1. Machines that use hydrostatic drive



Рис. 2. Машины, в которых применяется гидростатический привод

Fig. 2. Axial piston hydraulic drive diagram

С целью определения объема жидкости, поступившей в гидролинию высокого давления и подпитки, можно записать следующие уравнения расходов (2):

$$q_H n_H e_H - q_M n_M - Q_{кл_1} + Q_{подк_1} - Q_{ут_н} - Q_{ут_м} - Q_{ут_{вн_1}} = \frac{V_{ж_1}}{E_{ж}} \frac{dp_1}{dt}$$

для линии высокого давления,

$$-q_H n_H e_H + q_M n_M - Q_{кл_2} + Q_{подк_2} + Q_{ут_н} + Q_{ут_м} - Q_{ут_{вн_2}} = \frac{V_{ж_2}}{E_{ж}} \frac{dp_2}{dt} \quad (2)$$

для линии подпитки,

где:  $q_H$  – максимальный рабочий объем гидронасоса;

$q_M$  – рабочий объем гидромотора;

$n_H, n_M$  – частота вращения вала гидронасоса и гидромотора соответственно;

$e_H$  – параметр регулирования гидронасоса, может изменяться в пределах [-1;1];

$Q_{кл_1}, Q_{кл_2}$  – расходы через сливные клапана в линии высокого давления и линии подпитки соответственно;

$Q_{подк_1}, Q_{подк_2}$  – расходы через клапана подпитки гидролиний;

$Q_{ут_н}, Q_{ут_м}$  – внутренние утечки жидкости в гидронасосе и гидромоторе соответственно;

$Q_{ут_{вн_1}}, Q_{ут_{вн_2}}$  – внешние утечки жидкости в линии высокого давления и в линии подпитки соответственно;

$p_1, p_2$  – давление в линии высокого давления и в линии подпитки соответственно.

Знаки в уравнениях перед расходами  $q_H n_H e_H$  и  $q_M n_M$  не зависят от знака перепада давления ( $p_1 - p_2$ ) и записаны для направления вращения валов гидромашин, принятых за положительное.

Внутренние утечки жидкости в гидромашинах определяются по формуле (3) [3, 4]:

$$Q_{ут} = k_{ут.внутр}(p_1 - p_2) \quad (3)$$

где:  $k_{ут.внутр}$  – коэффициент внутренних утечек гидромашин.

Внешние утечки жидкости в гидромашинах определяются по формуле (4) [3, 4]:

$$Q_{ут_{вн_i}} = k_{ут.внеш} i p_i \quad (4)$$

где:  $k_{ут.внеш i}$  – коэффициент внешних утечек для гидролинии.

Расходы  $Q_{кл_1}, Q_{кл_2}$  и  $Q_{подк_1}, Q_{подк_2}$  определяются согласно зависимостям (5)(5), (6):

$$\begin{cases} Q_{кл i} = Q_{кл max}, & \text{если } p_i > p_{max}, \\ Q_{кл i} = 0, & \text{если } p_i \leq p_{max}, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} Q_{подк i} = Q_{подк max}, & \text{если } p_i < p_{min}, \\ Q_{подк i} = 0, & \text{если } p_i \geq p_{min}, \end{cases} \quad (6)$$

где:  $Q_{кл max}$  – константа, определяющая расход через дискретный сливной клапан;

$p_{max}$  – максимальное допустимое давление в гидролинии;

$Q_{подк max}$  – константа, определяющая расход через дискретный клапан подкачки;

$p_{min}$  – давление подкачки.

Переход от разности давлений в гидролиниях к теоретическому крутящему моменту, реализуемому на гидронасосе и гидромоторе, происходит по следующим зависимостям (7) [5]:

$$\begin{aligned} T_H &= 0,159(p_2 - p_1)q_H e_H, \\ T_M &= 0,159(p_1 - p_2)q_M, \end{aligned} \quad (7)$$

Для определения крутящего момента механических потерь, можно использовать предложенную зависимость (8)(8):

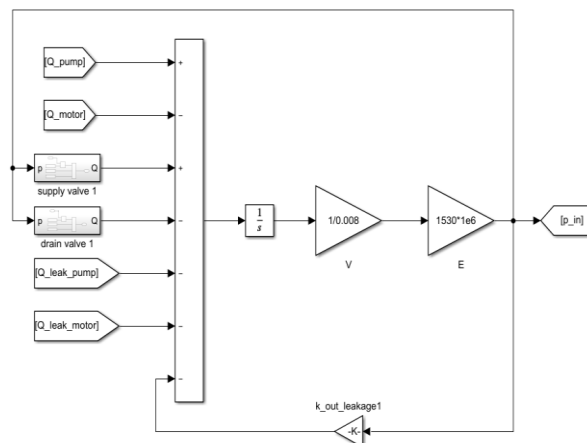
$$T_{\text{пот}} = -\text{sign}(\omega) \cdot T_{\text{тр}} \left( \left( 1 - e^{-\frac{1}{S_1}|\omega|} \right) + S_2|\omega| \right), \quad (8)$$

где:  $\omega$  – угловая скорость вращения вала гидромашины;  
 $T_{\text{тр}}$  – момент сопротивления в момент страгивания вала гидромашины;  
 $S_1, S_2$  – положительные константы, определяющие вид кривой момента сопротивления.

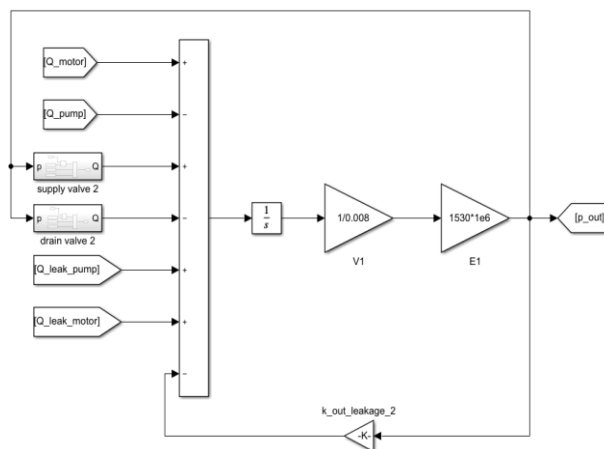
Фактический момент на валу гидромашины равен сумме теоретического момента и момента механических потерь.

## 2. Описание математической имитационной модели гидростатического привода

Имитационная математическая модель гидростатического привода была реализована в программном комплексе «MATLAB». На рис. 3 представлена реализация уравнений (2) с учетом уравнений (4), (5) и (6) в среде *Simulink*.



для линии высокого давления

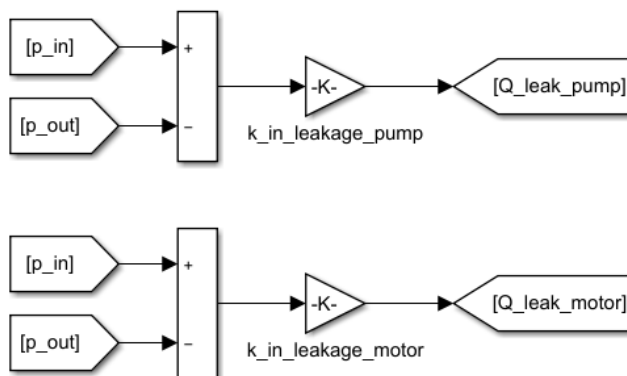


для линии подпитки

Рис. 3. Реализация уравнений расхода для линии высокого давления и линии подпитки

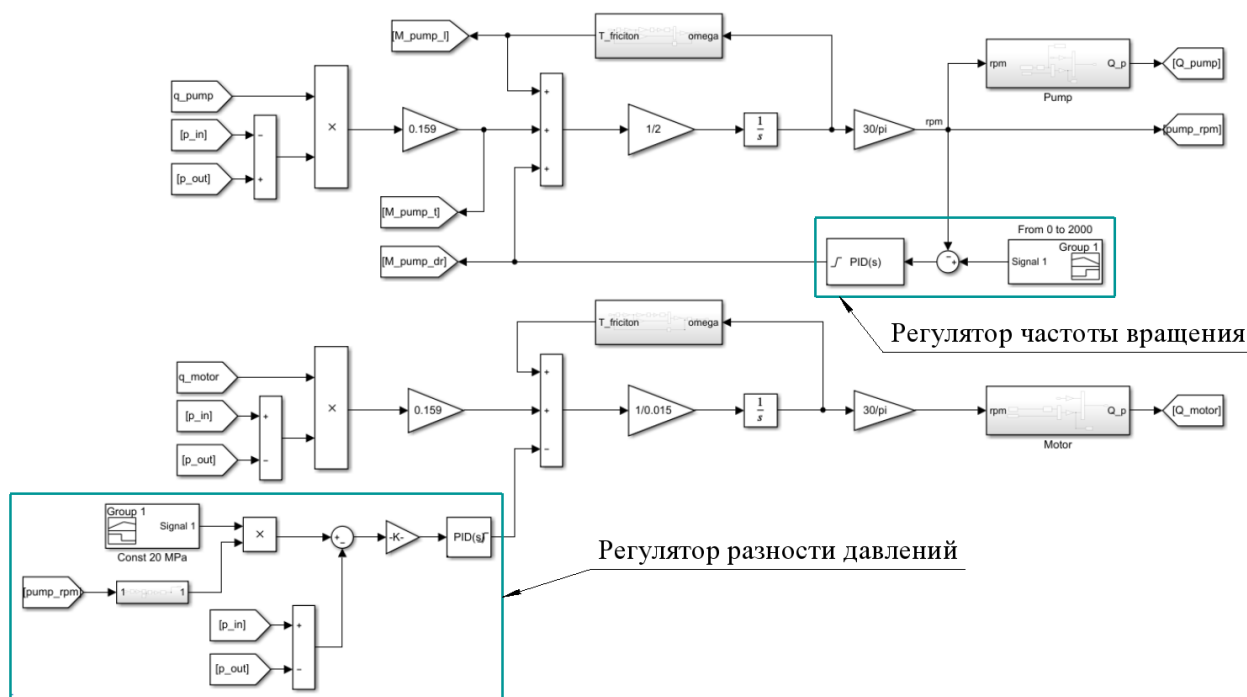
Fig. 3. Implementation of flow equations for high pressure line and makeup line

На рис. 4 представлена реализация уравнения (3) для гидронасоса и гидромотора в среде *Simulink*.



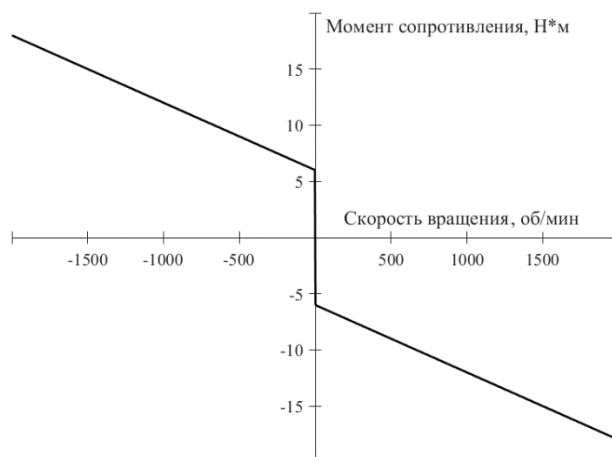
**Рис. 4. Реализация уравнений внутренних утечек**  
**Fig. 4. Implementation of internal leakage equations**

Для гидромашин реализуется уравнение динамики вращательного движения (рис. 5). С целью проведения вычислительных экспериментов закладывается возможность управления разностью давлений в гидролиниях за счет регулятора момента сопротивления вращению на валу гидромотора. Также закладывается регулятор частоты вращения вала гидронасоса.



**Рис. 5. Реализация уравнений динамики гидромашин**  
**Fig. 5. Implementation of equations of hydraulic machine dynamics**

На рис. 6 представлена реализация уравнения (8) в среде *Simulink*.



**Рис. 6. Зависимость момента механических потерь гидромашин от скорости вращения приводного вала**

**Fig. 6. Dependence of the moment of mechanical losses of a hydraulic machine on the speed of rotation of the drive shaft**

### 3. Вычислительные эксперименты

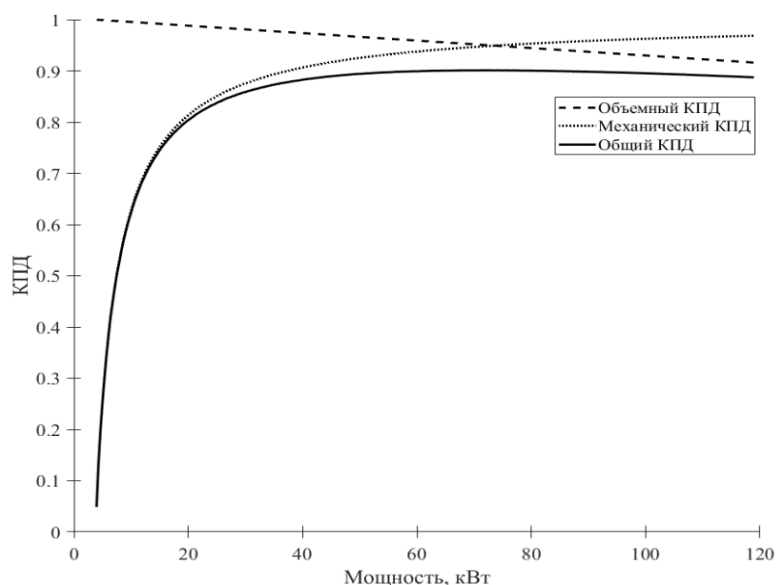
Вычислительные эксперименты проводятся с целью определения объемного, механического и общего КПД гидронасоса в составе привода из двух идентичных по рабочим параметрам гидромашин. Также проводятся вычислительные эксперименты с использованием разных решателей и временных шагов для сравнения результатов моделирования при идентичных начальных условиях. При проведении вычислительных экспериментов по определению КПД использовался решатель «ode3» с фиксированным временным шагом 0,0001 с, продолжительность каждого вычислительного эксперимента 60 с. Рабочие параметры гидропривода, используемые при проведении вычислительных экспериментов, представлены в табл. 1.

**Таблица 1.**  
**Характеристики гидропривода**  
**Table 1.**  
**Hydraulic drive characteristics**

Максимальное давление в гидролиниях, $p_{\max}$ , МПа	40
Минимальное давление в гидролиниях, $p_{\min}$ , МПа	2,5
Рабочий объем гидромашин, см <sup>3</sup>	100
Объем гидролинии высокого давления, $V_{ж1}$ , л	8
Объем гидролинии подпитки, $V_{ж2}$ , л	8
Приведенный объемный модуль упругости гидравлической жидкости, $E_{ж}$ , МПа	1000
Номинальная частота вращения гидронасоса, об/мин	2000

### Коэффициенты полезного действия гидронасоса в зависимости от приводной мощности

В первом эксперименте определяется зависимость объемного, механического и полного КПД гидронасоса от мощности на приводном валу. Определение указанной зависимости происходит при постоянной номинальной скорости вращения гидронасоса и переменном перепаде давлений в гидролиниях, меняющемся от минимального до максимального (табл. 1). Полученная в результате вычислительного эксперимента зависимость представлена на рис. 7.

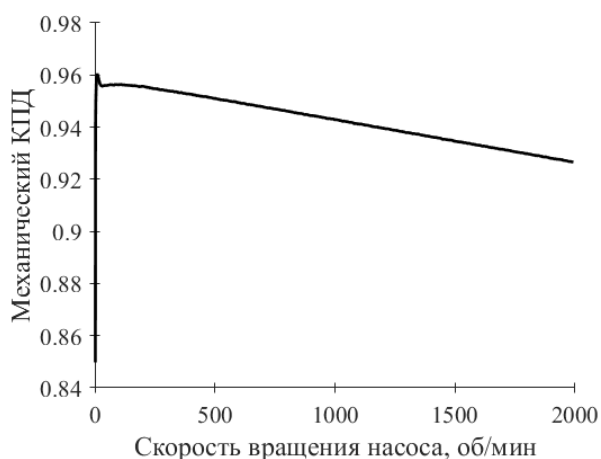


**Рис. 7. Зависимость КПД гидронасоса от приводной мощности**

**Fig. 7. Dependence of the efficiency of a hydraulic pump on the drive power**

**Механический коэффициент полезного действия в зависимости от скорости вращения приводного вала**

Во втором вычислительном эксперименте определяется зависимость механических потерь в гидронасосе от частоты вращения приводного вала. Перепад давлений при этом поддерживается постоянным, равным 20 МПа. Полученная в результате вычислительного эксперимента зависимость представлена на рис. 8.



**Рис. 8. Зависимость механического КПД гидронасоса от скорости вращения приводного вала**

**Fig. 8. Dependence of the mechanical efficiency of a hydraulic pump on the rotation speed of the drive shaft**

**Сравнение различных решателей и временных шагов**

В проводимом эксперименте моделируется работа гидропривода при нагружении вала гидромотора крутящим моментом согласно зависимости от времени (рис. 9).

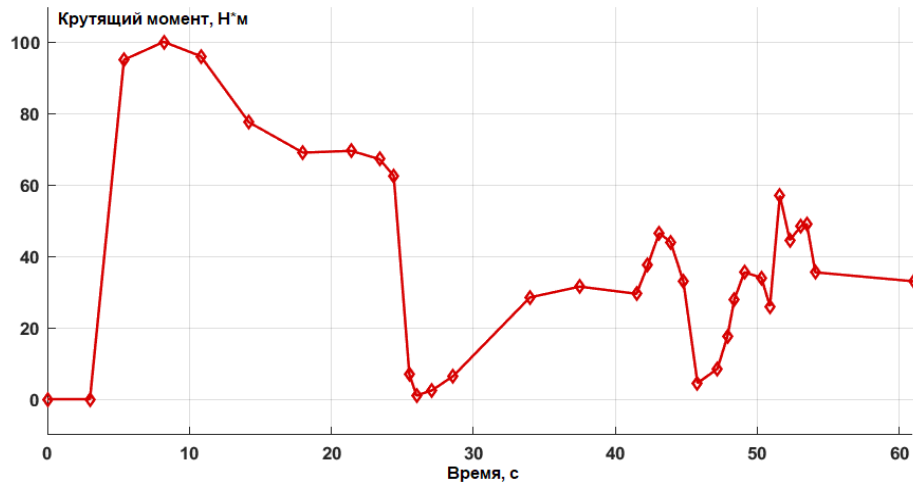


Рис. 9. Зависимость крутящего момента на валу гидромотора от времени

Fig. 9. Dependence of torque on the hydraulic motor shaft on time

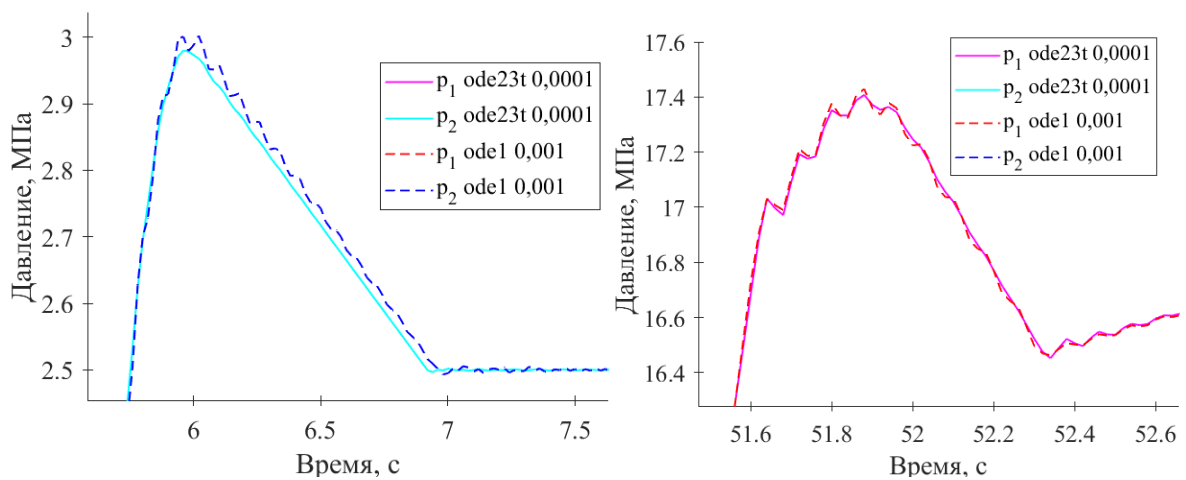
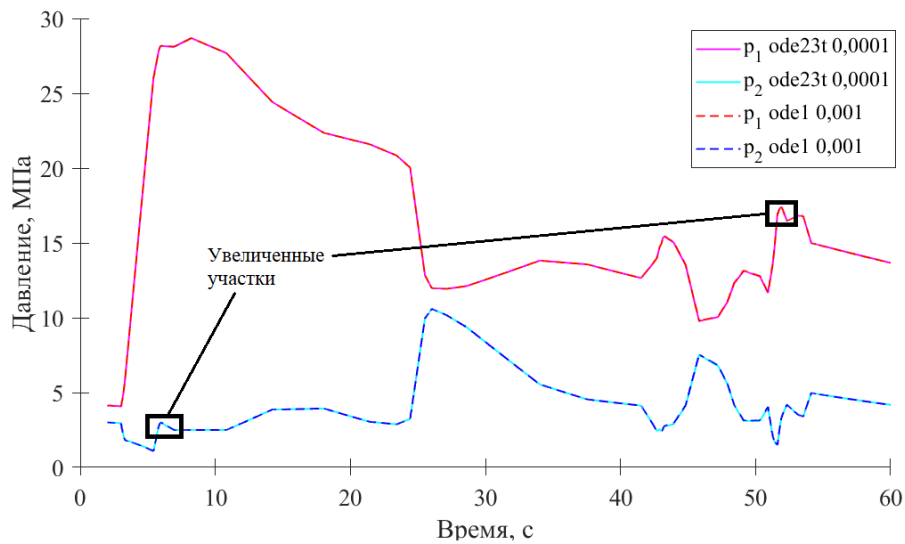


Рис. 10. Зависимость давлений в гидролиниях от времени

Fig. 10. Dependence of pressures in hydraulic lines on time



В проводимых вычислительных экспериментах оцениваются давления в гидролинии высокого давления и подпитки. Проводятся два вычислительных эксперимента. В первом эксперименте используется решатель с переменным временным шагом «ode23t» с настройкой максимального временного шага не более 0,0001 с. Во втором вычислительном эксперименте используется решение методом Эйлера (решатель «ode1») с фиксированным временным шагом 0,001 с. Было установлено, что на используемой имитационной модели при укрупнении шага и использовании метода Эйлера решение начинает расходиться. Результаты моделирования представлены на рис. 10.

На основе анализа результатов моделирования можно заключить, что использование наиболее простого метода решения и укрупнение временного шага не сказывается на точности решения при имитационном моделировании, что позволяет использовать предложенную модель в режиме реального времени с минимальными вычислительными ошибками.

### Заключение

Приведена математическая имитационная модель гидравлического привода, подходящая для реализации вычислительных экспериментов в режиме реального времени. Описан подход к учету КПД гидромашин и гидропривода в целом, обеспечивающий устойчивость работы имитационной модели в переходных режимах.

В результате проведения вычислительных экспериментов показано, что разработанная модель позволяет получить качественное совпадение характеристик имитационной модели и объекта моделирования [5]. Продемонстрирована относительная простота модели, позволяющая проводить расчеты в том случае, когда нет возможности получить точные параметры моделируемых гидромашин.

Важной особенностью полученной имитационной модели является то, что в ней не учитываются кавитационные эффекты и неполное заполнение рабочих полостей гидромашин, которое может возникать на высоких оборотах за пределами номинальных режимов работы.

### Библиографический список

1. **Николенко, И.В.** Математическое моделирование рабочего процесса в гидроприводе на основе регулируемых аксиально-поршневых гидромашин / И.В. Николенко, А.Н. Рыжаков // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 9. С. 17-31.
2. **Kozhukhova, A.V.** Process equipment pump-controlled hydraulic drive: improving energy efficiency. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. Vol. 643.
3. **Sun, H.** Robust Inverse Dynamics Control for a Hydrostatic Transmission with Actuator Uncertainties / H. Sun, H. Ashemann // 6-th IFAC Symposium on Mechatronic Systems. 2013. Pp. 116-124.
4. **Jelali, M.** Hydraulic Servo-systems: Modelling, Identification and Control / M. Jelali, A. Kroll. – London: Springer-Verlag, 2003. – 355 p.
5. **Башта, Т.М.** Машиностроительная гидравлика / Т.М. Башта. – М.: Машиностроение, 1971. – 672 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 30.01.2024*

*Дата принятия  
к публикации: 10.07.2024*



УДК 629.3

EDN: DOWEKD

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРИГИНАЛЬНЫХ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ СПОРТИВНОГО ГРУЗОВИКА, РАЗРАБОТАННОГО ДЛЯ УЧАСТИЯ В АВТОМОБИЛЬНЫХ СОРЕВНОВАНИЯХ ПО ПЕРЕСЕЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ

**А.Г. Капустин**

ORCID: 0009-0002-2055-2673 e-mail: kapustinalexandr2017@yandex.ru

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

**В.С. Макаров**

ORCID: 0000-0002-4423-5042 e-mail: makvl2010@gmail.com

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

**А.И. Марковнина**

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

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

**М.С. Гулин**

ORCID: 0000-0002-8437-0468 e-mail: gylin103@mail.ru

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

Рассмотрен специальный автомобиль С41А23 (САДКО), предназначенный для раллийных гонок. Особенностью нагрузочных режимов при движении в данных условиях являются высокие перегрузки как водителя, так и самой машины. В связи с этим для прочностных расчетов принимаются перегрузки до 7g, что обеспечивает работоспособность конструкции в данных условиях. Специальные доработки конструкции для рассмотренного образца относительно серийного составили порядка 30 %. Описан ряд технических решений, примененных в конструкции спортивного полноприводного грузового транспортного средства. Рассмотрены существующие варианты оригинальных топливных баков и специально разработанных под них кронштейнов; проанализированы два варианта разных по конструкции кронштейнов спортивного грузовика. Проведены расчеты и проанализированы максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в элементах конструкции. После выбора наилучшего варианта изготовлен опытный образец для установки на гоночный автомобиль.

**Ключевые слова:** грузовое транспортное средство, автоспорт, ралли, моделирование, кронштейн, топливный бак, регламент соревнований.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Капустин, А.Г. Моделирование оригинальных топливных баков спортивного грузовика, разработанного для участия в автомобильных соревнованиях по пересеченной местности / А.Г. Капустин, В.С. Макаров, А.И. Марковнина, М.С. Гулин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 72-81. EDN: DOWEKD

## SIMULATION OF NOVEL FUEL TANKS FOR SPORTS TRUCK DESIGNED FOR PARTICIPATION IN CROSS-TERRAIN AUTOMOBILE COMPETITIONS

**A.G. Kapustin**

ORCID: 0009-0002-2055-2673 e-mail: [kapustinalexandr2017@yandex.ru](mailto:kapustinalexandr2017@yandex.ru)

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**V.S. Makarov**

ORCID: 0000-0002-4423-5042 e-mail: [makvl2010@gmail.com](mailto:makvl2010@gmail.com)

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.I. Markovkina**

ORCID: 0009-0000-7971-0424 e-mail: [alinomalino@yandex.ru](mailto:alinomalino@yandex.ru)

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**M.S. Gulin**

ORCID: 0000-0002-8437-0468 e-mail: [gylin103@mail.ru](mailto:gylin103@mail.ru)

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The paper discusses a special car C41A23 (SADKO), intended for rally racing. A feature of the load conditions when driving under these conditions is the high overload of both the driver and the machine itself. Thus, for strength calculations, overloads up to 7g are accepted. This ensures the operability of the structure under these conditions. Special modifications in the design of the considered car relative to the serial one are about 30%. Technical solutions used in the design of a sports all-wheel drive cargo vehicle are described. Various options for novel fuel tanks and brackets specially designed for them are considered. Two different designs of brackets for the fuel tank of sports truck were analyzed. Calculations were carried out and the maximum equivalent von Mises stresses in structural elements were analyzed. The best option was selected and a prototype was made for installation on a racing car.

**Key words:** cargo vehicle, motorsport, rally, simulation, bracket, fuel tank, competition regulations.

**FOR CITATION:** A.G. Kapustin, V.S. Makarov, A.I. Markovkina, M.S. Gulin. Simulation of novel fuel tanks for sports truck designed for participation in cross-terrain automobile competitions. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 72-81. EDN: DOWEKD

Ралли – вид гонок, где автоспортсмены перемещаются на специально подготовленной технике из точки А в точку Б по незамкнутой трассе. При этом часть ее может быть пройдена не один раз, в отличие от кольцевых автогонок [1]. Трассы для ралли чаще всего не строятся специально, а являются дорогами общего пользования, частично перекрываемыми только на время проведения соревнования, или соревнования проводятся на пересеченной местности. Тип покрытия, соответственно, различный: грунт, асфальт, снег, гравий, песок. В таких гонках отсутствует строгое ограждение трассы, нет ее идеальной траектории, часто встречаются трамплины и сложные связки поворотов, которые каждый из экипажей проходит по-своему. Для ориентации на очень высокой скорости пилоты пользуются помощью штурманов, которые по специальным заранее подготовленным картам следят за дорогой и сообщают о предстоящих поворотах и препятствиях.

Трасса ралли состоит из скоростных участков, соединенных перегонами по дорогам общего пользования. Экипажи стартуют на скоростных участках с интервалом, как правило, в 1 или 2 мин и должны проехать трассу каждого спецучастка как можно быстрее [2]. На пе-

регионах скорость экипажей ограничена правилами дорожного движения и нормами времени, заданными организаторами соревнования. Победителем является экипаж, суммарно прошедший за минимальное время все скоростные участки. Ралли-рейд – подвид раллийных соревнований, вид моторных гонок на длинные дистанции по пересеченной местности, проходящий в течении нескольких дней. Участники гонки обычно преодолевают за день 300-600 км. Временная протяженность соревнований обычно составляет от 3 до 30 дней [3]. В ралли-рейдах в экипажах грузового класса, кроме пилота и штурмана, допускается к участию механик.

Ралли «Шелковый путь» – уникальный трансконтинентальный проект мирового значения, который на протяжении многих лет охватывает регионы не только Российской Федерации, но и азиатских стран, по которым когда-то шли караваны Великого торгового Шелкового пути. Гонка проходит по территории России, Китая, Казахстана, Монголии, Туркмении, сводя воедино дипломатические, социальные, экономические и спортивные интересы сразу нескольких государств в области автоспорта.

Соревнования, в которых принимают участие автоспортивные команды первой величины, проходят во всех существующих официальных зачетах: грузовики, автомобили, мотоциклы и квадроциклы. Перегрузки во время этапов мероприятия доходят до 7 g, а, например, космонавты при полетах в космос испытывают перегрузку в 9 g. Характеристики представителя класса грузовых спортивных транспортных средств, принимающих участие в ралли-рейдах, отражены в табл. 1.

**Таблица 1.**  
**Технические характеристики спортивного грузовика**

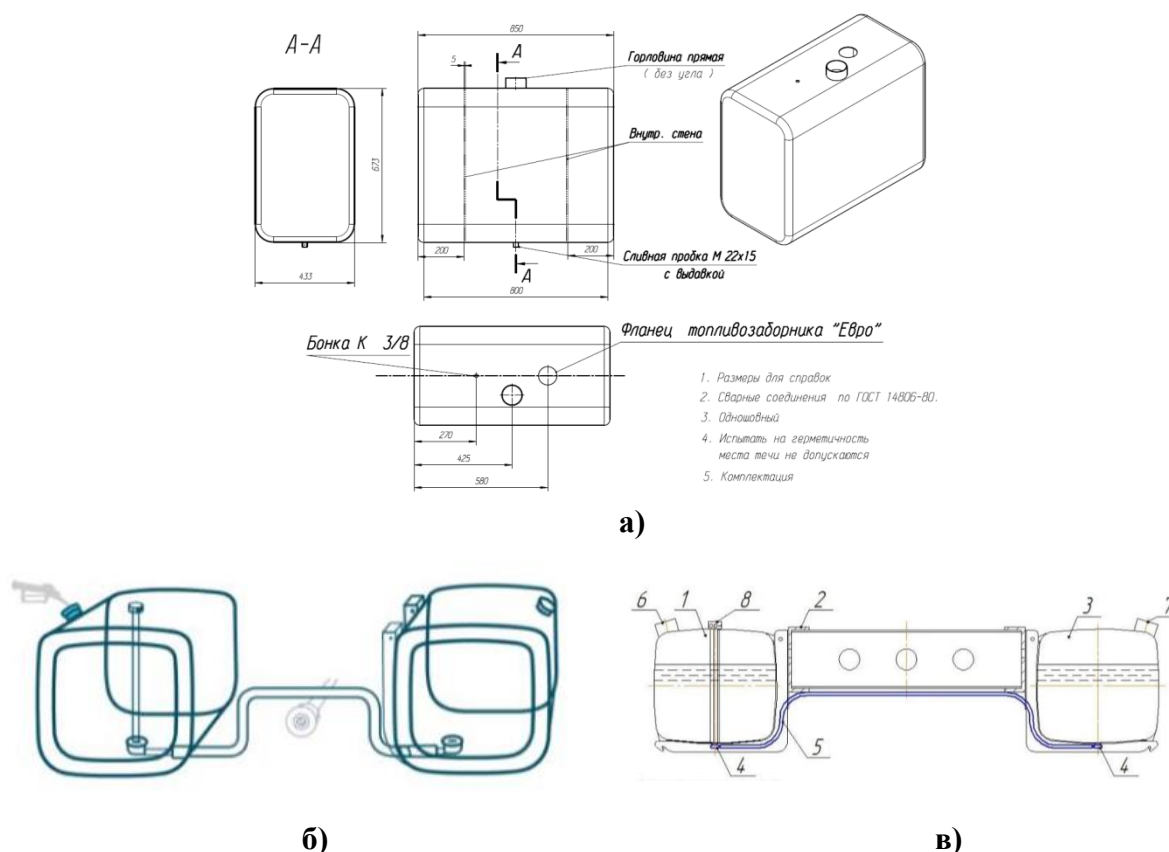
**Table 1.**  
**Technical specifications of a sports truck**

Внешний вид	
Команда	ГАЗ РЕЙД-СПОРТ
Модель	С41А23 (САДКО)
Число мест в кабине	2
Двигатель, объем(л)	ЯМЗ-534, 4.4
Мощность (л.с.)	310
Крутящий момент (Н*м)	1050
Расход топлива на 100 км (л.) в спортивном режиме езды	< 50
Масса (кг)	5880

Спортивная техника создана заводской командой *Газ Рейд-спорт*. Этот спортивный коллектив является многократным победителем и призером чемпионатов страны и чемпионатов мирового уровня по ралли-рейдам. Автоспортсмены, базирующиеся в Нижнем Новгороде – единственная команда в грузовом классе по ралли-рейдам, которая выступает на 70 % серийном грузовом автомобиле, а 30 % – специальные доработки, которые прописаны в

регламенте соревнований. Решение эксплуатировать почти серийный автомобиль основано на корпоративной концепции Горьковского Автозавода: выступать на соревнованиях исключительно на заводских агрегатах. Такие соревнования для бренда ГАЗ – не только борьба за пьедестал, но и дополнительные испытания техники в сверхтяжелых условиях гонки. Доработки, проверенные в экстремальных условиях, в дальнейшем могут применяться на серийной продукции. Техника ГАЗ, с точки зрения надежности, достойно себя зарекомендовала, благодаря ей экипажи команды показывают отличные результаты. Команда ГАЗ Рейд-спорт является многократным чемпионом страны по ралли-рейдам, в том числе, «Шелкового пути». Чтобы сохранить ведущие позиции в спортивном мире, инженеры команды постоянно дорабатывают конструкцию раллийных автомобилей.

В данной статье рассматривается установка новых оригинальных топливных баков и различные варианты, специально разработанных под них кронштейнов. Стимулом разработки нового топливного бака с оригинальной конструкцией кронштейнов стал регламент соревнований по ралли-рейдам, в классе грузовиков. Так, в пункте 1.8 регламента прописаны требования безопасности, предъявляемые к топливным бакам: максимальное число на транспортном средстве должно быть не более четырех. Рекомендуется применение безопасных топливных баков, соответствующих стандарту FT3-1999, FT3.5-1999 или FT5-1999. Эластичная оболочка каждого безопасного топливного бака должна находиться в герметичном корпусе, установленным на раму транспортного средства. Минимальные технические характеристики топливного бака следующие: алюминиевый сплав с минимальной толщиной 3 мм; сталь с минимальной толщиной 1,5 мм; разрешается применение алюминиевых или стальных топливных баков заводского производства (сертифицированные изготовителем бака в соответствии с правилами № 34 и 36 ЕЭК ООН). Максимальная вместимость каждого резервуара составляет не более 500 л. Допускается применению одного топливного бака с вместимостью не более 1000 л. Единственной разрешенной модификацией стандартного топливного бака является переделка заливной горловины с целью установки безопасной крышки спортивного типа. Изменения в конструкции бака связаны с установкой сапуна с гравитационным клапаном и для подключения топливо-проводов. Количество выходов топлива ограничено двумя на топливный бак. Вне топливных баков максимальный объем топлива может составлять 6 л. Баки должны быть прочно прикреплены к раме с помощью жесткой конструкции или кронштейнов, и удерживаться стальными лентами. Сечение лент составляет 120 мм<sup>2</sup>. Ленты для крепления топливных баков заводского исполнения имеют следующие размеры: ширина 50 мм, толщина 1,5 мм. Также, согласно требованиям, необходимо применять не менее 2 лент на каждый резервуар. Если на машине установлен один бак, то он крепится не менее чем четырьмя стальными лентами с сечением 120 мм<sup>2</sup>. Если баки расположены под лонжеронами рамы или снаружи, то они должны иметь защиту днища от камней, изготовленную из листового алюминиевого сплава с минимальной толщиной 5 мм или композитных панелей с минимальной толщиной 10 мм. Расположение топливных баков – свободное при соблюдении следующих требований: все резервуары должны быть расположены в продольном направлении в пределах колесной базы, в поперечном – между плоскостями, проходящими через центры комплектных колес; при виде сбоку – выше линии, соединяющей центры колес передней и задней осей ниже плоскости, проходящей через самую высшую точку дуги каркаса безопасности, и задний конец рамы шасси. На рис. 1 показан оригинальный топливный бак под грузовое раллийное транспортное средство.



**Рис. 1. Оригинальный топливный бак под грузовое раллийное транспортное средство:**

*а – эскиз топливного бака; б – принцип работы заправки топливных баков;*

*в – принцип подключения дополнительного топливного бака*

**Fig. 1. Novel fuel tank for a rally cargo vehicle:**

*a – sketch of the fuel tank; b – operating principle of filling fuel tanks;*

*c – principle of connecting an additional fuel tank*


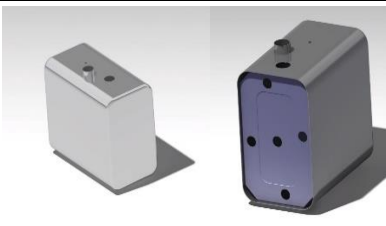


На рис. 1.а показан эскиз оригинального топливного бака, в котором приведены габаритные размеры топливного резервуара, сварные соединения по ГОСТ 14806-80. На рис. 1.б приведена схема принципа работы заправки топливных баков. Каждый резервуар заправляется отдельно. Чтобы полностью заполнить баки, вначале заправляется основной бак (во время заправки топливо также частично переливается в дополнительный). Затем заправляется дополнительный бак. Топливо расходуется из обоих баков примерно одинаково, они работают как сообщающиеся сосуды [4].

На рис. 1.в показана схема подключения дополнительного топливного бака по принципу сообщающихся сосудов, при этом: 1 – основной топливный бак; 2 – рама транспортного средства; 3 – дополнительный топливный бак; 4 – банжо – болт в сборе; 5 – втулка маслостойкая 12/20-16 ГОСТ 10362-76; 6 – крышка основного резервуара (без клапана, доступ воздуха в резервуар через нее отсутствует); 7 – крышка дополнительного бака (с клапаном, доступ воздуха в резервуар осуществляется через нее); 8 – топливоприемник основного резервуара.

В табл. 2 показаны сравнительные характеристики топливных баков, установленных на ранних спортивных грузовиках и топливных баков, установленных на проектируемом раллийном грузовике.

**Таблица 2.**  
**Сравнительные характеристики топливных баков, установленных на ранних спортивных грузовиках и топливных баков, установленных на новом раллийном грузовике**

**Table 2.**  
**Comparative characteristics of fuel tanks installed on early sports trucks and fuel tanks installed on a new rally truck**

Изображение топливных баков	 <p>Большой топливный бак, установленный на ранних спортивных грузовиках</p>	 <p>Разрабатываемый топливный бак (в сечении показана перегородка резервуара)</p>
Расположение топливного бака на спортивном грузовике	 <p>Топливный бак установлен на раму, в задней части раллийного грузовика над задним мостом</p>	 <p>Топливный бак установлен в колесной базе за кабиной раллийного грузовика</p>
Количество топливных баков, установленных на грузовик (шт.)	1	2
Объем одного топливного бака (л.)	430	220
Габаритные размеры (мм)	1272/663/570	850/433/673
Количество перегородок в топливном баке (шт.)	4	2
Материал	Алюминий	
Толщина метала (мм)	2,5	3
Масса пустого топливного бака (кг)	40	18
Страна производитель	Россия	

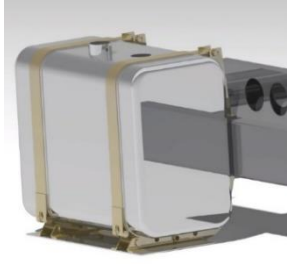
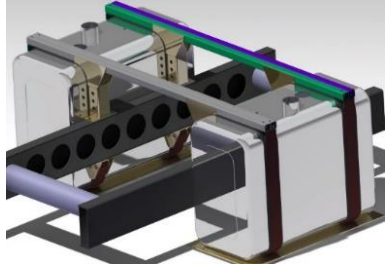
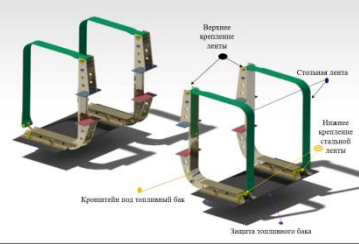
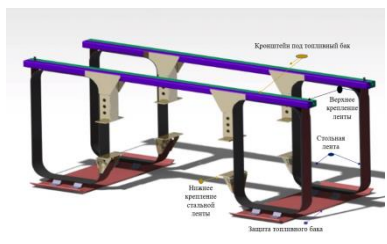
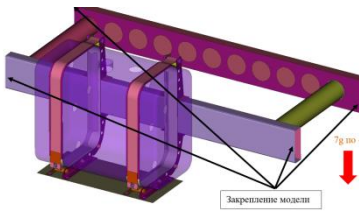
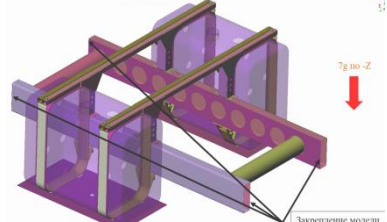
Новый топливный резервуар оснащен заливной горловиной с самозапираемым непроницаемым клапаном и полуоборотной крышкой. В нижней части бака имеется сливное отверстие с болтом на медной шайбе [5]. Баки прошли сертификационные испытания. Продукция имеет паспорт и декларацию таможенного союза.

Для спроектированного топливного резервуара было разработано несколько вариантов кронштейнов, отличающихся по конструкции. Для обоснования выбора наиболее прочного варианта кронштейнов были сделаны виртуальные расчеты. В табл. 3 приведены варианты кронштейнов под топливный бак.



Таблица 3.  
Варианты кронштейнов под топливный бак

Table 3.  
Fuel tank bracket options

Особенности вариантов кронштейнов под топливный резервуар	1 вариант: кронштейн нижнего расположения	2 вариант: кронштейн верхнего расположения
Изображение вариантов кронштейнов, расположенных на лонжеронах рамы транспортного средства, с установленными на них топливными баками		
Изображение вариантов кронштейнов		
Схема напряженно-деформированного состояния кронштейнов топливного бака под действием нагрузок		

Чтобы выявить наиболее подходящий для раллийного грузовика вариант, необходимо провести расчет напряженно-деформированного состояния двух вариантов кронштейнов топливного бака под действием вертикальной нагрузки с ускорением  $7g$  (по системе координат  $Z$ ) при расчетной массе топливного бака  $250$  кг. Для сравнения: максимальная прикладываемая вертикальная нагрузка на кронштейны топливных баков серийных автомобилей равна  $3g$ . Но в ралли-рейдах спортивная техника испытывается в экстремальных условиях, поэтому нагрузка на узлы автотранспорта значительно выше, и для расчетов прикладываемая нагрузка на узел берется  $7g$  вместо  $3g$ .

Расчетная модель включает в себя часть рамы, топливный резервуар с внутренними перегородками, кронштейны топливного бака с резиновыми прокладками между стальными лентами и топливным баком [6]. В модели учтены механизмы затяжки стальной ленты топливного бака [7]. Коэффициент трения в парах с резиновой прокладкой –  $0,6$ , в остальных парах (сталь-сталь)  $0,15$ . Расчет производился с учетом геометрической нелинейности и контактных взаимодействий и проходил в два этапа [8, 9]. На первом производилась затяжка стальной ленты топливного бака и прикладывалась гравитация  $1g$  к модели. На втором этапе гравитационная нагрузка постепенно увеличивалась до значения  $7g$ . Модель жестко закреплялась за края лонжеронов рамы.

При расчетах использовались следующие свойства стали: модуль упругости  $E=2,1 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu=0,3$ , плотность  $\rho=7,85 \cdot 10^{-6}$  кг/мм<sup>3</sup>. Нелинейные свойства используемого материала кронштейна: сталь 20 ГОСТ 1050-13  $\sigma_T=245$  МПа,  $\sigma_B=390$  МПа,  $\delta=25$  %; сталь 08пс ГОСТ 9045-93  $\sigma_T=205$  МПа,  $\sigma_B=280$  МПа,  $\delta=30$  %.

В табл. 4 показаны распределения максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу и пластические деформации для первого варианта.

**Таблица 4.**  
**Распределения максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу**  
**и пластические деформации для первого варианта кронштейна топливного бака**

**Table 4.**  
**Distributions of maximum equivalent von Mises stresses and plastic deformations**  
**for the first option of the fuel tank bracket**

№	Изображение	Описание
1		<p>Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в элементах кронштейна после затяжки хомутов под действием гравитации 1g по -Z, МПа</p>
2		<p>Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в элементах кронштейна под действием нагрузки 7g по -Z, МПа.</p>
3		<p>Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в перегородках топливного бака после затяжки хомутов под действием гравитации 1g по -Z, МПа</p>
4		<p>Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в перегородках топливного бака под действием нагрузки 7g по -Z, МПа</p>
5		<p>Пластические деформации в элементах кронштейнов топливных баков после затяжки хомутов и действующей нагрузке 1g по -Z, %</p>
6		<p>Пластические деформации в элементах кронштейнов топливных баков под действием нагрузки 7g по -Z, %</p>
7		<p>Пластические деформации в перегородках топливного бака после затяжки хомутов и действующей нагрузке 1g по -Z, %</p>
8		<p>Пластические деформации в перегородках топливного бака под действием нагрузки 7g по -Z, %.</p>



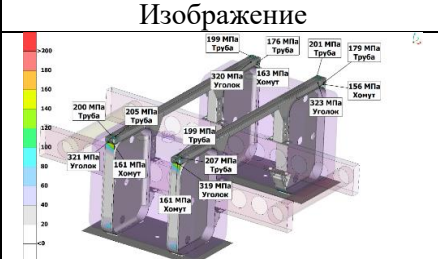
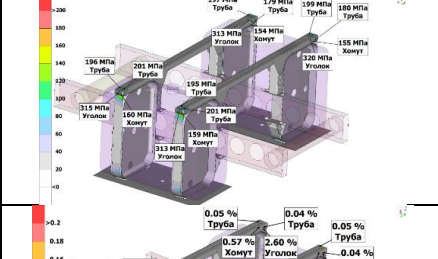
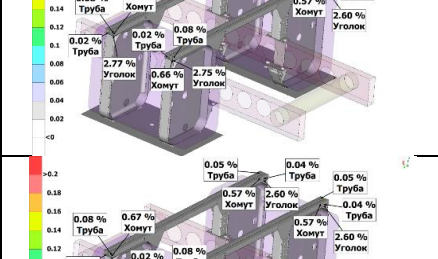

При затяжке стальной ленты кронштейна топливного бака, в первом варианте под действием гравитационной нагрузки  $1g$  максимальные эквивалентные напряжения возникают в верхних пластинах крепления кронштейна к раме в зоне болтовых соединений  $202 \text{ МПа}$  и  $190 \text{ МПа}$ , так же в перегородках внутри топливного бака  $214 \text{ МПа}$  и  $212 \text{ МПа}$ . Пластические деформации при этом достигают  $0,61 \%$  и  $0,49 \%$ . Значения максимальных эквивалентных напряжений и пластических деформаций в распорках топливного бака могут меняться в зависимости от расположения сварки. В данном расчете информации по сварке бака были не предоставлены. При вертикальной нагрузке  $7g$  по  $-Z$  наибольшие эквивалентные напряжения возникают в боковинах кронштейна в зонах между рамой и топливным баком, в верхних и нижних пластинах крепления кронштейна к раме. Пластические деформации достигают  $1,51 \%$  и  $1,38 \%$  в верхних пластинах крепления кронштейна к раме. При этом максимальные эквивалентные напряжения в перегородках топливного бака уменьшились, что говорит о том, что обжим происходит сильнее при затяжке стальной ленты. В табл. 5 показаны распределения максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу и пластические деформации для второго варианта.

Таблица 5.

Распределения максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу и пластические деформации для второго варианта кронштейна топливного бака

Table 5.

Distributions of maximum equivalent von Mises stresses and plastic deformations for the second option of the fuel tank bracket

№	Изображение	Описание
1		Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в элементах кронштейна после затяжки хомутов под действием гравитации $1g$ по $-Z$ , МПа
2		Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в элементах кронштейна под действием нагрузки $7g$ по $-Z$ , МПа
3		Пластические деформации в зоне затяжки стальной ленты к кронштейнам топливного бака, при действующей гравитационной нагрузке $1g$ по $-Z$ , %
4		Пластические деформации в зоне затяжки стальной ленты к кронштейнам топливного бака, при действующей гравитационной нагрузке $7g$ по $-Z$ , %

При затяжке стальной ленты кронштейна топливного бака во втором варианте под действием гравитационной нагрузки  $1g$  максимальные эквивалентные напряжения возникают в уголках (в зоне поджатия стальной ленты, через уголки к трубам кронштейна)  $321$  и  $319$

Мпа, с одной стороны, 323 и 320 МПа – с другой. Максимальные пластические деформации так же в этих зонах 2,77 % и 2,75 %, с одной стороны, 2,6 % и 2,6 % – с другой. При вертикальной нагрузке 7g по -Z наибольшие эквивалентные напряжения возникают в тех же местах и зонах, которые обусловлены затяжкой болтов. Максимальные пластические деформации при этом практически не увеличиваются, из чего можно сделать вывод, что основная деформация возникает еще в момент затяжки болтового соединения. Напряжений в перегородках топливного бака, таких, как в первом варианте, не наблюдается.

### Выводы

Для нового спортивного грузовика, принимающего участие в ралли-рейдовом виде автогонок, был разработан новый топливный бак, соответствующий обновленным правилам спортивного регламента для техники грузового класса раллийных соревнований и оригинальными кронштейнами под топливный резервуар. Приведен пример использования моделирования напряженно-деформированного состояния с целью определения причин и условий разрушения кронштейнов двух вариантов топливного резервуара для спортивного грузового автомобиля под действием максимальной вертикальной нагрузки 7g при расчетной массе топливного бака 250 кг.

По результатам виртуальных расчетов двух разных конструкций кронштейнов наглядно показаны места с самой значительной концентрацией напряжений при максимальной нагрузке в 7g. В конструкции первого варианта концентрация напряжений выше, чем во втором. Следовательно, конструкция второго варианта кронштейна топливного бака является более прочной и долговечной. Соответственно, именно кронштейн топливного резервуара с верхним расположением должен быть установлен на спортивную технику.

### Библиографический список

1. **Ильин, А.Б.** Концепция развития автомобильного спорта в России // Мир новой экономики. 2019. № 1. С. 48-51.
2. **Ильин, А.Б.** Об оценке вклада предпринимательских структур автоспорта в формирование привлекательного имиджа территории // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2016. Т. 7. № 4. С. 180-184.
3. **Кулинченко, М.И.** История использования маркетинговых коммуникаций в сфере автоспорта // Juvinis scientia. 2018. № 10. С. 24-27.
4. **Костин И.М.** Обеспечение конкурентоспособности грузовых автомобилей на этапе разработки / И.М. Костин, Х.А. Фасхиев. – Набережные Челны: КамПИ, 2001. – 349 с.
5. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4 (101). С.72-77.
6. **Орлов, Л.Н.** Оценка несущей способности каркаса кузова автобуса по результатам компьютерного моделирования / Л.Н. Орлов, П.С. Рогов, А.С. Вашурин, А.В. Тумасов, Н.Ф. Феоктистов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 3 (96). С. 150-157.
7. **Каменев, С.В.** Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях / С.В. Каменев. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 110 с.
8. ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения».
9. ГОСТ Р 51709-2001 «Автотранспортные средства. Требования к безопасности к техническому состоянию и методы проверки».

*Дата поступления  
в редакцию: 22.02.2024*

*Дата принятия  
к публикации: 28.05.2024*

УДК 630.377

EDN: EGJNSD

## ВЫБОР КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ТИПАЖА И ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ ПОГРУЗОЧНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРЕЛЕВОЧНОГО ПРОЦЕССА

**Е.Е. Клубничкин**

ORCID: 0000-0002-4086-1011 e-mail: klubnichkin@mgul.ac.ru

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

ORCID: 0000-0002-1231-8185 e-mail: vklubnichkin@gmail.com

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

Рассмотрены критерии оценки эффективности процесса трелевки при лесозаготовках. Цель состоит в выборе оптимального типа и грузоподъемности машин для обеспечения эффективного трелевочного процесса с минимальными экономическими затратами. Обоснована недостаточность показателя прибыли для оценки эффективности трелевки, предложено наряду с ним рассматривать конкретное время, затраченное на выполнение процесса трелевки, включая анализ времени, затраченного на перемещение, погрузку и разгрузку. Соотношение этих составляющих требуемого времени оказывает существенное влияние на производительность погрузочно-транспортных машин и стоимость трелевки. Обоснование критериев оценки исходит из аналитических зависимостей, полученных в результате сравнения различных вариантов трелевки с использованием различных типов и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин в идентичных условиях эксплуатации. Приведены формулы и выражения для расчета сокращения дистанции трелевки и затрат на сокращение времени в пути при замене погрузочно-транспортных машин различной грузоподъемности. Предлагается оценивать эффективность процесса трелевки на основе таких критериев, как пройденное расстояние, время в пути, время простоя при погрузке и разгрузке и общее время, необходимое для завершения процесса трелевки, что обеспечит всестороннюю оценку экономической эффективности процесса трелевки.

**Ключевые слова:** погрузочно-транспортная машина, скорость, время простоя, расстояние трелевки, использование грузоподъемности, почасовая производительность.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Клубничкин, Е.Е. Выбор критерия оценки влияния типажа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин на эффективность трелевочного процесса / Е.Е. Клубничкин, В.Е. Клубничкин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 82-96. EDN: EGJNSD

## SELECTION OF CRITERION FOR ASSESSING IMPACT OF TYPE AND LOAD CAPACITY OF LOADING AND TRANSPORT VEHICLES ON EFFICIENCY OF SKIDDING

**E.E. Klubnichkin**

ORCID: 0000-0002-4086-1011 e-mail: klubnichkin@mgul.ac.ru

Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russia**V.E. Klubnichkin**

ORCID: 0000-0002-1231-8185 e-mail: vklubnichkin@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russia

**Abstract.** The paper describes criteria for assessing the efficiency of the skidding process during logging are considered. The objective is to select the optimal type and load capacity of machines to ensure an efficient skidding process with minimal economic costs. The insufficiency of the profit indicator for assessing the efficiency of skidding is substantiated. It is proposed to use as an indicator the specific time spent on the skidding process, including an analysis of the time spent on transportation, loading and unloading. The ratio of these components of the required time has a significant impact on the productivity of loading and transport machines and the cost of skidding. The justification of the criteria for assessment is based on analytical dependencies obtained as a result of comparing different skidding options using different types and load capacities of loading and transport machines under identical operating conditions. Equations and expressions are given for calculating the reduction in skidding distance and the costs of reducing travel time when replacing loading and transport machines of different load capacities. It is proposed to evaluate the efficiency of the skidding process based on the following criteria: distance traveled, travel time, downtime during loading and unloading, and the total time required to complete the skidding process, which will provide a comprehensive assessment of the economic efficiency of the skidding process.

**Key words:** loading and transport machine, speed, downtime, skidding distance, load capacity utilization, hourly productivity.

**FOR CITATION:** Klubnichkin E.E., Klubnichkin V.E. Selection of criterion for assessing impact of type and load capacity of loading and transport vehicles on efficiency of skidding. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 82-96. EDN: EGJNSD

## Введение

Оценка производительности лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин (ПТМ) предполагает учет показателей, выходящих за рамки чистой прибыли. Прибыль, несомненно, сохраняет решающее значение, но концентрация внимания исключительно на данном показателе может привести к игнорированию других важных факторов, влияющих на эффективность процесса трелевки. Мы рассмотрим важность использования для оценки производительности погрузочно-транспортных машин таких показателей, как объем трелевки в тоннах и уровень фактических затрат по сравнению с планом. Показана будет также важность учета времени, затраченного на трелевку, пройденного расстояния и других факторов при оценке выбора и использования ПТМ.

### Объем трелевки и фактические затраты

Оценка объема трелевки в тоннах дает ценную информацию об эффективности ПТМ. Сравнивая запланированный объем с фактическим объемом трелевки, можно выявить любые расхождения и оперативно устранить потенциальные проблемы. Более того, мониторинг уровня фактических затрат по сравнению с планом помогает понять финансовые последствия процесса трелевки. Это позволяет провести всестороннюю оценку экономической эффективности погрузочно-транспортных машин, гарантируя, что эксплуатация остается устойчивой и рентабельной.

### Фактор времени

Время играет решающую роль в определении эффективности процесса трелевки. Различные факторы, такие как время в пути и погрузочно-разгрузочные операции, влияют на общее время, затрачиваемое на трелевку. Принимая во внимание конкретное время, затраченное на трелевку, как в физическом, так и в денежном выражении, в качестве критерия оценки можно точно оценить эффективность ПТМ. Такой подход гарантирует, что при выборе и использовании погрузочно-транспортных машин приоритет отдается оптимизации времени, что приводит к повышению производительности и снижению эксплуатационных расходов.

## Пройденное расстояние

В определенных сценариях, когда технические характеристики ПТМ различаются, оценка процесса трелевки на основе пройденного расстояния может быть полезным критерием. Понимание расстояния, пройденного различными ПТМ, работающими в одинаковых условиях, дает ценную информацию об их производительности. Учитывая этот критерий, заинтересованные стороны могут принимать обоснованные решения относительно выбора и использования погрузочно-транспортных машин, повышая общую эффективность и сокращая ненужные расходы [1-7]. Чтобы обосновать критерии оценки процесса трелевки, необходимо проанализировать различные варианты сортировки трелевочных материалов с использованием разных типов и грузоподъемности погрузочных и транспортных средств. Этот анализ подчеркивает важность учета таких факторов, как пройденное расстояние, время в пути, время простоя при погрузке/разгрузке и общее время, необходимое для завершения процесса трелевки. Тщательно оценив эти факторы, заинтересованные стороны могут принимать обоснованные решения относительно наиболее эффективного выбора ПТМ для процесса трелевки.

Прибыль, оставаясь решающим фактором при оценке выбора погрузочно-транспортных средств для процесса трелевки, тем не менее, не должна быть единственным критерием. Принимая во внимание такие показатели, как объем трелевки в тоннах, уровень фактических затрат по сравнению с планом, время, затраченное на трелевку, и пройденное расстояние, заинтересованные стороны могут принимать обоснованные решения для максимизации эффективности и снижения эксплуатационных расходов. Комплексная оценка характеристик погрузочно-транспортных машин обеспечивает эффективный выбор и использование погрузочно-транспортных машин, что приводит к устойчивым и оптимизированным процессам трелевки в лесозаготовительной промышленности.

Критерии должны давать сравнительную оценку каждого из вариантов выбора типа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин для конкретно заданных условий трелевки сортиментов. В условиях наличия большого количества объектов трелевки сортиментов и разнотипности погрузочно-транспортных машин возможны различные варианты выбора использования и расстановки имеющегося парка ПТМ, а поэтому эффективность трелевочного процесса, в том или ином случае, будет также различной. Поэтому задачу поиска оптимального варианта типажа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин сведем к выбору и оптимальной расстановке имеющейся в наличии ПТМ по объектам трелевки, которая обеспечивала бы выполнение заданного объема трелевки сортиментов с минимальными хозяйственными издержками. С этой целью проанализируем возможные критерии указанной оценки производительности ПТМ.

### Анализ возможных критериев оценки эффективности трелевочного процесса

Наиболее приемлемым показателем оценки деятельности первичного лесного транспорта является объем трелевки в тоннах и уровень фактических расходов, сопоставляемых с планом, скорректированным на фактический объем трелевки [6, 7]. Этот показатель исходит из самой сущности трелевочного процесса, так как продукцией транспорта является процесс перемещения.

Прибыль, в данном случае, хотя и является плановым показателем финансово-хозяйственной деятельности лесозаготовительных предприятий, является выразителем лишь небольшой части этих затрат, которая, кстати, зависит не только от результатов использования ПТМ, но также и от норматива и уровня тарифной платы, установленной за трелевку груза, поскольку прибыль есть разница между доходами и фактическими расходами лесозаготовительного предприятия. Принять в таком случае прибыль в качестве критерия оценки выбора погрузочно-транспортных машин было бы неправильно, так как этот показатель ори-

ентировал бы нас не столько на эффективный выбор типажа погрузочно-транспортных машин применительно к условиям трелевки, сколько на выбор наиболее прибыльных высоко тарифицируемых операций трелевки. Кроме того, лесозаготовительному предприятию задаются планом строго конкретные трелевки сортиментов и этим уже определяются плановые доходы, расходы и прибыль. Сверхплановая же прибыль, при строгом соблюдении плановых объемов трелевки сортиментов, может быть достигнута лишь за счет уменьшения планируемых на это расходов, т.е. за счет снижения себестоимости трелевки сортиментов.

Если к изложенному прибавить то, что средний размер прибылей в лесозаготовительных предприятиях обычно составляет около 15-20 %, а затраты – 80-85 % от плановых доходов, то становится очевидным, что в качестве наиболее объективных показателей работы первичного лесного транспорта могут быть приняты: количество перевезенных тонн груза и фактические затраты на выполнение трелевочного процесса. Вместе с этим, количество перевезенных тонн и фактические затраты на выполнение трелевочного процесса обуславливаются, в каждом отдельном случае, условиями трелевки сортиментов. Поскольку, в конечном итоге, вся экономия сводится к экономии времени, в качестве критерия эффективности трелевочного процесса необходимо принять удельные затраты времени на выполнение трелевочного процесса в натуральном и ценностном выражении.

В процессе трелевки сортиментов необходимое время складывается из затрат времени расходуемых на движение и погрузочно-разгрузочные операции [8-11]. В каждом отдельном случае соотношение удельных весов этих составных частей необходимого времени оказывает существенное влияние на производительность погрузочно-транспортных машин и себестоимость трелевки сортиментов, а, следовательно, и на эффективность трелевочного процесса в целом. Более того, определение затрат необходимого времени в натуральном или ценностном выражении представляет качественно разные аспекты хозяйственной эффективности трелевочного процесса. Во всех иных случаях, когда основным условием трелевочного процесса является минимум транспортных издержек, в качестве критериев эффективности трелевочного процесса следует принимать необходимое время на его выполнение в ценностном выражении.

В тех же случаях, когда по условиям трелевки сортиментов техническая скорость различных ПТМ будет одинаковой или относительно близкой, затраты необходимого на движение времени будут пропорциональны пройденному пути и тогда в качестве критерия оценки трелевочного процесса может условно быть принят пройденный путь. Так, в частности производится оценка транспортного процесса при организации трелевки сортиментов по проложенным трелевочным волокам.

Таким образом, на основании изложенного можно заключить, что в качестве возможных критериев оценки эффективности трелевочного процесса целесообразно принять: пройденный путь ПТМ, время движения, время простоя под погрузкой-разгрузкой и суммарное время на выполнение трелевочного процесса в натуральном и ценностном выражении.

### **Обоснование критериев оценки**

Для обоснования принятых критериев оценки транспортного процесса воспользуемся аналитическими зависимостями, полученными при сравнении вариантов трелевки сортиментов погрузочно-транспортными машинами различного типажа и грузоподъемности в идентичных условиях их эксплуатации. Обоснование того или иного критерия оценки будет вытекать из анализа результатов исследования. Рассмотрим каждый из возможных критериев оценки отдельно.

#### **Пройденный путь**

Пройденный путь первичного лесного транспорта ( $L_{об}$ ) в условиях заданного объема трелевки ( $Q$ ), среднего расстояния трелевки ( $l_{гр}$ ), грузоподъемности ПТМ ( $q_H$ ), коэффициен-

та использования расстояния трелевки ( $\beta$ ), и коэффициента использования грузоподъемности ( $\gamma$ ) принято определять по следующей зависимости:

$$L_{об} = \frac{Q_{гр}}{\beta q_{H1} \gamma} \quad (1)$$

Здесь и дальше рассматриваемый нами трелевочный процесс исключает случаи сортировки сортиментов.

Если же при соблюдении указанных условий при трелевке сортиментов заменить погрузочно-транспортные машины одной грузоподъемности ( $q_{H1}$ ) на другую ( $q_{H2}$ ) и допустить, что в этом случае [12-14], то разность в пройденном пути ( $\Delta l$ ), полученная за счет указанного, определится из выражения:

$$\Delta l = \frac{Q_{гр}}{\beta q_{H1} \gamma_1} - \frac{Q_{гр}}{\beta q_{H2} \gamma_2} = \frac{Q_{гр}}{\beta \gamma} \left( \frac{1}{q_{H1}} - \frac{1}{q_{H2}} \right) = \frac{Q_{гр}}{\beta \gamma} \cdot \frac{1 - \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} \quad (2)$$

Заменив  $Q_{гр} \cdot P$  (суммарный грузооборот) получим:

$$\Delta l = \frac{P}{\beta \gamma} \cdot \frac{1 - \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}}, \quad (3)$$

следовательно:

$$\frac{1 - \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} = K_1 \quad (4)$$

и назовем его коэффициентом предпочтения по пройденному пути, а выражение (2) представим в общем виде следующим образом:

$$\Delta l = \frac{PK_1}{\beta \gamma} \quad (5)$$

Как следует из представленной зависимости (5), сокращение расстояния трелевки, полученное в результате замены ПТМ меньшей грузоподъемности на большую, прямо пропорционально грузообороту и коэффициенту предпочтения и обратно пропорционально произведению коэффициентов использования расстояния трелевки и номинальной грузоподъемности. В случае замены ПТМ большей грузоподъемности на меньшую коэффициент предпочтения будет величиной положительной и общий пройденный путь при этом увеличится, что подтвердит нерациональность такой замены.

Стоимость сокращения расстояния трелевки ( $\Delta S_e$ ) с выражением (2 и 3) определяем следующим образом:

$$\Delta S_e = \frac{S_1 Q_{гр}}{\beta q_{H1} \gamma} - \frac{S_2 Q_{гр}}{\beta q_{H2} \gamma} = \frac{P}{\beta \gamma} \left( \frac{S_1 q_{H1} - S_2 q_{H1}}{q_{H1} q_{H2}} \right) = \frac{P}{\beta \gamma} \left( \frac{S_1 - S_2 \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} \right)^0 \quad (6)$$

Обозначив

$$\frac{S_1 - S_2 \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} = K'_1 \quad (7)$$

(коэффициент предпочтения по стоимости пройденного пути), получим окончательное выражение для  $\Delta S_e$  ;

$$\Delta S_e = \frac{PK'_1}{\beta \gamma}, \quad (8)$$

где:

$\Delta S_e$  – стоимость сокращения расстояния трелевки в руб.;

$S_1$  – стоимость затрат на метр пути для определенного типа погрузочно-транспортных машин грузоподъемностью  $q_{H1}$ , в руб. за м.;

$S_2$  – тоже, грузоподъемностью  $q_{H2}$ .

### Время движения

Время движения погрузочно-транспортных машин  $T_{\text{ПТМ}}$  определим из выражения:

$$T_{\text{ПТМ}} = \frac{L_{\text{об}}}{V_t} \quad (9)$$

Разность времени движения ( $\Delta T_{\text{ПТМ}}$ ), полученное в результате замены ПТМ грузо-подъемности  $q_{H1}$ , на  $q_{H2}$  определяем следующим образом:

$$\Delta T_{\text{ПТМ}} = \frac{L_{\text{об}1}}{V_{t1}} - \frac{L_{\text{об}2}}{V_{t2}} = \frac{Q_{\text{гр}}}{\beta \gamma q_{H1} V_{t1}} - \frac{Q_{\text{гр}}}{\beta \gamma q_{H2} V_{t2}} = \frac{P}{\beta \gamma} \left( \frac{1 - \frac{q_{H1} V_{t1}}{q_{H2} V_{t2}}}{q_{H1} V_{t1}} \right) \quad (10)$$

Обозначив

$$\frac{1 - \frac{q_{H1} V_{t1}}{q_{H2} V_{t2}}}{q_{H1} V_{t1}} = K_2 \quad (11)$$

(коэффициент предпочтения по времени движения), получим окончательное выражение для  $\Delta T_{\text{ПТМ}}$ :

$$\Delta T_{\text{ПТМ}} = \frac{PK_2}{\beta \gamma} \quad (12)$$

Стоимость сокращенного времени движения, полученного от замены погрузочно-транспортных машин  $q_{H1}$  на  $q_{H2}$  определяем из следующей зависимости:

$$\Delta S_{\text{ПТМ}} = \frac{P}{\beta \gamma} \left( \frac{C_1}{q_{H1} V_{t1}} - \frac{C_2}{q_{H2} V_{t2}} \right) \quad (13)$$

$C_1$  и  $C_2$  стоимости одного часа движения погрузочно-транспортных машин определенного типа и соответственно грузо-подъемности  $q_{H1}$  и  $q_{H2}$  в руб. за час., но так как  $C_1 = S_1 V_1$ , а  $C_2 = S_2 V_2$  то подставив указанные значения в зависимость (13), получим:

$$\Delta S_{q\rho} = \frac{P}{\beta \gamma} \left( \frac{S_1 V_{t1}}{q_{H1} V_{t1}} - \frac{S_2 V_{t2}}{q_{H2} V_{t2}} \right) = \frac{P}{\beta \gamma} \cdot \left( \frac{S_1 - S_2 \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} \right) \quad (14)$$

Заменив

$$\frac{S_1 - S_2 \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} = K'_2 \quad (15)$$

(коэффициент предпочтения по стоимости времени движения), получим окончательное выражение для  $\Delta S_{q\rho}$ :

$$\Delta S_{q\rho} = \frac{PK'_2}{\beta \gamma} \quad (16)$$

Сравнив зависимость (16) с (7), убеждаемся, что  $K'_1 = K'_2$ , то есть коэффициенты предпочтения по стоимости расстояния трелевки и времени расстояния трелевки есть суть одно и то же.

### Время простоя погрузочно-транспортных машин под погрузкой-разгрузкой

Время простоя ПТМ под погрузкой-разгрузкой определяем из выражения:

$$T_{\text{пр}} = \frac{Q}{q_{H\gamma}} \cdot t_{\text{пр}} \quad (17)$$

где  $t_{\text{пр}}$  – время простоя в час. на трелевку;

При замене ПТМ  $q_{H1}$  на  $q_{H2}$  разность времени простоя под погрузкой-разгрузкой будет составлять:

$$\Delta T_{\text{пр}} = \frac{Q}{q_{H1}\gamma} t_{\text{пр}1} - \frac{Q}{q_{H2}\gamma} t_{\text{пр}2} = \frac{Q}{\gamma} \left( \frac{t_{\text{пр}1}}{q_{H1}} - \frac{t_{\text{пр}2}}{q_{H2}} \right) = \frac{Q}{\gamma} \left( \frac{t_{\text{пр}1} - t_{\text{пр}2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} \right) \quad (18)$$

Для идентичности с ранее указанными зависимостями ( $\Delta L$ ,  $\Delta T_{\text{ПТМ}}$ ) выразим  $\Delta T_{\text{пр}}$  не через объем трелевки ( $Q$ ), а через грузооборот  $P$ , тогда:

$$\Delta T_{\text{пр}} = \frac{Q l_{\text{гр}}}{\beta \gamma} \left( \frac{t_{\text{пр}1} - t_{\text{пр}2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} \right) \cdot \frac{\beta}{l_{\text{гр}}} \quad (19)$$



Обозначив 
$$\frac{t_{\text{пр}1} - t_{\text{пр}2} \frac{q_{\text{H}1}}{q_{\text{H}2}} \beta}{q_{\text{H}} l_{\text{гр}}} = K_3 \quad (20)$$

(коэффициент предпочтения по времени простоя), получаем окончательное выражение для  $\Delta T_{\text{пр}}$ :

$$\Delta T_{\text{пр}} = \frac{PK_3}{\beta\gamma} \quad (21)$$

По аналогии с выражением (14) запишем значение стоимости дополнительного времени простоя  $\Delta S_{\text{пр}}$  при замене ПТМ  $q_{\text{H}1}$  на  $q_{\text{H}2}$ :

$$\Delta S_{\text{пр}} = \frac{P}{\beta\gamma} \left( \frac{S'_1 t_{\text{пр}1} - S'_2 t_{\text{пр}2} \frac{q_{\text{H}1}}{q_{\text{H}2}}}{q_{\text{H}1}} \right) \cdot \frac{\beta}{l_{\text{гр}}} \quad (22)$$

где:  $S'_1$   $S'_2$  – стоимость 1 часа простоя ПТМ под погрузкой-разгрузкой в руб. соответственно для  $q_{\text{H}1}$  и  $q_{\text{H}2}$

Заменив выражение:

$$\frac{S'_1 t_{\text{пр}1} - S'_2 t_{\text{пр}2} \frac{q_{\text{H}1}}{q_{\text{H}2}}}{q_{\text{H}1}} \cdot \frac{\beta}{l_{\text{гр}}} = K'_3 \quad (23)$$

(коэффициент предпочтения по стоимости времени простоя), получаем окончательное выражение для  $\Delta S_{\text{пр}}$ :

$$\Delta S_{\text{пр}} = \frac{PK'_3}{\beta\gamma} \quad (24)$$

Суммарное время трелевки сортиментов ( $T_{\text{п}}$ ) определяем следующим образом:

$$T_{\text{п}} = T_{\text{ПТМ}} + T_{\text{пр}} \quad (25)$$

Разность времени трелевки сортиментов, полученная от замены ПТМ грузоподъемности  $q_{\text{H}1}$  на  $q_{\text{H}2}$  будет составлять:

$$\Delta T_{\text{п}} = \Delta T_{\text{ПТМ}} + \Delta T_{\text{пр}} = \frac{PK_2}{\beta\gamma} + \frac{PK_3}{\beta\gamma} = \frac{P}{\beta\gamma} (K_2 + K_3) = \frac{P}{\beta\gamma} \left( \frac{1 - \frac{q_{\text{H}1} V t_1}{q_{\text{H}2} V t_2}}{q_{\text{H}1}} + \frac{t_{\text{пр}1} - t_{\text{пр}2} \frac{q_{\text{H}1}}{q_{\text{H}2}}}{q_{\text{H}1}} \cdot \frac{\beta}{l_{\text{гр}}} \right) \quad (26)$$

Стоимость разности суммарного времени трелевки сортиментов ( $\Delta S_{\text{п}}$ ), (коэффициент предпочтения по времени трелевки), получаем окончательное выражение для  $\Delta T_{\text{п}}$ :

$$\Delta T_{\text{п}} = \frac{PK_4}{\beta\gamma} \quad (27)$$

Стоимость разности суммарного времени трелевки сортиментов ( $\Delta S_{\text{п}}$ ), полученной от замены ПТМ грузоподъемностью  $q_{\text{H}1}$  на  $q_{\text{H}2}$ , по аналогии с зависимостью (27) выразим следующим образом:

$$\Delta S_{\text{п}} = \frac{P}{\beta\gamma} (f'_2 + f'_3) = \frac{P}{\beta\gamma} \left( \frac{S_1 + S_2 \frac{q_{\text{H}1}}{q_{\text{H}2}}}{q_{\text{H}1}} + \frac{S'_1 t_{\text{пр}1} - S'_2 t_{\text{пр}2} \frac{q_{\text{H}1}}{q_{\text{H}2}}}{q_{\text{H}1}} \cdot \frac{\beta}{l_{\text{гр}}} \right) \quad (28)$$

Обозначив

$$\frac{S_1 + S_2 \frac{q_{\text{H}1}}{q_{\text{H}2}}}{q_{\text{H}1}} + \frac{S'_1 t_{\text{пр}1} - S'_2 t_{\text{пр}2} \frac{q_{\text{H}1}}{q_{\text{H}2}}}{q_{\text{H}1}} \cdot \frac{\beta}{l_{\text{гр}}} = K'_4 \quad (29)$$

(коэффициент предпочтения по стоимости времени трелевки), получаем окончательное выражение для  $\Delta S_{\text{п}}$ :

$$\Delta S_{\text{п}} = \frac{PK'_4}{\beta\gamma} \quad (30)$$

Следовательно, замена типажа ПТМ грузоподъемностью  $q_{\text{H}1}$  на  $q_{\text{H}2}$ , в равных эксплуатационных условиях вызывает разность в пройденном пути, времени движения, времени простоя под погрузкой-разгрузкой и суммарном времени трелевки, которая прямо пропорциональна выражению  $\frac{P}{\beta\gamma}$  умноженному на соответствующий коэффициент предпочтения. Расчетные формулы коэффициентов предпочтения и их аналитические выражения представлены в табл. 1.

Таблица 1.  
Расчетные формулы коэффициентов предпочтения  
и их аналитические выражения

Table 1.  
Calculation equations of preference factors and their analytical expressions

№	Наименование	Размерность	Символ	Расчетная формула
1.	Коэффициент предпочтения по пробегу	1/тонн	$K_1$	$= \frac{1 - \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}}$
		Руб/т. метры	$K'_1$	$= \frac{S_1 - S_2 \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}}$
2.	Коэффициент предпочтения по времени движения	час/т. метр	$K_2$	$= \frac{1 - \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}}$
		Руб/т. метры	$K'_2$	$= \frac{S_1 - S_2 \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}}$
3.	Коэффициент предпочтения по времени простоя под погрузкой-выгрузкой	час/т. метр	$K_3$	$= \frac{t_{np1} - t_{np2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}} \cdot \frac{\beta}{l_{гр}}}{q_{H1}}$
		Руб/т. Метры	$K'_3$	$= \frac{S'_1 t_{np1} - S'_2 t_{np2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}} \cdot \frac{\beta}{l_{гр}}}{q_{H1}}$
4	Коэффициент предпочтения по времени трелевок	час/т. метр	$K_4$	$= \frac{1 - \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} + \frac{t_{np1} - t_{np2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}} \cdot \frac{\beta}{l_{гр}}}{q_{H1}}$
		Руб/т. метры	$K'_4$	$= \frac{S_1 - S_2 \frac{q_{H1}}{q_{H2}}}{q_{H1}} + \frac{S'_1 t_{np1} - S'_2 t_{np2} \frac{q_{H1}}{q_{H2}} \cdot \frac{\beta}{l_{гр}}}{q_{H1}}$

Коэффициенты предпочтения, как выводы представленных формул, имеют размерность час/т. метры и руб/т. метры, исключая коэффициент предпочтения по пройденному пути, размерность которого 1/Т. Такая идентичность размерности коэффициентов подтверждает то, что они характеризуют одни и те же явления и закономерности, а разница в их абсолютных значениях определяет степень точности характеристики этих явлений и закономерностей. Поэтому определим предельные значения коэффициентов предпочтения для различного типажа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин в типичных условиях эксплуатации и установим степень отклонения их абсолютных значений. Если она окажется несущественной, то для оценки выбора типажа и грузоподъемности ПТМ примем тот из них, который окажется наиболее простой по технике вычисления и будет обеспечивать получение точного результата. Когда же отклонения абсолютных значений коэффициентов предпочтения будут велики, то для оценки выбора погрузочно-транспортных машин примем тот из них, который наиболее полно и всесторонне будет характеризовать все особенности транспортного процесса.

Расчеты предельных значений коэффициентов предпочтения выполнены исходя из ранее установленных нами показателей  $V_t$  и  $t_{np}$ , а также расчетных данных  $S$  и  $S'$  для условий:

- а) когда  $q_{H1} = 0,8$  т., а  $q_{H2} = 20$  т. и  $K_{min}$  когда  $q_{H1} = 13$  т., а  $q_{H2} = 20$  т.;
- б) по погрузочно-транспортная машина третьего типа:  $K_{max}$ , когда  $q_{H1} = 2,25$  т.,  $q_{H2} = 27$  т. и  $K_{min}$  когда  $q_{H1} = 25$  т., а  $q_{H2} = 27$  т.;

в) для  $K_3$ ,  $K'_3$ ,  $K_4$  и  $K'_4$  принято случай, когда  $\frac{\beta}{l_{гр}} = 1$ , то есть максимально возможное значение (поскольку с увеличением  $l_{гр}$  более 1 отношение  $\frac{\beta}{l_{гр}}$  будет уменьшаться, уменьшая этим  $K$ ).

Результаты расчетов коэффициентов предпочтения погрузочно-транспортных машин различного типажа и грузоподъемности представлены на графиках (рис. 1, 2), а предельные значения в табл. 1.

Анализ представленных на рис. 1 и 2 функциональных зависимостей и предельных значений коэффициентов предпочтения погрузочно-транспортных машин [15-17] в наиболее типичных условиях их эксплуатации убеждает в нижеследующем:

а) с увеличением разности грузоподъемности погрузочно-транспортных машин ( $q_{Н1} - q_{Н1}$ ) во всех расчетных формулах коэффициентов предпочтения по времени движения, простоя и трелевки сортиментов правая часть числителя будет уменьшаться, увеличивая этим значение числителя, а так как общий знаменатель при этом остается неизменным, то частное от деления всегда будет положительным и тем больше, чем больше разность грузоподъемностей ( $q_{Н1} - q_{Н1}$ );

б) с увеличением разности грузоподъемности погрузочно-транспортных машин ( $q_{Н1} - q_{Н1}$ ) в случае определения коэффициентов предпочтения в стоимостном выражении, стоимость времени движения ( $K'_2$ ) всегда будет увеличиваться, а стоимость времени простоя ( $K'_3$ ) уменьшаться, поэтому суммарная стоимость трелевки сортиментов ( $K'_4$ ) может иметь как положительное, так и отрицательное значение, в зависимости от того, какое слагаемое по абсолютной величине окажется большим ( $K'_2$  или  $K'_3$ );

в) коэффициенты предпочтения погрузочно-транспортных машин по времени трелевки ( $K_4$ ) и его стоимости ( $K'_4$ ) включают в себя как время движения, так и время простоя, они наиболее полно характеризуют эти оба элемента транспортного процесса, а поэтому являются обобщающими коэффициентами предпочтения погрузочно-транспортных машин.

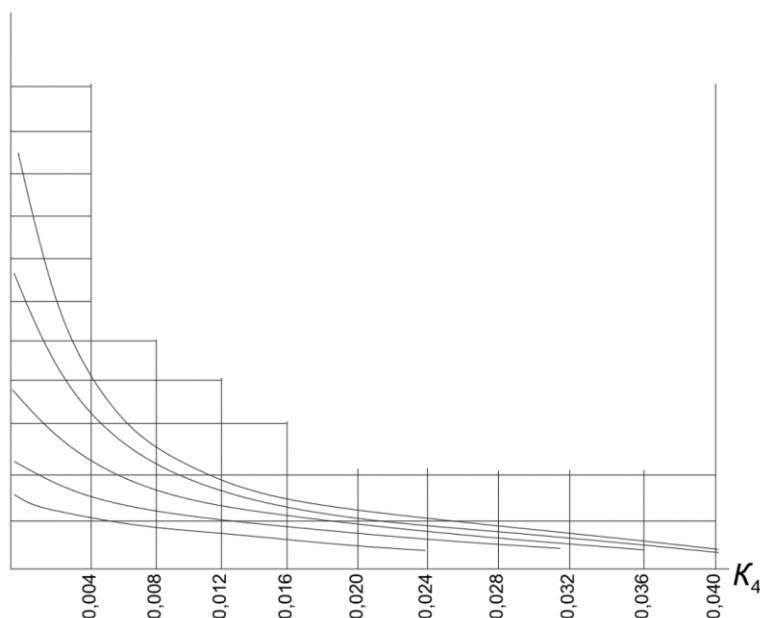


Рис. 1. Коэффициент предпочтения погрузочно-транспортных машин по времени трелевки ( $K_4$ ), в час/т. метры

Fig. 1. Preference factors of loading and transport vehicles in terms of skidding time ( $K_4$ ), h/t·m

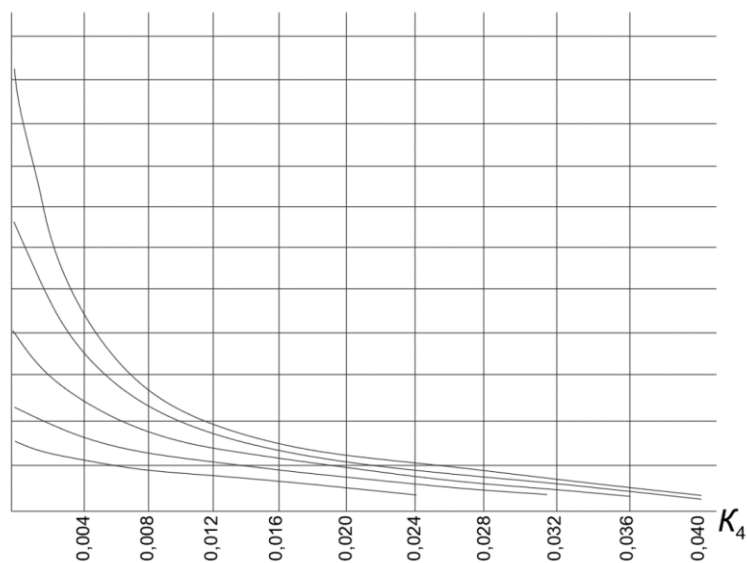


Рис. 2. Коэффициент предпочтения погрузочно-транспортных машин по времени трелевки ( $K_4'$ ), в руб./т.м

Fig. 2. Preference factors of loading and transport vehicles in terms of skidding time ( $K_4'$ ), in RUB/t.m

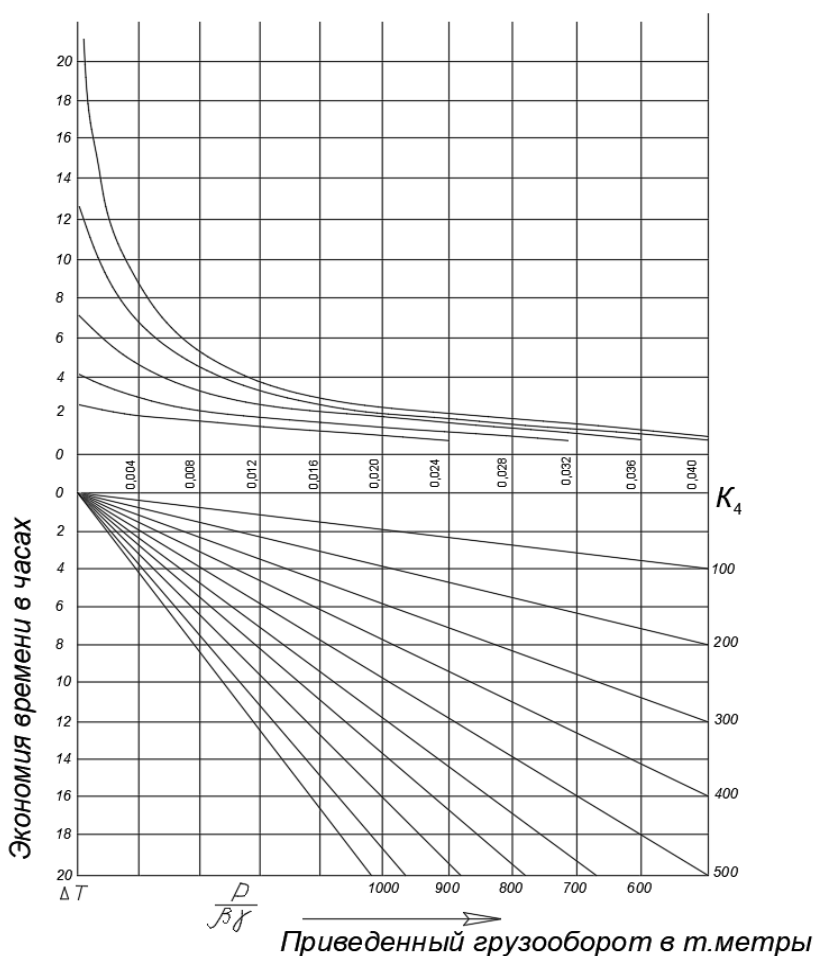


Рис. 3. Номограмма выбора погрузочно-транспортных машин по себестоимости трелевки третьего типа  $l_{гр}=500$  м,  $\beta = 0,5$

Fig. 3. Nomogram for selection of loading and transport machines based on the cost price of skidding of the third type  $l_{gr}=500$  m,  $\beta = 0,5$

### Математическая формулировка задачи оптимальной расстановки погрузочно-транспортных машин

Приняв в качестве обобщающих критериев оценки трелевочного процесса стоимость и время трелевки сортиментов, сформулируем постановку задачи следующим образом. Имеется  $m$ -типов погрузочно-транспортных машин в количествах  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_m$ , единиц и  $n$  маршрутов, по которым необходимо выполнять трелевку  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$  единиц груза сортиментов. При этом, любой тип погрузочно-транспортных машин возможно использовать на любом маршруте трелевочного волокна. Пусть производительность  $i$ -ого типа погрузочно-транспортных машин на  $J$ -ом маршруте за время смены обозначается –  $P_{ij}$ ; количество погрузочно-транспортных машин  $i$ -ого типа, работающих на  $J$ -ом маршруте –  $X_{ij}$  а стоимость трелевки одной тонны груза сортиментов  $i$ -ом типом погрузочно-транспортных машин на  $J$ -ом маршруте трелевочного волокна –  $C_{ij}$ . Требуется найти такой план трелевки сортиментов  $[[X_{ij}]]$  который не превышал бы наличного количества погрузочно-транспортных машин, обеспечивал бы полную трелевку сортиментов по каждому маршруту трелевочного волокна и обращал бы в минимум стоимость трелевки, то есть:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq a_i \tag{31}$$

$$\sum_{i=1}^m P_{ij} X_{ij} = Q_j \tag{32}$$

где  $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n; X_{ij} \geq 0$ .

Перемещенные  $X_{ij}$  должны минимизировать линейную форму

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} P_{ij} X_{ij} = Q_j \tag{33}$$

Условия (31, 32, 33), можно записать в виде матричных таблиц (табл. 2), на основе которой представлена развернутая формулировка задачи где требуется:

найти значение  $X_{ij}$  удовлетворяющие ограничивающим условиям:

а) по количеству погрузочно-транспортных машин

$$\left. \begin{aligned} X_{11} + X_{12} + \dots + X_{1n} &\leq a_1 \\ X_{21} + X_{22} + \dots + X_{2n} &\leq a_2 \\ &\dots \\ &\dots \\ &\dots \\ X_{m1} + X_{m2} + \dots + X_{mn} &\leq a_m \end{aligned} \right\} \tag{34}$$

**Таблица 2.**  
**Матричная таблица**

*Table 2.*  
**Matrix table**

объем трелевок в т.	Q1,	Q2,	Q3	...	Qn-2	Qn-1	Qn
Количество ПТМ в шт.				...			
a1	C11	C12	C13	...	C1n-2	C1n-1	C1n
	P11	P12	P13		P1n-2	P1n-1	P1n
a2	C21	C22	C23	...	C2n-2	C2n-1	C2n
	P21	P22	P23		P2n-2	P2n-1	P2n
a3	C31	C32	C33	...	C3n-2	C3n-1	C3n

Окончание табл. 2.  
Матричная таблица

Table 2. continued  
Matrix table

	P31	P32	P33		P3n-2	P3n-1	P3n
.....	.....	.....	.....		.....	.....	.....
am-1	Cm-11	Cm-12	Cm-13		Cm-1n-2	Cm-1n-1	Cm-1n
	Pm-11	Pm-12	Pm-13	...	Pm-1n-2	Pm-1n-1	Pm-1n
am	Cm1	Cm2	Cm3		Cmn-2	Cmn-1	Cmn
	Pm1	Pm2	Pm3	...	Pmn-2	Pmn-1	Pmn

а) по объему выполняемой работы

$$\left. \begin{aligned}
 P_{11}X_{11} + P_{21}X_{21} + \dots + P_{m1}X_{m1} &= Q_1 \\
 P_{12}X_{12} + P_{22}X_{22} + \dots + P_{m2}X_{m2} &= Q_2 \\
 &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\
 &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\
 &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \\
 P_{1n}X_{1n} + P_{2n}X_{2n} + \dots + P_{mn}X_{mn} &= Q_n
 \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Целевая функция задачи выражается линейной формой вида:

$$F = C_{11}P_{11}X_{11} + C_{12}P_{12}X_{12} + \dots + C_{1n}P_{1n}X_{1n} + C_{2n}P_{2n}X_{2n} + C_{mn}P_{mn}X_{mn} \quad (36)$$

В случае, когда расстановка погрузочно-транспортных машин будет производиться не по стоимости трелевки сортиментов, а по минимуму провозных возможностей (максимум производительности или минимум необходимого времени), то постановка задачи будет формулироваться следующим образом.

При тех же условиях трелевки требуется найти такой план расстановки погрузочно-транспортных машин [[Xij]], который не превышал бы его наличного количества, обеспечивал бы полностью трелевку сортиментов по каждому маршруту и обращал бы в минимум провозные возможности, то есть при ограничениях (31 и 32) переменные Xij должны минимизировать линейную форму:

$$F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} \rightarrow \min \quad (37)$$

В развернутом виде эта задача будет иметь ограничивающие условия (34 и 35), а целевая функция представлена формой:

$$F' = X_{11} + X_{12} + \dots + X_{1n} + X_{mn} \quad (38)$$

Из поставленных задач видно, что они относятся к классу задач линейного программирования и представляют собой обобщающую транспортную задачу со взаимозаменяемостью, известной в технической литературе как *к-я* и *л-а* задача [3, 4]. Их решение может выполняться методом разрешающих множителей, предложенным Л.Б. Канторовичем, методом градиентного спуска в пространстве потенциалов с применением сглаживающей функции, предложенным Н.З. Шором [18, 19], более точным, но сложным методом В.В. Шкарубы [20-22] и симплекс-методом.

Нами применен и практически опробован для решения поставленных задач модифицированный симплекс-метод с верхними пределами с использованием прикладной компьютерной программы, разработанной фирмой *Siminthech*. Программа состоит из 980 команд и констант и решает задачу линейного программирования типа

$$\sum_{j=1}^n C_j X_j \left| \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \leq P_i \quad (i = 1, 2 \dots m-\tau) \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \geq P_i \quad (i = m-\tau + 1, \dots m) \end{array} \right| \quad (39)$$

$$0 \leq X_j \leq \widehat{X}_j$$

где:  $\tau$  – количество условий типа  $=$  и  $\geq$ ;

$K$  – количество условий типа  $\geq$ ;

$\widehat{X}_j$  – верхние границы переменных;

$n$  – количество переменных;

$m$  – количество ограничений.

Ограничения, которые накладываются на исходные данные, составляют:

$$n + K \leq 500$$

$$m \leq 158$$

$$(m+K)m \leq 4096$$

Этот способ решения более прост, удобен и позволяет получить хорошие результаты при минимальных затратах машинного времени, о чем свидетельствует экспериментальная проверка.

### Выводы

На основании изложенного можно сделать следующие обобщающие выводы:

- 1) увеличение грузоподъемности ПТМ всегда уменьшает удельные затраты времени на единицу транспортной работы, поэтому, для сокращения времени трелевки сортиментов всегда целесообразно использовать ПТМ большей грузоподъемности на объектах с большим грузооборотом;
- 2) увеличение грузоподъемности ПТМ различного типажа не во всех случаях снижает удельные затраты на трелевку сортиментов, поэтому и степень влияния ПТМ на удельные затраты различна, в зависимости от конкретных условий их эксплуатации;
- 3) в качестве обобщающих критериев оценки влияния ПТМ на эффективность трелевочного процесса необходимо принять: время трелевки сортиментов – для всех тех случаев, когда решающим фактором является скорость трелевки сортиментов, и стоимость трелевки сортиментов во всех остальных случаях, когда решающим фактором транспортного процесса являются издержки на трелевку сортиментов;
- 4) для практического решения вопросов рационального выбора ПТМ по коэффициенту предпочтения целесообразно строить по указанным зависимостям номограммы (рис. 3) и по ним, зная условия трелевки, заданный грузооборот, устанавливать наиболее экономичный, по производительности и по стоимости трелевки, тип погрузочно-транспортных машин;
- 5) с этой целью авторами была разработана и опробована программа расчета коэффициента предпочтения для марок любых производителей ПТМ в заданных условиях трелевки в прикладном пакете программ *Simintech* [23, 24];
- 6) использование номограммами коэффициентов предпочтения для рационального выбора погрузочно-транспортных машин практически и оправдано лишь на стадии проектирования трелевочного процесса на длительный промежуток времени (при перспективном планировании) или в случае разового решения этого вопроса. Поэтому общую задачу выбора ПТМ следует рассмотреть в более сложной ее постановке, когда требуется рационально выбрать и расставить наличный ПТМ различного типажа в заданных условиях трелевки сортиментов.

## Библиографический список

1. **Kotiev, G.O.** A method to improve forwarders' energy performance and environmental compatibility / G.O. Kotiev, E.E. Klubnichkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Nizhny Novgorod State Technical University. 2021. Том 1086. С. 012004.
2. **Клубничкин, Е.Е.** Выбор и обоснование конструкции грузового отсека погрузочно-транспортной машины / Е.Е. Клубничкин, Г.О. Котиев, М.В. Федотов, И.О. Наказной, Д.И. Рогачев // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 163. С. 74-90.
3. **Агейкин, Я.С.** Проприетарность автомобилей / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 230 с.
4. **Макаров, В.С.** Исследование деформационных свойств дорожно-грунтовых оснований типа микст / В.С. Макаров, А.М. Беляев, А.И. Марковнина, В.В. Беляков // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021. Сборник тезисов VIII Международной научно-практической конференции. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. С. 430-434.
5. **Клубничкин, В.Е.** Краткий анализ тенденций развития лесозаготовительных машин / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, А.Б. Карташов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 3 (130). С. 93-102.
6. **Божбов, В.Е.** Повышение эффективности процесса трелевки путем обоснования рейсовой нагрузки форвардеров / В.Е. Божбов, Д.А. Ильюшенко, Е.Г. Хитров. – СПб: СПбГЛТУ, 2015. – 119 с.
7. **Божбов, В.Е.** Повышение эффективности процесса трелевки путем обоснования рейсовой нагрузки форвардеров. Дисс. ... к-та технических наук. – Архангельск, Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, 2015 – 165 с.
8. **Сивков, Е.Н.** Корреляционная зависимость времени трелевки от интервалов времени на погрузочно-выбракочные операции форвардера // Научные чтения. Сборник материалов научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава Сыктывкарского лесного института по итогам научно-исследовательской работы в 2008 г. – Сыктывкар, Изд-во Сыктывкарского лесного института, 2009. С. 527-531.
9. **Суханов, Ю.В.** Имитационное моделирование операций трелевки форвардером: алгоритмы и реализация / Ю.В. Суханов, А.А. Селиверстов, А.П. Соколов, С.Н. Перский // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2012. Т. 9. № 1. С. 58-61.
10. **Ширнин, А.Ю.** Машина для комбинированной трелевки древесины на базе форвардера и анализ ее производительности / А.Ю. Ширнин, И.В. Зверев // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая. 2014. № 2. С. 218-223.
11. **Хитров, Е.Г.** Изучение производительности трелевки форвардером / Р.С. Беспалов, Д.О. Диваков, А.Ф. Эйвазов, К.А. Козловская // Сборник статей по материалам научно-технической конференции института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ 2022 г. – СПб: СПбГЛТУ им. С.М. Кирова, 2023. С. 78-83.
12. **Эйхлер, Л.В.** Теоретическое осмысление интеграционных процессов на транспорте (на примере автомобильного транспорта) // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 365. С. 125-132.
13. **Shtepa, A.A.** Application of selection criteria in management decision forecasting models at road transport enterprises / A.A. Shtepa, A.V. Ivanova // Перспективы развития и основные вопросы в науке. Материалы Национальной научно-практической конференции. Воронеж, 15 марта 2023. – Воронеж: ВГЛТУ, 2023. С. 68-75.
14. **Епишкин, В.Е.** Совершенствование методики расчета предприятий автомобильного транспорта // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства. Труды IV международной научно-технической конференции (Резниковские чтения). Тольятти, 27-29 мая 2015 г. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2015. С. 169-175.
15. **Клоков, Д.В.** Обоснование параметров и оценка динамических показателей лесной колесной погрузочно-транспортной машины. Автореферат дисс. ... канд. технических наук / Белорусский государственный технологический университет. – Мн.: БГТУ, 2001. – 21 с.
16. **Клоков, Д.В.** Оценка энергетических параметров лесной погрузочно-транспортной машины / А.А. Ермалицкий // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2005. № 12. С. 138-142.



17. **Войнаш, С.А.** Обоснование параметров малогабаритной погрузочно-транспортной машины / С.А. Войнаш, А.С. Войнаш // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 3 (13). С. 138-141.
18. **Шор, Н.З.** Применение метода градиентного спуска для решения сетевой транспортной задачи // Материалы на науч. семинара по теорет. и прикл. вопр. кибернетики и исследования операций: Науч. совет по кибернетике АН УССР. Киев, 1962. Вып. 1. С. 9-17.
19. **Шор, Н.З.** Методы минимизации недифференцируемых функций и их приложения. – Киев: Наукова думка, 1979. – 199с.
20. Методы сплайн-функций. Российская конференция, посвященная 80-летию со дня рождения Ю.С. Завьялова (Новосибирск, 31 января – 2 февраля 2011 г.): Тез. докладов / ИМ СО РАН. Новосибирск, 2011. – 113 с.
21. **Соколинская, И.М.** Синтез симплекс-метода и метода линейной коррекции в задачах линейной оптимизации с неформализованными ограничениями // Вычислительные методы и программирование. 2005. Т. 6. № 1. С. 226-238.
22. **Свалов, Д.В.** Сравнительный анализ эффективности симплекс-метода и метода минимальных путей на примере решения многопродуктовой транспортной задачи / Д.В. Свалов, С.И. Файнштейн //Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2011. Т. 2. № 69. С. 79-81.
23. **Карташов, Б.А.** Среда динамического моделирования технических систем SIMINTECH. Практикум по моделированию систем автоматического регулирования. / Б.А. Карташов, Е.А. Шабаев, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 424 с.
24. **Хабаров, С.П.** Основы моделирования технических систем. Среда SIMINTECH / С.П. Хабаров М.Л. Шилкина. – СПб: Лань, 2022. – 120 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 29.02.2024*

*Дата принятия  
к публикации: 27.05.2024*

УДК 629.3.027.3

EDN: RZBGHT

## КЛАССИФИКАЦИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ, РАБОТАЮЩЕЙ НА КРАЙНЕМ СЕВЕРЕ

**К.Я. Лелиовский**

ORCID: 0000-0003-0962-3303 e-mail: kleliovskiy@mail.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

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

ORCID: 0009-0003-6736-6461 e-mail: KhamitovAR@alrosa.ru

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

ORCID: 0000-0003-4109-8406 e-mail: umar-vahidov@mail.ru

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

ORCID: 0000-0003-0368-4199 e-mail: anikin.zvm@mail.ru

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

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

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

Представлены результаты статистического анализа вероятности потери подвижности специальной техники, эксплуатируемой в районах Крайнего Севера. Показаны отличия последствий возникновения неисправностей в обычных и экстремальных условиях эксплуатации. Приведены данные о вероятности срока эксплуатации специальной техники при возникновении и выявлении различных отклонений в параметрах работы машины, а также ее отдельных узлов и механизмов. Выделены основные типы неисправностей, которые могут привести к потере работоспособности техники на маршруте, ее полной утрате, а также созданию угрозы жизни и здоровью людей. По данному критерию выполнена классификация причин выхода из строя специальной техники, выявлены наиболее опасные нарушения работы машин, вероятность потери подвижности которой на маршруте наиболее высока.

**Ключевые слова:** специальные машины, критические и некритические неисправности, статистический анализ, классификация, условия эксплуатации.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Лелиовский, К.Я. Классификация неисправностей специальной техники, работающей на Крайнем Севере / К.Я. Лелиовский, Ю.И. Молев, А.Р. Хамитов, У.Ш. Вахидов, А.А. Аникин, С.А. Коростелев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 97-107. EDN: RZBGHT

## CLASSIFICATION OF MALFUNCTIONS OF SPECIAL EQUIPMENT OPERATING IN THE FAR NORTH

**K.Ya. Leliiovskij**

ORCID: **0000-0003-0962-3303** e-mail: **kleliiovskiy@mail.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Y.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*

**A.R. Khamitov**

ORCID: **0009-0003-6736-6461** e-mail: **KhamitovAR@alrosa.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**U.Sh. Vakhidov**

ORCID: **0000-0003-4109-8406** e-mail: **umar-vahidov@mail.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.A. Anikin**

ORCID: **0000-0003-0368-4199** e-mail: **anikin.zvm@mail.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**S.A. Korostelev**

ORCID: **0009-0003-1382-5589** e-mail: **korsan73@mail.ru**  
Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov  
*Barnaul, Russia*

**Abstract.** The paper presents the results of a statistical analysis of the probability of loss of mobility of special equipment operated in the Far North. The differences between the consequences of malfunctions in normal and extreme operating conditions are shown. The data on the probability of the service life of special equipment in the event of the occurrence and identification of various deviations in the parameters of the machine, as well as its individual components and mechanisms, are presented. The main types of malfunctions that can lead to loss of operability of equipment on the route, its complete loss, as well as the creation of a threat to human life and health are highlighted. According to this criterion, the classification of the causes of failure of special equipment was carried out, the most dangerous violations of the operation of machines were identified, the probability of loss of mobility of which is the highest on the route.

**Key words:** special machines, critical and non-critical faults, statistical analysis, classification, operating conditions.

**FOR CITATION:** K.Ya. Leliiovskij, Y.I. Molev, A.R. Khamitov, U.Sh. Vakhidov, A.A. Anikin, S.A. Korostelev. Classification of malfunctions of special equipment operating in the far north. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 97-107. EDN: RZBGHT

### Введение

Добыча и переработка полезных ископаемых в настоящее время остаются ведущими отраслями экономики нашей страны. Сейчас не имеется никаких предпосылок к снижению

спроса на данную продукцию, поэтому можно предположить, что в ближайшее время нас ждет разведка и разработка все новых и новых месторождений [1]. Характер распределения залежей полезных ископаемых свидетельствует, что большинство природных ресурсов расположено в труднодоступных районах, особенно на Крайнем Севере [2].

Интенсивное развитие данного региона началось в конце 1950-х – начале 1960-х гг., и с тех пор антропогенная нагрузка на земли Крайнего Севера только увеличивается. Особенностью данного региона является то, что он находится в зоне расположения вечномёрзлых грунтов, глубина которых колеблется от 50 м в районе Мурманска, до 900 м в районе Диксона [3]. Сезонное оттаивание данных грунтов, имеющее место в летний период, приводит к тому, что вода не просачивается вниз и происходит заболачивание поверхности движения специальной техники. В результате данного процесса оказывается, что движение в зимний период по снегу является экономически целесообразнее, чем движение по обводненному грунту [4, 5]. Также необходимо учитывать и экологический вред, наносимый вездеходной техникой окружающей среде, так как короткое лето не позволяет быстро нарастить поврежденную биомассу и устранить нанесенные повреждения. Поэтому, хотя в РФ действующее законодательство не запрещает использовать внедорожную технику в летний и весенне-осенний периоды (регионы могут установить только запрет на движение вездеходов по оленьим пастбищам), основные виды транспортных работ проводятся в зимний период [5].

Таким образом, специфика эксплуатации вездеходной техники в районах Крайнего Севера подразумевает основной объем эксплуатации в зимний период при температурах ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ , при скорости ветра до 20 м/с и в условиях полярной ночи [7, 8]. Кроме того, разреженность населения приводит к тому, что длина среднего рейса вездеходной техники на 50-100 % больше чем в регионах Центральной России [9]. В данных условиях любая потеря подвижности машины в результате аварии или поломки создает угрозы для жизни находящихся в машине людей. Распространенный в настоящее время метод формирования колонны машин, позволяющей эвакуировать людей приводит к удорожанию перевозки, что является определенной платой за безопасность персонала. Также следует отметить, что более-менее квалифицированный ремонт поврежденной техники под открытым небом в темное время при экстремально низких температурах является трудозатратным мероприятием. Эвакуация машины так же является дорогостоящим мероприятием, в котором надо задействовать более тяжелую технику. Кроме того, такая эвакуация возможна только до вмерзания машины в опорную поверхность. В силу всего перечисленного, вышедшая из строя техника остается на месте происшествия, так как ремонт и эвакуация обходится собственнику дороже новой техники. Поэтому классификация неисправностей специальной техники, работающей на Крайнем Севере, необходимая для того, чтобы установить приоритет и объем диагностических работ перед выпуском специальной техники в рейс, является актуальной научной задачей.

## Методы

Для решения поставленной задачи было проведено статистическое исследование по выявлению частоты возникновения неисправностей специальных машин, работающих на Крайнем Севере, причин их возникновения и скорости их прогрессирования от возникновения до ситуации при которой эксплуатация техники становится невозможной. Данные по вопросам производства внедорожной техники были предоставлены ООО «Трансмаш», по вопросам эксплуатации – СТ «Алмазавтоматика» АК «АЛРОСА» (ПАО), а по вопросам причин возникновения неисправности и скорости их развития – ЦБДДиТЭ НГТУ. В результате обработки представленного материала было установлено, что в 75-80 % случаев причиной утраты техники на маршруте явились не технические неисправности, а неправильный выбор траектории движения, который приводил либо к опрокидыванию техники, либо к ее затоплению. Основными техническими неисправностями, приведшими к потере подвижности машин, стали: неработоспособность двигателя – 40 %, повреждение деталей трансмиссии – 45 %, хо-

довой части 10 %; иные – 5 % (табл. 1). Причины возникновения неисправностей определялись с использованием нормативных справочников [10-13].



**Рис. 1. Примеры брошенной техники** [<https://sun9-19.userapi.com>] [<https://a.d-cd.net/>]

**Fig. 1. Examples of abandoned equipment** [<https://sun9-19.userapi.com>] [<https://a.d-cd.net/>]

Как видно из приведенных результатов, все неисправности специальной техники можно разделить по степени опасности, с точки зрения возможности потери подвижности на маршруте. К неопасным неисправностям следует отнести те, с возникновения которых до потери подвижности проходит более 20 моточасов работы, так как в этом случае возникшая неисправность позволяет пройти заданный маршрут без потери техники. Также не представляют опасности неисправности проявляющиеся в момент возникновения (с пробегом от момента возникновения до потери подвижности равным 0 моточасов), так как такая техника не сможет выйти на маршрут. Среднюю опасность представляют неисправности, между возникновением которых и потерей подвижности проходит от 10 до 20 моточасов, так как времени развития таких неисправностей обычно хватает для завершения маршрута. Наибольшую же опасность представляют неисправности, между возникновением которых и потерей подвижности проходит при пробеге отличным от 0 до 20 моточасов. Возникновение такой неисправности возможно в любой момент времени.

**Таблица 1.**  
**Основные типы неисправностей**  
**приведших к утрате специальной техники, работающей на Крайнем Севере**

**Table 1.**  
**The main types of malfunctions that led to the loss**  
**of special equipment operating in the Far North**

№ п/п	Наименование неисправности	Общее кол-во	%	Пробег от возникновения неисправности до потери подвижности, моточасов		Степень опасности неисправности
				min	max	
1	Разрушение деталей в следствие внутреннего металлургического дефекта	25	12,5	1	25	Опасно в начале эксплуатации
2	Разрушение подшипников (нарушение соосности)	75	32,5	1	10	Опасно
3	Нарушение регулировки подшипников (с заклиниванием вала и иногда с возгоранием)	4	2	0	0	Не опасно
3	Недостаток масла в двигателе (некачественное масло, попадание забортной воды)	39	18,5	0	5	Опасно
4	Недостаток масла в агрегатах трансмиссии (некачественное масло, попадание забортной воды)	9	4,5	10	30	Средне опасно
5	Попадание инородных предметов в двигатель	3	1,5	0	1	Средне опасно
6	Попадание инородных предметов в агрегаты трансмиссии (в том числе фрагментов разрушения зубьев)	5	2,5	0	30	Опасно
7	Неисправности работы топливной системы (нарушение регулировки форсунок)	10	5	1	20	Опасно
8	Возгорание при разгерметизации топливной системы	2	1	0	20	Средне опасно
9	Возгорание при нарушении в работе электропроводки	5	2,5	0	5	Средне опасно
10	Износ зубьев шестерен	3	1,5	20	50	Не опасно
11	Разрушение узлов ходовой части	5	2,5	0	20	Средне опасно
12	Прочие неисправности	10	5	0	30	Средне опасно





**Рис. 2. Пример неисправности, приведшей к полной утрате подвижности техники при одновременном обрыве болтов крепления колеса**

**Fig. 2. Example of a malfunction that resulted in a complete loss of mobility of the equipment with simultaneous breakage of the wheel mounting bolts**



**Рис. 3. Пример неисправности, приведшей к полной утрате подвижности техники при неисправных форсунках**

**Fig. 3. Example of a malfunction that resulted in a complete loss of mobility of the equipment due to faulty injectors**



**Рис. 4. Пример неисправности, приведшей к полной утрате подвижности техники при возгорании при разгерметизации топливной системы и замыкании диодов генератора**

**Fig. 4. Example of a malfunction that led to a complete loss of mobility of equipment during a fire due to a depressurization of the fuel system and a short circuit of the generator diodes**



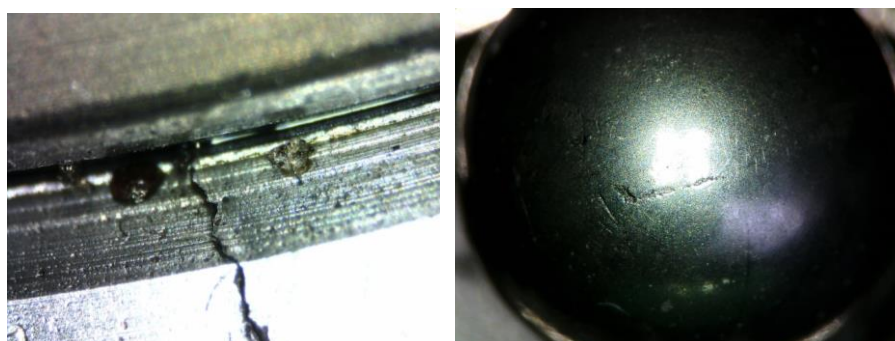
**Рис. 5. Пример неисправности, приведшей к полной утрате подвижности техники при разрушении гусеницы вследствие установки при ремонте зубчатого сектора с несоответствующим шагом**

**Fig. 5. Example of a malfunction that resulted in a complete loss of mobility due to the destruction of a track due to the installation of a toothed sector with an inappropriate pitch during repairs**



**Рис. 6. Пример неисправности, приведшей к полной утрате подвижности техники при разрушении гусеницы вследствие установки при ремонте зубчатого сектора с несоответствующим шагом**

**Fig. 6. Example of a malfunction that resulted in the complete loss of mobility of the equipment**



**Рис. 7. Пример неисправности подшипников, не приведшей к утрате подвижности техники**

**Fig. 7. An example of a bearing failure that did not result in the loss of mobility of the equipment**

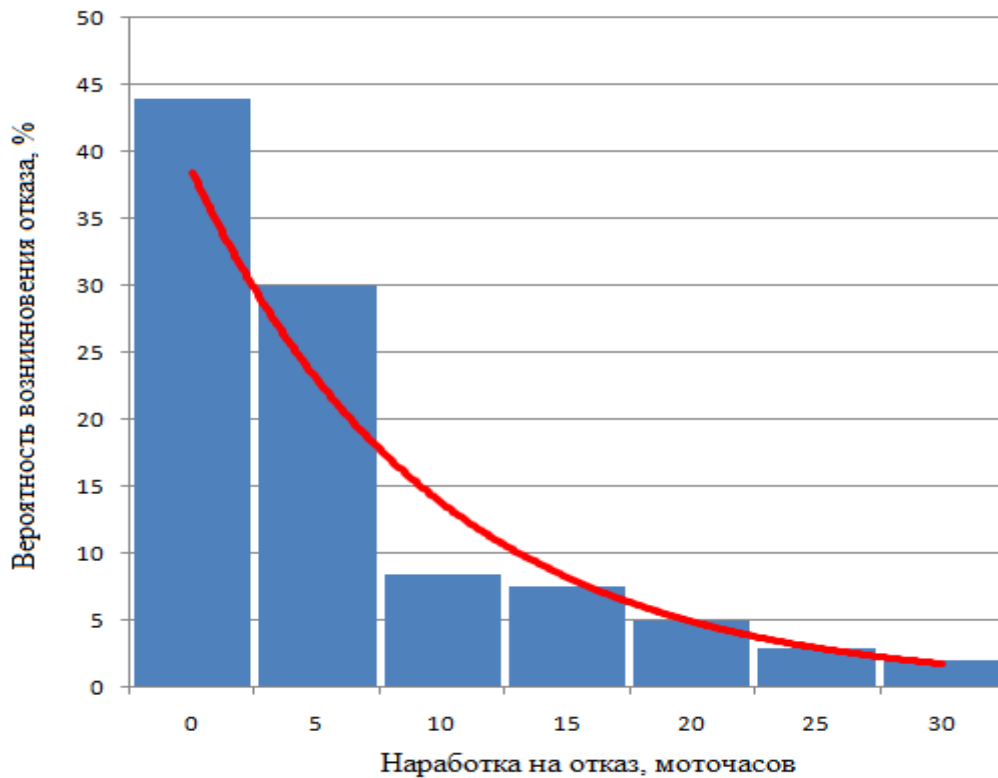


### Предлагаемое техническое решение

Полученные данные однозначно свидетельствуют о том, что подавляющее большинство неисправностей приходится на начало эксплуатации специальной техники после покупки, хранения или ремонта [14, 15]. При этом наиболее часто выходят из строя вновь установленные детали, имеющие производственные дефекты, а также детали, установленные от другой техники, не имеющей точного совпадения по основным характеристикам. Значительное количество возникающих неисправностей связано с нарушением технологии установки. На основании данных, представленных в табл. 1 был получен график возникновения неисправностей, приводящих к утрате подвижности техники в зависимости от времени наработки после ввода в эксплуатацию, снятия с хранения или после ремонта. Общий вид данного графика приведен на рис. 8. Регрессионная зависимость, связывающая вероятность возникновения отказа от времени наработки, будет иметь вид:

$$\Omega = 64,35e^{-0,51T},$$

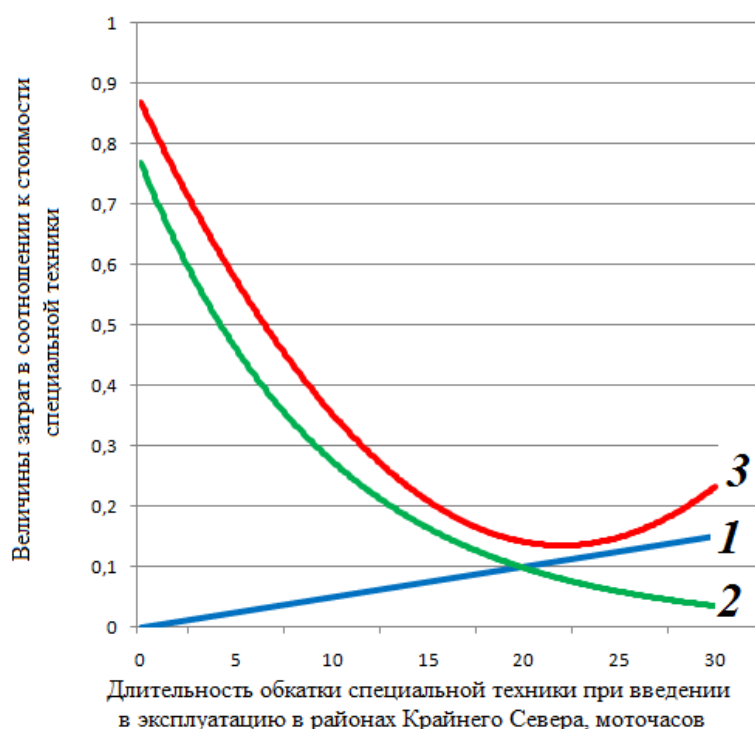
где  $\Omega$  – вероятность возникновения отказа, а  $T$  – время наработки.



**Рис. 8. Уменьшение вероятности возникновения отказа, приведшего к полной утрате подвижности специальной техники, работающей в условиях Крайнего Севера, от времени наработки**

**Fig. 8. Reducing the probability of failure resulting in complete loss of mobility of special equipment operating in the Far North, depending on the operating time**

Считая, что средняя наработка специальной техники составляет около 1000 моточасов в год, а общий ресурс – 10 лет получим, что один моточас использования техники эквивалентен 0,01 % стоимости машины [16]. При этом из-за технических проблем утрачивается не более 2 % единиц техники в год (10 % техники с учетом ошибок в выборе траектории движения). Поэтому экономически обоснованный объем обкатки техники, вводимой в эксплуатацию может быть получен из графика, приведенного на рис. 9.



**Рис. 9. Изменение себестоимости обкатки специальной техники и затрат на приобретение новой техники от времени наработки**

**Fig. 9. Change in the cost of running-in special equipment and the cost of purchasing new equipment depending on the operating time**

Полученные данные однозначно свидетельствуют, что в условиях Крайнего Севера перед вводом специальной техники в эксплуатацию экономически целесообразно проводить обкатку длительностью 20-25 моточасов. Следует отметить, что, исходя из результатов исследования после обкатки рациональной длительности (табл. 1), существует возможность наличия таких среднеопасных неисправностей, как использование некачественного трансмиссионного масла (в том числе при попадании в него забортной воды), а также попадание инородных предметов в агрегаты трансмиссии (в том числе, фрагментов разрушения и выкрашивания зубьев). При этом, если качество заливаемого трансмиссионного масла можно обеспечить путем проведения лабораторных исследований до его закупки, количество залитого масла и наличие в нем эмульсии, свидетельствующее о попадании забортной воды, проверяется при ежедневном техническом обслуживании, то определение повреждения зубьев в агрегатах трансмиссии возможно только при проведении вибродиагностики [17, 18].

Известно, что на начальной стадии выкрашивания дефект зубчатой передачи практически не влияет на изменение вибрационных параметров зубчатой передачи. Так же такие повреждения и не представляют опасности для потери подвижности специальной техники, работающей в условиях Крайнего Севера. При увеличении объема выкрашивания зубьев увеличиваются размеры фрагментов, которые при попадании в зону зубчатого зацепления приводят к разрушению корпуса агрегата трансмиссии с потерей подвижности. поэтому появление местных увеличений амплитуд вибрации, свыше 20-35 % их общего уровня в диапазонах частот от 0 до 3 кГц можно считать диагностическим признаком наличия выкрашивания зубьев. В связи с этим можно сделать заключение о том, что выявление вибросигнала дефектной пары шестерен вблизи ее собственной частоты является информативным признаком присутствия трещин сколов и поломок.



**Рис. 10. Начальная и конечная стадии выкрашивания зубьев шестерен**

**Fig. 10. Initial and final stages of gear tooth chipping**

### **Выводы**

Проведена классификация неисправностей специальной техники, работающей на Крайнем Севере, по критерию степени опасности утраты машины при выполнении операций в отрыве от базовой станции. Все неисправности были отнесены к трем группам: неопасные, средней опасности и опасные. К неопасным неисправностям приравнены те, от возникновения которых до потери подвижности проходит более 20 моточасов работы, так как в этом случае возникшая неисправность позволяет пройти заданный маршрут без потери техники. Также не представляют опасности неисправности, проявляющиеся в момент возникновения (с пробегом от момента возникновения до потери подвижности равным 0 моточасов), поскольку такая техника не сможет выйти на маршрут. Среднюю опасность представляют неисправности, между возникновением которых и потерей подвижности проходит от 10 до 20 моточасов, так как времени развития таких неисправностей обычно хватает для завершения маршрута. Наибольшую же опасность представляют неисправности, время между возникновением которых и потерей подвижности проходит при пробеге отличном от 0 до 20 моточасов. Возникновение такой неисправности возможно в любой момент времени нахождения машины на маршруте.

Получены зависимости возникновения неисправностей, приводящих к утрате подвижности техники в зависимости от времени наработки после ввода в эксплуатацию, снятия с хранения или после ремонта. Установлено, что 95 % таких неисправностей в условиях Крайнего Севера проявляется в первые 20 моточасов работы. На основании полученных результатов предложено производить в период данного времени обкатку вводимых в эксплуатацию машин после ремонта или стоянки, без удаления от ремонтной базы. Возникновение оставшихся 5 % неисправностей следует предупреждать не только контролем уровня масла, но и проверкой его состава органолептическим методом для определения наличия в нем воды, а также вибродиагностическим контролем увеличения амплитуд вибрации, свыше 20-35 % их общего уровня в диапазонах частот от 0 до 3 кГц, что является диагностическим признаком наличия выкрашивания зубьев.

### **Библиографический список**

1. **Коробейников, А.Ф.** Прогнозирование и поиски месторождений полезных ископаемых: учебник для вузов / А.Ф. Коробейников. – Томск: Томский политехнический университет, 2012. – 255 с.
2. Месторождения полезных ископаемых: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Горное дело» по специальностям «Подземная разработка полезных ископаемых», «Обогащение полезных ископаемых» / В.А. Ермолов [и др.]. – М.: Горная книга, 2007. – 570 с.
3. Национальный атлас России: в 4-х томах / А.Д. Думнов, А.А. Кирсанов, Е.А. Киселева [и др.]. Том 2. – Москва: ПКО «Картография», 2007. – 496 с.

4. Исследование взаимодействия двигателей различных конструкций для экологически чистых вездеходных транспортных средств, предназначенных для эксплуатации на слабонесущих грунтах: Отчет о НИР / ФГУП НИЦИАМТ: Руководитель В.И. Котляренко; Арх. № А 9205. Дмитров, 2007. 55 с.
5. **Агейкин, Я.С.** Пройодимость автомобиля / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 231 с.
6. **Usenyuk, S.** Proximal design: Users as designers of mobility in the Russian North / S. Usenyuk, S. Huysalo, J. Whalen // Technology and Culture. 2016. Vol. 57, № 4. P. 866-908.
7. **Бардышев, О.А.** К вопросу об организации эксплуатации строительной техники в условиях Севера / О.А. Бардышев, В.А. Попов // Строительные и дорожные машины. 2021. № 10. С. 6-11.
8. **Андросов, П.В.** Специфика эксплуатации в условиях Крайнего Севера технологических машин и оборудования // Теория и практика современной науки. 2022. № 8(86). С. 28-36.
9. **Егорова, Т.П.** Взаимовлияние качества жизни и транспортной подвижности населения в северных регионах России / Т.П. Егорова, Э.И. Пантилов // Заметки ученого. 2022. № 11. С. 101-106.
10. РД 50-672-88 Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Классификация видов изломов металлов. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. – 19 с.
11. Повреждения подшипников качения и их причины – СПб.: SKF АВ, 2002. – 47с.
12. Повреждение поршней. Как выявить и устранить их. – GmbH: MS Motor Service International 2010. – 92с.
13. **Васин, О.В.** Атлас дефектов. Научно-технический сборник / О.Е. Васин, В.М. Югай, Р.А. Садридинов и др. – Екатеринбург, 2008. – 56 с.
14. Влияние наработки на технико-экономические показатели строительных и дорожных машин / А.Н. Максименко, Д.Ю. Макацария, В.В. Кутузов [и др.] // Грузовик. 2007. № 2. С. 32-36.
15. **Бояршинов, А.Л.** Прогнозирование надежности двигателя ЯМЗ-240н при эксплуатации в северных условиях: специальность 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»: автореферат дисс. ... канд. техн. наук / Бояршинов Анатолий Леонидович. – Якутск, 2000. – 18 с.
16. **Максименко, А.Н.** Эксплуатация строительных и дорожных машин: учеб. пособие для студентов вузов / А.Н. Максименко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 391 с.
17. **Скворцов, А.А.** Разработка методики виброакустической оценки дефектов ведущих мостов легковых автомобилей для бортовой системы диагностирования агрегатов трансмиссии: специальность 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины»: автореферат дисс. ... канд. техн. наук / Скворцов Антон Алексеевич. – Ижевск, 2015. – 22 с. – EDN ZPTBRH.
18. **Лелиовский, К.Я.** Разработка методики виброакустической оценки нагруженности и дефектов коробок передач колесных машин: специальность 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины»: автореферат дисс. ... канд. техн. наук / Лелиовский Константин Ярославич. – Нижний Новгород, 2008. – 19 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 04.03.2024*

*Дата принятия  
к публикации: 05.07.2024*

УДК 629.33

EDN: KFNXSP

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ ПОЛУПРИЦЕПА НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПУТЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

**П.С. Рубанов**

ORCID: 0009-0000-2055-2046 e-mail: rubanov\_ps@bk.ru

Инновационный центр «КАМАЗ»

Москва, Россия

**Р.Б. Гончаров**

ORCID: 0000-0003-4805-967X e-mail: goncharov.roman@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Москва, Россия

**А.О. Поляков**

ORCID: 0009-0000-7892-2767 e-mail: artemdrezna@mail.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Москва, Россия

**И.О. Хренов**

ORCID: 0009-0007-1949-9285 e-mail: hrenoviol@rubuses.ru

Инжиниринговый центр ЛиАЗ, территориально обособленное подразделение Москва

Москва, Россия

Использование полуприцепа с минимальной снаряженной массой для осуществления грузоперевозок в составе автопоезда позволяет повысить эксплуатационные свойства автомобиля-тягача, снизив общие затраты на изготовление и увеличив массу перевозимых грузов. Снаряженная масса полуприцепа в значительной степени зависит от конструкции его основных элементов, что делает актуальным выбор рациональных параметров несущей системы на стадии проектирования с учетом прочностных и жесткостных свойств. Представлено решение поставленной задачи при помощи метода конечных элементов. Для снижения массы несущей системы полуприцепа применялась параметрическая оптимизация методом градиентного спуска. Расчеты проводились в программном комплексе *Siemens NX*. Выявлены наиболее нагруженные места в несущей системе полуприцепа для различных вариантов конструкции, проведена параметрическая оптимизация элементов конструкции для снижения массы за счет варьирования геометрических параметров при условии сохранения свойств прочности и жесткости. После проведенной параметрической оптимизации масса полученной конструкции снизилась. Полученные результаты могут быть использованы для создания реальной конструкции полуприцепа.

**Ключевые слова:** несущая система, полуприцеп, расчет на прочность, МКЭ, параметрическая оптимизация, метод градиентного спуска.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Рубанов, П.С. Совершенствование конструкции несущей системы полуприцепа на стадии проектирования путем параметрической оптимизации / П.С. Рубанов, Р.Б. Гончаров, А.О. Поляков, И.О. Хренов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 108-119. EDN: KFNXSP

## PARAMETRIC OPTIMIZATION FOR IMPROVING DESIGN OF SEMI-TRAILER LOAD-BEARING SYSTEM AT DESIGN STAGE

**P.S. Rubanov**

ORCID: 0009-0000-2055-2046 e-mail: rubanov\_ps@bk.ru

KAMAZ Innovation Center LLC

Moscow, Russia

**R.B. Goncharov**

ORCID: **0000-0003-4805-967X** e-mail: **goncharov.roman@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University

*Moscow, Russia*

**A.O. Polyakov**

ORCID: **0009-0000-7892-2767** e-mail: **artemdrezna@mail.ru**

Bauman Moscow State Technical University

*Moscow, Russia*

**I.O. Khrenov**

ORCID: **0009-0007-1949-9285** e-mail: **hrenoviol@rubuses.ru**

LiAZ Engineering Center is a geographically separate division in Moscow

*Moscow, Russia*

**Abstract.** The use of a semi-trailer with a minimum curb weight for cargo transportation as part of a road train makes it possible to increase the operational properties of a tractor vehicle, reduce overall manufacturing costs and increase the weight of transported goods. The curb weight of the semi-trailer largely depends on the design of its main elements, therefore, the choice of rational parameters of the load-bearing system at the design stage, taking into account strength and stiffness properties, is an urgent task. The article presents a solution to the problem using the finite element method. Parametric optimization by gradient descent was used to reduce the weight of the semi-trailer load-bearing system. The calculations were carried out in the Siemens NX software. The most loaded places in the semi-trailer load-bearing system for various design options were identified, after which parametric optimization of structural elements was carried out to reduce weight by varying geometric parameters, provided that the properties of strength and rigidity were preserved. After parametric optimization, the mass of the resulting structure was reduced. The results obtained can be used to create a real semi-trailer design.

**Key words:** load-bearing system, semi-trailer, strength calculation, FEM, parametric optimization, gradient descent.

**FOR CITATION:** P.S. Rubanov, R.B. Goncharov, A.O. Polyakov, I.O. Khrenov. Parametric optimization for improving design of semi-trailer load-bearing system at design stage. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 108-119. EDN: KFNXSP

## Введение

В настоящее время рациональное распределение материала в проектируемых конструкциях с целью уменьшения массы при сохранении параметров прочности и жесткости является актуальной задачей [1-2]. Существует несколько путей снижения массы, которые могут быть применены при создании конструкций:

1) использование более легких материалов, таких как алюминиевые сплавы, титан, магний или композитные материалы с высокой прочностью, которые позволяют существенно снизить массу конструкции;

2) использование алгоритмов оптимизации для получения рациональных конструкций с учетом прочности, жесткости и массы.

Существует множество видов оптимизации, применимых при проектировании различных конструкций, среди которых можно выделить: топологическую оптимизацию [3-4] и параметрическую оптимизацию [5-6]. Топологическая оптимизация основана на изменении геометрии конструкции путем удаления лишнего материала и уменьшения массы при сохранении необходимых прочностных характеристик. Процедура параметрической оптимизации построена на изменении геометрических параметров конструкции для снижения массы и сохранения требуемой прочности. Преимуществами использования оптимизации при проектировании являются сокращение материалозатрат при производстве и снижение времени, затрачиваемого на разработку и проектирование новых изделий. Алгоритм параметрической

оптимизации выполняет серию итераций, корректируя переменные в рамках заданных ограничений, до достижения параметров конструкции, которые соответствуют цели оптимизации с учетом наложенных ограничений. В процессе оптимизации меняются геометрические параметры основной модели, идеализированной геометрии или конечно-элементной модели путем корректировки переменных, указанных в настройках программы. Существует множество оптимизационных алгоритмов [7], в приложении для прочностных расчетов программного комплекса NX для оптимизации используется метод градиентного спуска.

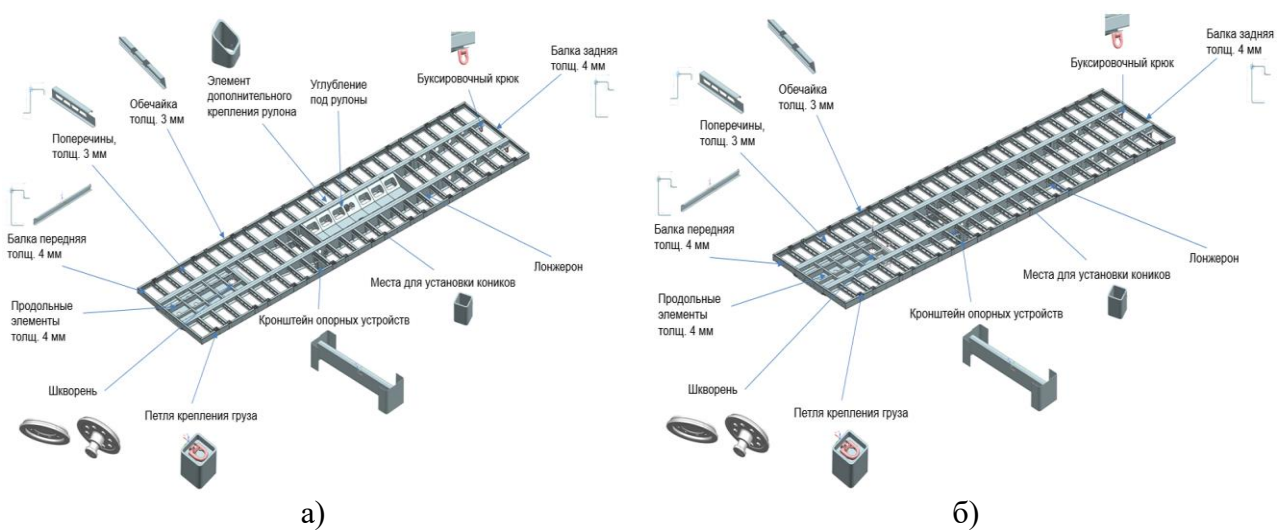
В данной работе рассматривается применение параметрической оптимизации для снижения массы несущей системы полуприцепа, использующегося в составе автопоезда, совместно с автомобилем ГАЗель. В ходе работы были рассмотрены различные типы конструкций полуприцепов [8], для которых получены напряженно-деформированные состояния (НДС) несущей системы для нескольких нагрузочных режимов, после чего проведена параметрическая оптимизация элементов конструкции для снижения массы.

### Варианты конструкций несущей системы полуприцепа

В работе рассматриваются два типа конструкций несущих систем полуприцепа (рис. 1):

- 1) рама с высотой лонжерона в средней части 300 мм (с углублением под рулоны листового металла);
- 2) рама с высотой лонжерона в средней части 250 мм (без углубления под рулоны листового металла).

Для всех рассматриваемых вариантов конструкции толщина верхней полки лонжерона – 6 мм, нижней полки лонжерона – 6 мм, ребер и накладок – 4 мм (рис. 2).



**Рис. 1. Типы конструкций несущей системы полуприцепа:**  
*а) первый вариант конструкции; б) второй вариант конструкции*

**Fig. 1. Types of semi-trailer load-bearing system designs:**  
*a) first design; б) second design*

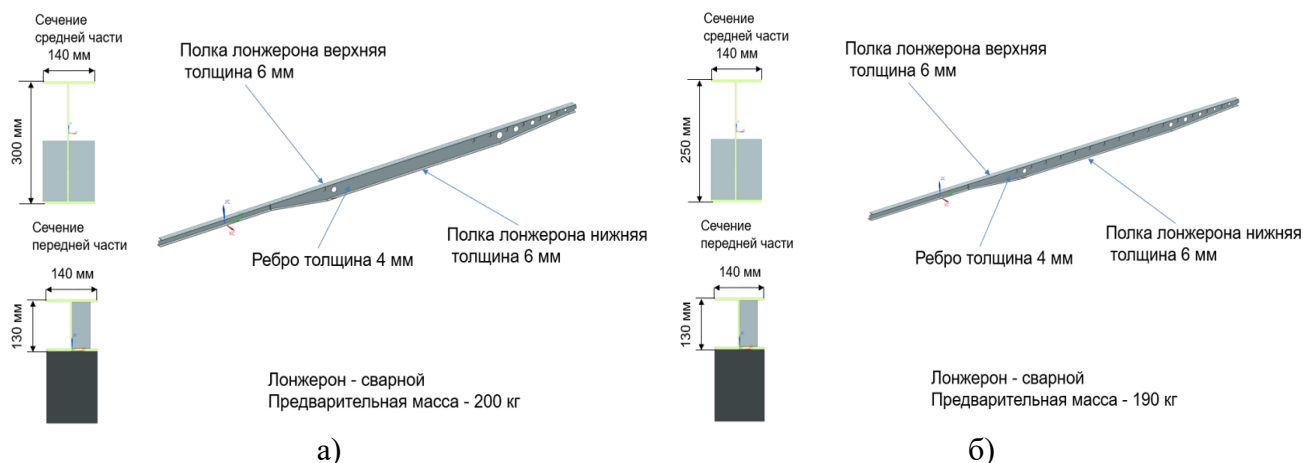
### Анализ напряженно-деформированного состояния несущей системы полуприцепа

Для проведения анализа НДС несущей системы полуприцепа были рассмотрены следующие нагрузочные режимы [9-1414]:

- статический режим нагружения;
- тяговый режим нагружения на ровной опорной поверхности;



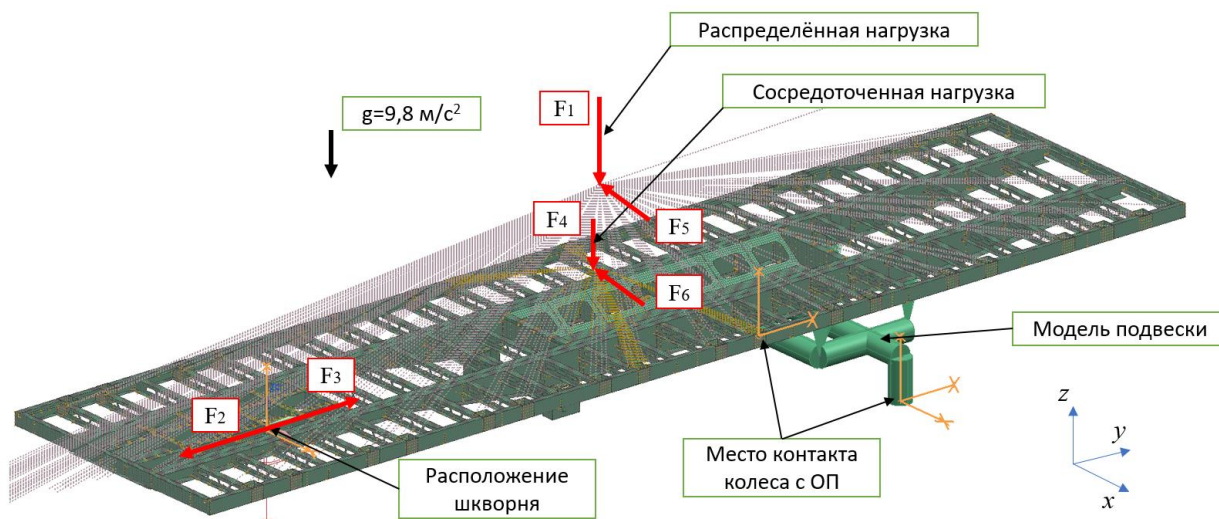
- движение задним ходом на ровной опорной поверхности;
- разворот на месте.



**Рис. 2. Конструктивные элементы несущей системы полуприцепа:**  
 а) геометрические параметры элементов первого варианта конструкции;  
 б) геометрические параметры элементов второго варианта конструкции

**Fig. 2. Structural elements of the semi-trailer load-bearing system:**  
 а) geometric parameters of the elements of the first design;  
 б) geometric parameters of the elements of the second design

Для первого типа конструкции дополнительно проводился расчет с закрепленными на несущей системе полуприцепа рулонами листового металла. Для всех нагрузочных режимов в местах контакта колес с опорной поверхностью и в месте крепления шкворня, осуществляющего соединение с транспортным средством (ТС), ограничены перемещения. Для левого колеса ограничены перемещения по всем трем осям системы координат, для правого колеса ограничено перемещение по осям  $Oy$  и  $Oz$  и в месте соединения с ТС ограничено перемещение по осям  $Ox$  и  $Oz$ . Расчетная схема показана на рис. 3.



**Рис. 3. Расчетная схема несущей системы полуприцепа**  
**Fig. 3. Calculation scheme of the semi-trailer load-bearing system**



Нагрузки, действующие на раму полуприцепа, для различных режимов нагружения представлены в табл. 1.

**Таблица 1.**  
**Силы в расчетной модели**

**Table 1.**  
**Forces in the calculation model**

Нагрузка	Значение, Н
Сила тяжести от перевозимого груза (распределенная нагрузка), $F_1$	58860
Тяговое усилие, $F_2$	47088
Толкающие усилие при движении задним ходом, $F_3$	47088
Сила тяжести от рулонов листового металла (сосредоточенная нагрузка), $F_4$	58860
Сила инерции груза, $F_5$	11580
Сила инерции от рулонов листового металла, $F_6$	11580

Допущения, принятые при расчете:

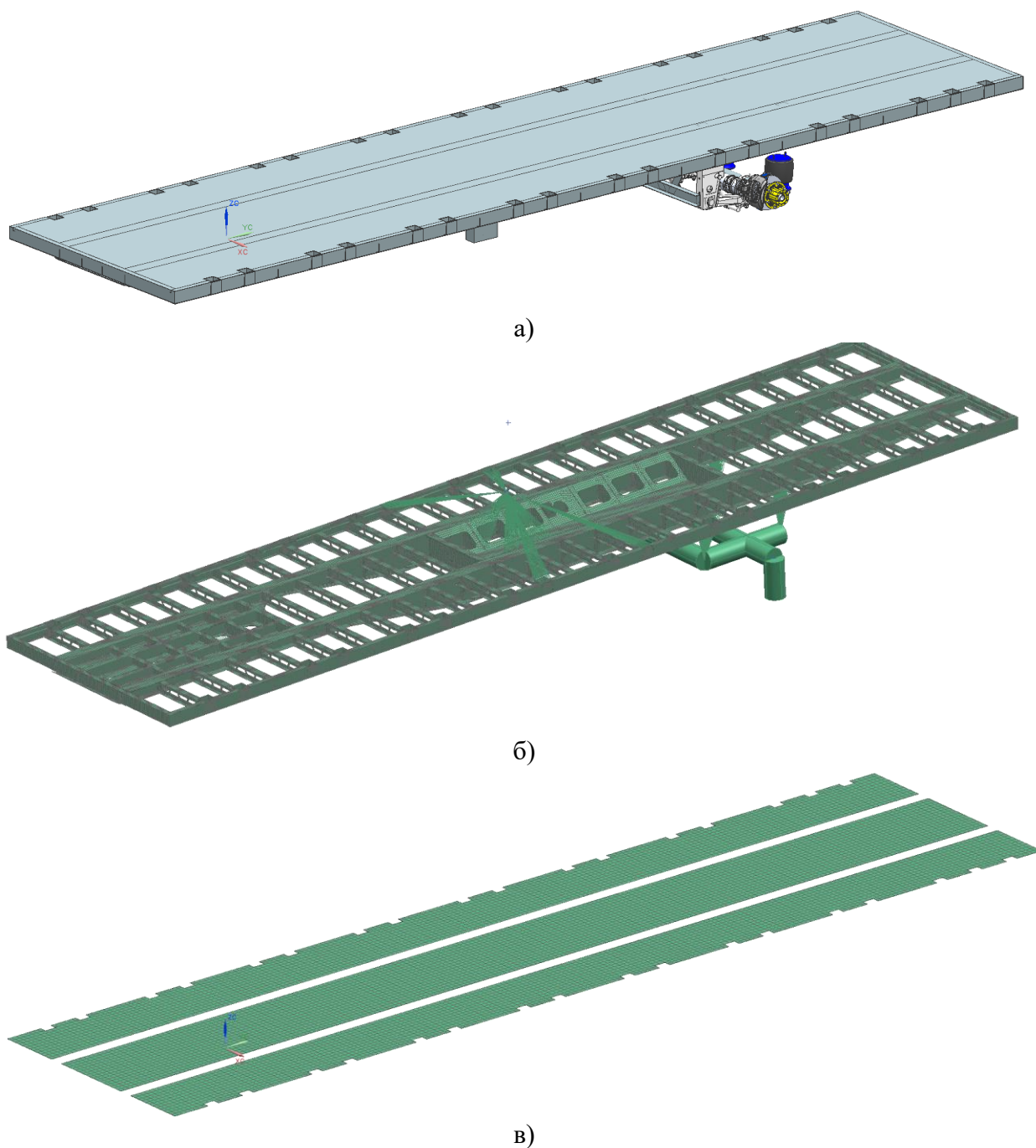
- сварочные швы в конечно-элементной модели (КЭМ) не учитываются, детали жестко соединены между друг другом;
- упругие и демпфирующие свойства системы поддрессоривания в конечно-элементной модели не учитываются;
- податливость кронштейнов крепления подвески не учитывается, соединение осуществляется при помощи RBE2 элементов;
- свойства шин не учитываются, в месте контакта колес с опорной поверхностью задается жесткое закрепление.

На рис. 4 показана исходная модель несущей системы полуприцепа и полученная конечно-элементная (КЭ) модель, состоящая из элементов типа *Quad4*. КЭМ несущей системы состоит из 102730 элементов и 114047 узлов. Элементы конструкции несущей системы изготовлены из стали 10ХСНД и фанеры, укладываемой сверху. Характеристики материалов приведены в табл. 2.

**Таблица 2.**  
**Характеристики материалов элементов конструкции несущей системы полуприцепа**

**Table 2.**  
**Characteristics of materials of structural elements of the semi-trailer load-bearing system**

Материал	Модуль упругости $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона	Предел текучести $\sigma_t$ , МПа	Предел прочности, $\sigma_b$ , МПа
Сталь 10ХСНД ГОСТ 19282–73	200000	0,3	390	470
Фанера ламинированная ГОСТ 3916.1–2018	7000	0,06	—	25



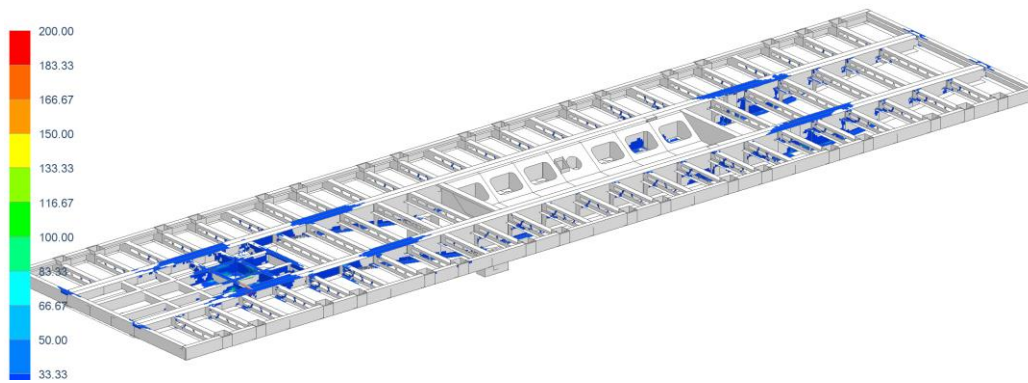
**Рис. 4. КЭ модель несущей системы полуприцепа:**

*а) модель несущей системы полуприцепа;  
б) КЭМ несущей системы полуприцепа (листы фанеры не показаны); в) КЭМ листов фанеры*

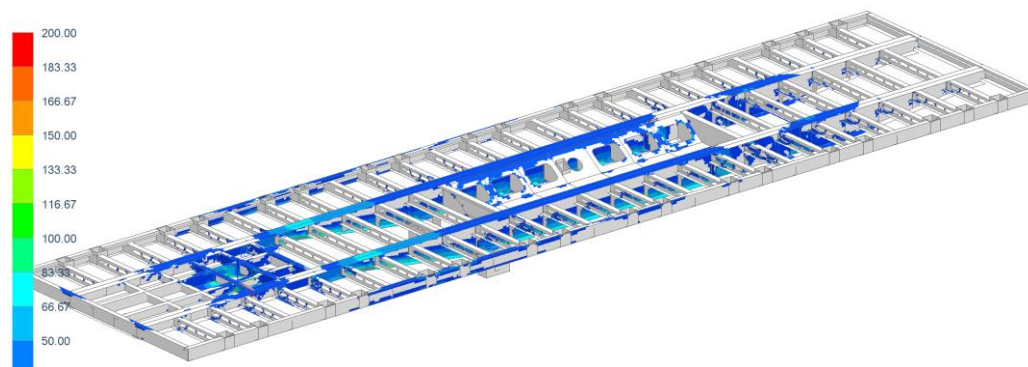
**Fig. 4. Finite element model (FEM) of the semi-trailer load-bearing system:**

*a) model of the semi-trailer load-bearing system;  
б) FEM of the semi-trailer load-bearing system (plywood sheets not shown); в) FEM of plywood sheets*

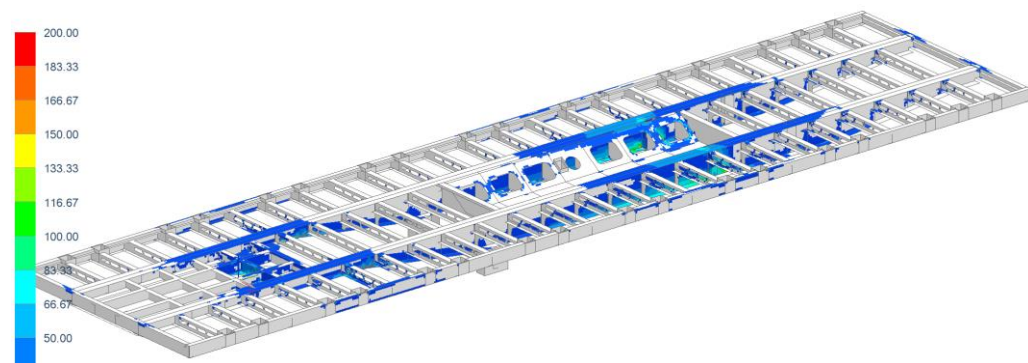
На рис. 5 показан пример полученного НДС несущей системы. Результаты расчета представлены в табл. 3.



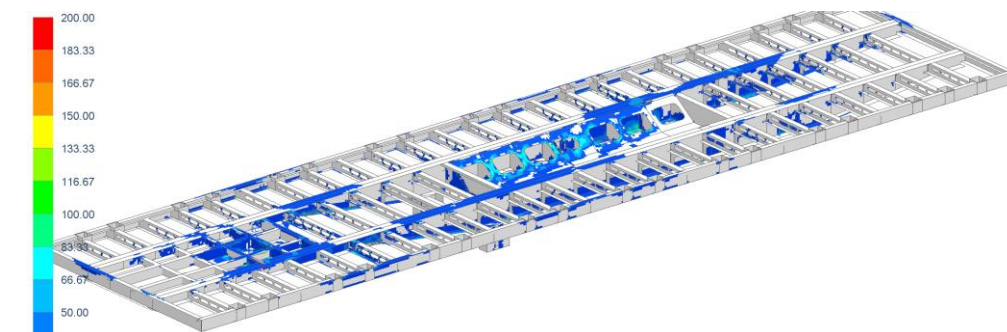
а)



б)



в)



г)

**Рис. 5. Результаты расчета:**

а) статический режим нагружения; б) тяговый режим;  
в) движение задним ходом; г) разворот на месте

**Fig. 5. Calculation results:**

а) static loading mode; б) traction mode; в) driving in reverse; г) turn on the spot г) разворот на месте

Таблица 3.  
Результаты расчета НДС несущей системы полуприцепа

Table 3.  
Calculation results of stress-strain states of the semi-trailer load-bearing system

Рассматриваемый тип конструкции	Режим нагружения	Максимальные напряжения, МПа	Коэффициент запаса
1	Статический	60	6,5
	Тяговый	265	1,5
	Движение задним ходом	203	1,9
	Разворот на месте	190	2
1 (с закрепленными рулонами листового металла)	Статический	191	2
	Тяговый	300	1,3
	Движение задним ходом	195	2
	Разворот на месте	205	1,9
2	Статический	90	4,3
	Тяговый	203	1,9
	Движение задним ходом	228	1,7
	Разворот на месте	181	2,2

Анализ результатов расчета показал, что наибольшие эквивалентные напряжения в конструкции несущей системы возникают в тяговом режиме нагружения для первого варианта конструкции с закрепленными рулонами листового металла (коэффициент запаса составляет 1,3). Для второго варианта конструкции самым тяжелым режимом нагружения является движение задним ходом по ровной опорной поверхности (коэффициент запаса равен 1,7). Для остальных нагрузочных режимов коэффициенты запаса составляют 1,9 и более, следовательно, масса рассматриваемых вариантов несущих систем полуприцепов может быть уменьшена путем применения параметрической оптимизации с учетом сохранения прочности и жесткости.

### Параметрическая оптимизация элементов конструкции несущей системы полуприцепа

С целью совершенствования конструкции несущей системы были добавлены накладки в виде стальных пластин в местах изменения жесткости рамы полуприцепа. Места расположения накладок показаны на рис. 6. Для проведения параметрической оптимизации выбраны следующие варьируемые параметры (толщины):

- диапазон изменения толщины для верхней и нижней полок лонжерона равен от 3 до 12 мм;
- диапазон изменения толщины ребра равен от 2 до 8 мм.

Для первого варианта конструкции несущей системы диапазон варьирования значений толщин накладок составляет от 2 до 8 мм, для второго варианта от 3 до 12 мм. Целевой функцией задачи оптимизации является минимизация массы. Накладываемые ограничения: максимальное эквивалентное напряжение, возникающее в конструкции, не должно превы-

шать 250 МПа, что соответствует коэффициенту запаса 1,56. Оптимизация проводилась в программном комплексе *Siemens NX*.

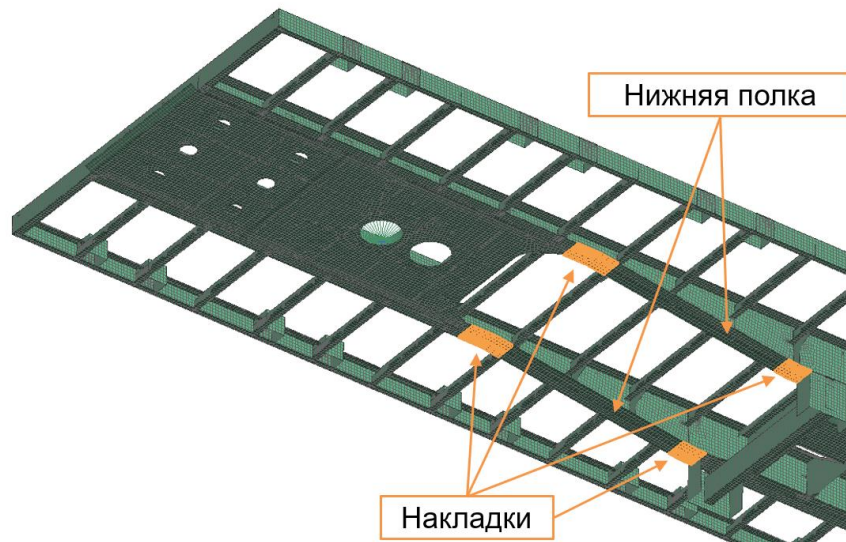


Рис. 6. Места расположения накладок

Fig. 6. Locations of patch

В результате проведенной оптимизации было выявлено, что толщину верхней полки лонжерона и ребра для первого и второго вариантов конструкций можно уменьшить до 3 мм, толщину нижней полки не менять, а толщину накладок увеличить до 6 мм. Результаты сравнения масс исходных и оптимизированных конструкций показаны в табл. 4.

Таблица 4.

Результаты параметрической оптимизации

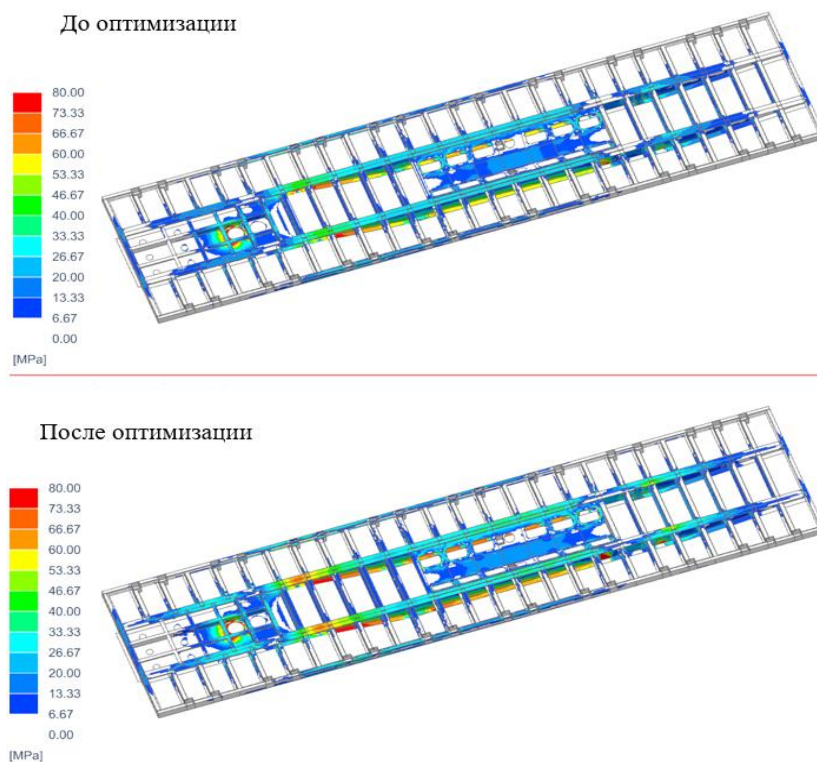
Table 4.

Results of parametric optimization

Вариант конструкции	Исходная масса несущей системы, кг	Оптимизированная масса несущей системы, кг	Исходная масса лонжерона, кг	Оптимизированная масса лонжерона, кг
1	1132	1050 (уменьшена на 7,2 %)	200	164
2	1033	960 (уменьшена на 7 %)	190	150

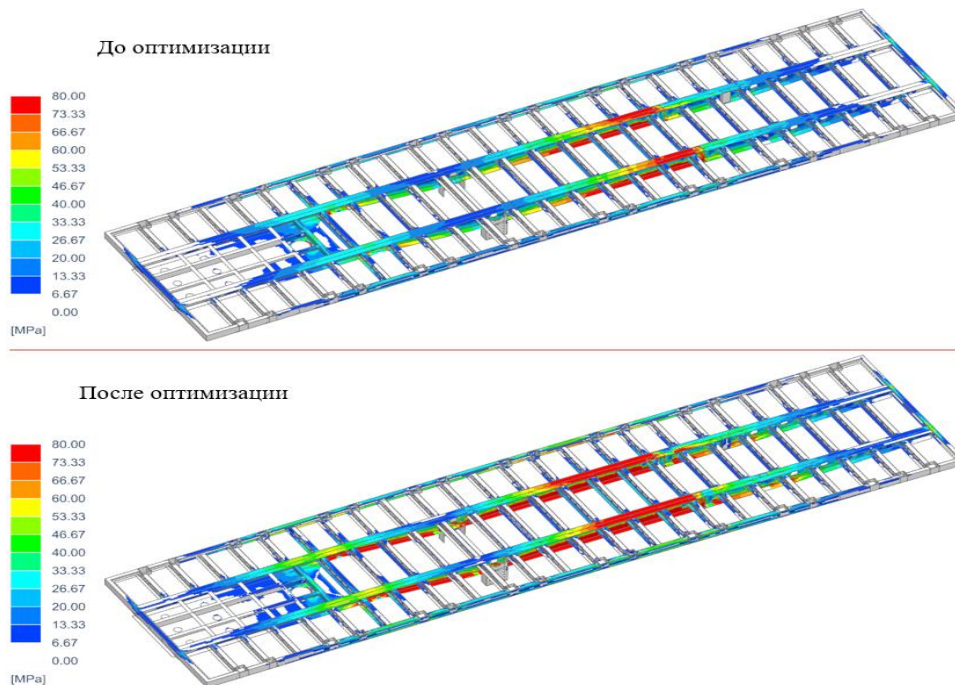
Для первого и второго вариантов оптимизированной конструкции наблюдается более равномерное распределение напряжений. В первом варианте конструкции изменение НДС в наиболее опасных местах не превышает 20 МПа, перемещений не более 2,5 мм. Во втором варианте конструкции увеличение эквивалентных напряжений в самых нагруженных элементах не превосходит 60 МПа, а перемещений – 13 мм. На рис. 7 и 8 показано сравнение результатов расчета до и после оптимизации для наиболее тяжелых режимов нагружения.





**Рис. 7. Сравнение результатов расчета до и после оптимизации для первого варианта конструкции**

**Fig. 7. Comparison of calculation results before and after optimization for the first design**



**Рис. 8. Сравнение результатов расчета до и после оптимизации для второго варианта конструкции**

**Fig. 8. Comparison of calculation results before and after optimization for the second design**

## Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Самый тяжелый нагрузочный режим для первого варианта конструкции – тяговый с сосредоточенной нагрузкой (рулон листового металла), для второго варианта – тяговый и движение задним ходом.

2. В обоих вариантах конструкции необходимо усилить накладками места переменного сечения лонжеронов.

3. Результаты параметрической оптимизации для первого и второго вариантов конструкций показывают, что толщины элементов можно уменьшить, тем самым снизить массу несущей системы полуприцепа на 7,2 и 7 % соответственно.

4. Изменение НДС в оптимизированных конструкциях незначительно по сравнению с базовыми вариантами. Максимальные эквивалентные напряжения не превышают 250 МПа.

Несущая система полуприцепа, полученная с использованием оптимизационных алгоритмов, соответствует установленным требованиям по прочности и жесткости. Для максимального уменьшения массы необходимо отказаться от углубления под перевозку рулонов листового металла, что позволит снизить массу несущей системы полуприцепа, в сравнении с первым вариантом конструкции, при сохранении требуемых показателей прочности и жесткости. Снижение массы спроектированной несущей системы полуприцепа позволяет уменьшить материалозатраты на изготовление, что повышает грузоподъемность, экономическую эффективность, а также улучшает эксплуатационные свойства автомобиля-тягача.

## Библиографический список

1. **Крыжевич, Г.Б.** Комплексный подход к топологической и параметрической оптимизации судовых конструкций / Г.Б. Крыжевич, А.Р. Филатов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № 1(391). С. 95-108.
2. **Дьяконова, В.А.** Анализ возможности применения топологической оптимизации при проектировании / В.А. Дьяконова, Н.В. Осипова, А.С. Токарев // Наука ГТИ НИЯУ МИФИ-2023: Сборник научных трудов. – Трехгорный: Трехгорный технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2023. – С. 23-30.
3. **Вдовин, Д.С.** Метод топологической оптимизации в задачах проектирования безопасных кабин сельскохозяйственной и строительной техники // Известия МГТУ МАМИ. 2018. № 4(38). С. 21-29.
4. **Гончаров, Р.Б.** Топологическая оптимизация конструкции бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности / Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов // Известия МГТУ МАМИ. 2018. № 2(36). С. 2-9.
5. **Гончаров, Р.Б.** Проблемы поиска оптимальных конструктивных параметров бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности / Р. Б. Гончаров, В. Н. Зузов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2018. № 3(122). С. 130-136.
6. **Goncharov, R.** The study of parametric optimization algorithms on example of vehicle bumper crash-worthiness / R. Goncharov, V. Zuzov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Design Technologies for Wheeled and Tracked Vehicles, MMBC 2019, Moscow. Vol. 820. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. 012030.
7. **Василькин А.А., Зубков Г.В.** Параметрическая оптимизация конструкции навеса численными методами // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 9. С. 34-49.
8. **Слободюк, А.П.** Обоснование конструктивных параметров полуприцепа // Цифровые и инженерные технологии в АПК: Материалы Национальной научно-практической конференции 25 ноября 2021 года. – Майский: Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, 2022. – С. 106-111.
9. **Шермухамедов, А.А.** Методика расчет напряженно-деформированного состояния рамных конструкций автотракторных прицепов категории ОЗ при различных внешних воздействиях / А.А. Шермухамедов, А.А. Тогаев // МНИЖ. 2015. № 3-1 (34).

10. **Дащенко, А.Ф.** Анализ напряженно-деформированного состояния рамы автомобильного полуприцепа в программе ANSYS / А.Ф. Дащенко, Н.Г. Сурьянинов, Д.В. Лазарева // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2005. № 29. С. 160-161.
11. **Слободюк, А.П.** Обоснование конструктивных параметров полуприцепа // Цифровые и инженерные технологии в АПК: Материалы Национальной научно-практической конференции 25 ноября 2021 года. – Майский: Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, 2022. С. 106-111.
12. Проектирование полноприводных колесных машин. Том 3 / Б.А. Афанасьев, Б.Н. Белоусов, Л.Ф. Жеглов [и др.]. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 432 с.
13. **Вихров, А.В.** Несущие системы транспортных средств специального назначения: учебное пособие / А.В. Вихров. – Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2015. – 112 с.
14. **Гончаров, Р.Б.** Методика расчета нагрузок, действующих в направляющих элементах подвески автомобиля при преодолении препятствий / Р. Б. Гончаров, Д. М. Рябов // Известия МГТУ МАМИ. 2015. Т. 1. № 3(25). С. 129-135.

*Дата поступления  
в редакцию: 10.04.2024*

*Дата принятия  
к публикации: 07.07.2024*



УДК 629.113

EDN: QLSXPP

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КУЗОВА АВТОМОБИЛЯ ПО ТРЕБОВАНИЯМ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЛОБОВОМ СТОЛКНОВЕНИИ

**И.А. Филин**ORCID: 0009-0000-0201-3196 e-mail: [filin.ilya152@yandex.ru](mailto:filin.ilya152@yandex.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***Л.Н. Орлов**ORCID: 0000-0003-4852-1174 e-mail: [lev.n.orlov@mail.ru](mailto:lev.n.orlov@mail.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***В.Н. Наумов**ORCID: 0000-0001-5172-0364 e-mail: [vn.naumov1941@yandex.ru](mailto:vn.naumov1941@yandex.ru)Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
*Москва, Россия***В.Ф. Кулепов**ORCID: 0000-0002-8319-3973 e-mail: [kulepov@dpingtu.ru](mailto:kulepov@dpingtu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***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*

Усовершенствована конструкция автомобильного кузова с учетом современных требований пассивной безопасности. Основным методом исследований стали виртуальные расчеты с применением передовых программных продуктов, на примере разработки подробной модели автомобиля. Впервые проведено исследование на фронтальное столкновение с барьером при 40%-м перекрытии автомобиля, кузов которого выполнен по каркасно-панельной технологии. Даны рекомендации по разработке деформируемого барьера согласно Правилам № 94 в отношении фронтального удара. Результаты работы могут быть применены при проектировании кузовных конструкций автомобилей, соответствующих современным стандартам пассивной безопасности. На основе предварительных исследований выявлены уязвимые точки конструкции, обоснована необходимость расчетных исследований на ранних этапах проектирования. В результате составлен перечень предлагаемых изменений, направленных на улучшение силового каркаса с целью повышения несущей способности кузова в условиях действия разрушающих нагрузок. Данные изменения сыграли ключевую роль в достижении приемлемых показателей деформирования кузова и в повышении общей безопасности автомобиля. Полученные расчетные данные могут быть использованы при проектировании и доводке кузовов автомобилей с каркасно-панельной конструкцией.

**Ключевые слова:** кузов автомобиля, проектирование, несущая способность, деформирование, расчетная модель, оценка пассивной безопасности.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Филин, И.А. Совершенствование кузова автомобиля по требованиям пассивной безопасности при лобовом столкновении / И.А. Филин, Л.Н. Орлов, В.Н. Наумов, В.Ф. Кулепов, С.Е. Манянин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 120-127. EDN: QLSXPP

## CAR BODY IMPROVEMENT ACCORDING TO REQUIREMENTS OF PASSIVE SAFETY IN HEAD-ON COLLISION

**I.A. Filin**

ORCID: **0009-0000-0201-3196** e-mail: **filin.ilya152@yandex.ru**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**L.N. Orlov**

ORCID: **0000-0003-4852-1174** e-mail: **lev.n.orlov@mail.ru**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**V.N. Naumov**

ORCID: **0000-0001-5172-0364** e-mail: **vn.naumov1941@yandex.ru**

Bauman Moscow State Technical University

*Moscow, Russia*

**V.F. Kulepov**

ORCID: **0000-0002-8319-3973** e-mail: **kulepov@dpingtu.ru**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**S.E. Manyanin**

ORCID: **0009-0003-0245-0638** e-mail: **sergmanian@yandex.ru**

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The study focuses on optimizing the construction of a car body in line with modern passive safety requirements. Virtual simulations in cutting-edge software tools are used as the main research method, for example, a detailed model of a vehicle has been developed. The research novelty lies in the exploration of a frontal impact test against barrier with 40% overlapping for a car body constructed using frame-panel technology. Additionally, recommendations are provided for the development of a deformable barrier in accordance with Regulation No. 94 concerning frontal collision. The results of the study can be applied in the design of car body structures that meet modern passive safety standards. Preliminary investigations revealed vulnerable points in the construction, emphasizing the necessity for computational studies in the early stages of design. Consequently, a list of proposed modifications aimed at enhancing the structural framework to improve the load-bearing capacity of the body was compiled. These modifications played a pivotal role in achieving acceptable deformation metrics for the body, thereby enhancing the overall safety of the vehicle. The obtained computational data and research results can be used in the design and refinement of car bodies with frame-panel construction.

**Key words:** car body, car design, load-bearing capacity, deformability, design model, passive safety value.

**FOR CITATION:** I.A. Filin, L.N. Orlov, V.N. Naumov, V.F. Kulepov, S.E. Manyanin. Car body improvement according to requirements of passive safety in head-on collision. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 120-127. EDN: QLSXPP

### Введение

В связи с ростом числа дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и количества пострадавших все более жесткими становятся требования к пассивной безопасности (ПБ) автомобилей. Статистические данные по ДТП показывают, что наиболее частыми для легковых машин являются лобовые столкновения с препятствием; наиболее тяжелым считается косо-симметричное столкновение. Известно, что ПБ автомобиля в основном обеспечивается кон-

струкцией кузова. Поэтому его несущую способность действию разрушающих нагрузок необходимо прогнозировать на всех этапах проектирования и создания автомобиля до проведения натурных испытаний опытных образцов. При этом, безусловно, важное значение имеет компьютерное моделирование аварийных ситуаций при ДТП в соответствии с требованиями технического регламента.

### Описание исследований

В настоящей работе приведены результаты расчетной оценки безопасности каркасно-панельной конструкции кузова на примере разработки эскизного проекта автомобиля категории М1. Рассмотрен случай столкновения автомобиля с деформируемым неподвижным препятствием (барьером) и 40 %-м перекрытием передней части автомобиля, в соответствии с требованиями Правил ООН № 94 (рис. 1). Деформируемый барьер условно имитирует переднюю часть встречного автомобиля.

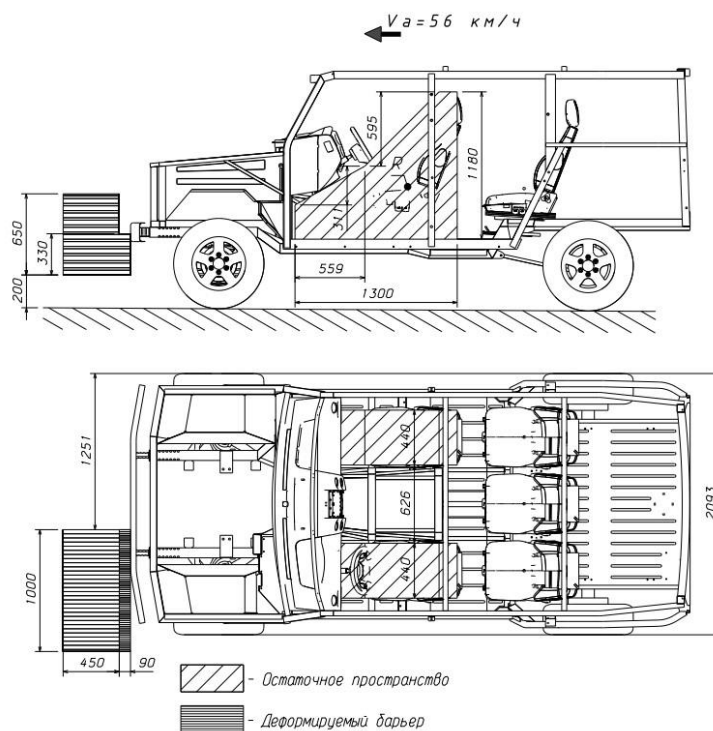


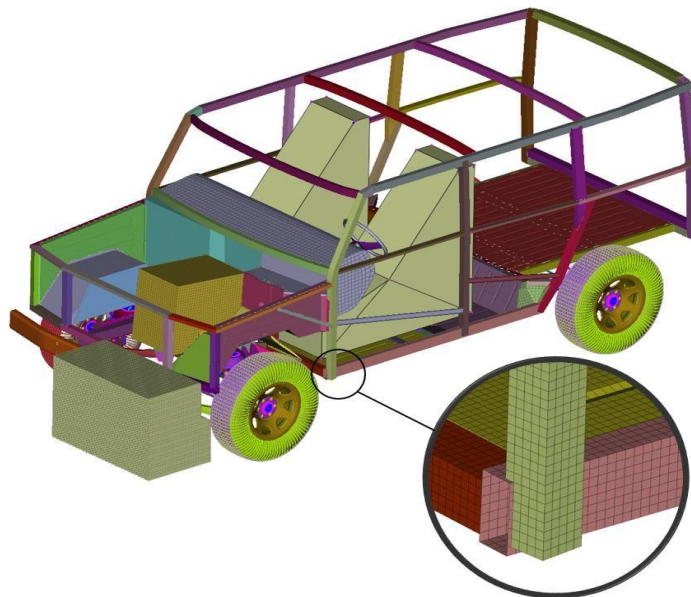
Рис. 1. Схемы столкновения модели с барьером (вид сбоку и сверху)

Fig. 1. Diagrams of the collision of the model with the barrier (side view and top view)

При испытаниях внутри салона должно оставаться остаточное жизненное пространство, необходимое для размещения манекена 50 %-го перцентиля (рис. 1). При столкновении автомобиля с препятствием его двери не должны самопроизвольно открываться или быть заблокированными. После ДТП должна обеспечиваться возможность эвакуации через них пассажиров и водителя. В процессе столкновения уровень перегрузок участников ДТП не должен превышать значения 80 g.

Для успешного проведения натурных испытаний опытного образца автомобиля необходимо уже при проектировании проводить оценку ПБ с применением расчетных методов. Это позволяет определять слабые места конструкции кузова на ранних этапах и дорабатывать ее в процессе создания автомобиля. Применение компьютерного моделирования условий аварийного нагружения и возникающего при этом деформирования несущих элементов конструкции автомобилей дает возможность на ранних этапах выбрать безопасную силовую

схему кузова и прогнозировать его безопасность на всех последующих этапах проектирования. Это также позволяет своевременно и оперативно оценивать влияние отдельных конструктивных элементов и вносимых изменений на обеспечение необходимой его несущей способности по разрушающим нагрузкам. Результаты таких исследований приведены ниже на примере разработанного автомобиля с каркасно-панельной конструкцией кузова. Расчетная конечно-элементная модель (КЭМ) рассматриваемого автомобиля показана на рис. 2.



**Рис. 2. Конечно-элементная модель автомобиля (вид без панелей боковин и крыши)**

**Fig. 2. The finite element model of the car (view without side panels and roof)**

Модель включает элементы конструкции, которые принимают на себя ударные нагрузки, возникающие при столкновении автомобиля с барьером, а также влияющие на характер деформирования кузова. Это, прежде всего, сам кузов с передним бампером, колеса и подвеска, объемная модель двигателя с коробкой передач, объемный контур остаточного пространства для водителя и рядом сидящего пассажира. КЭМ разработана с учетом особенностей силовых элементов кузова и отмеченных выше агрегатов. Модель кузова построена из пластинчатых элементов. Ее внутренние граничные условия воспроизводят условия соединения реальных элементов и частей конструкции. Каркас кузова состоит из тонкостенных труб с замкнутыми сечениями. Физические свойства кузова и других частей автомобиля воспроизведены их геометрией, толщинами стенок тонкостенных элементов и панелей, характеристиками материалов. Учтены сварные соединения, заданы контакты между элементами.

Колеса и передняя подвеска также играют важную роль в поглощении энергии удара при столкновении автомобиля с барьером. Деформируясь, они принимают на себя часть энергии удара и могут внедряться в салон, деформируя элементы его основания в области расположения ног водителя, что ведет к нарушению остаточного пространства. При моделировании столкновения автомобиля следует учитывать, как минимум, наличие двигателя в его передней части. Положение двигателя и коробки передач в процессе проектирования данного автомобиля было выбрано так, чтобы при фронтальном столкновении автомобиля с препятствием они уходили под его днище, не проникая в салон. В модели они представлены объемными твердыми телами, имеющими реальные массы, закрепленные на соответствующих элементах ее передней части. При проектировании автомобиля оценка его соответствия указанным выше требованиям проводилась по деформируемости кузова, сохранению остаточного пространства и перемещению рулевого колеса.

Разработанная КЭМ автомобиля представляет собой сложную структуру, включающую 317520 элементов, из которых 313470 – прямоугольные, 3486 – треугольные, 564 – элементы сварки. Все стальные элементы модели имеют модуль упругости  $E = 210000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0.3$ . Элементы барьера выполнены из алюминиевого сплава АД-31 с модулем упругости  $E = 71000$  МПа. Их остальные характеристики представлены в табл. 1, для примера на рис. 3 показана нелинейная характеристика стали 09Г2С, примененная в тонкостенных элементах каркаса кузова. Это дает наглядное представление о свойствах материалов, используемых в разработке и исследовании автомобильного кузова, расширяя базу данных для будущих исследовательских работ в области пассивной безопасности.

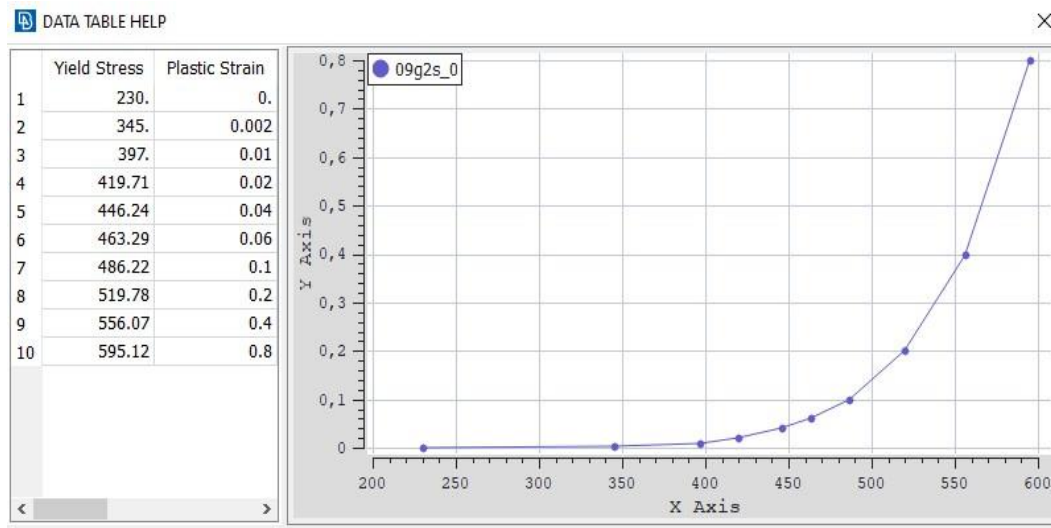


Рис. 3. Нелинейная характеристика стали 09Г2С, используемая в трубах каркаса

Fig. 3. Nonlinear characteristic of 09G2C steel used in frame pipes

Таблица 1.

Пластические характеристики металлов

Table 1.

Plastic characteristics of metals

Наименование материала	Условный предел текучести $\sigma$ , МПа	Предел прочности при растяжении $\sigma_b$ , МПа	Относительное удлинение $\delta_5$ , %
Сталь 08ПС ГОСТ 9045-93	200	280	28
Сталь 09Г2С ГОСТ 9045-93	294	441	18
АД 31Т1 ГОСТ 18475-82	275	315	8

Для проведения расчетов была разработана КЭМ деформируемого барьера (рис. 2). При моделировании были приняты во внимание рекомендации Т. Триленда, создавшего альтернативные модели деформируемых барьеров для фронтальных и боковых столкновений. Сравнение твердотельных и оболочечных моделей показало, что твердотельная модель имеет недостатки. Наличие объемных элементов приводит к увеличению времени расчета и не полностью отражает поведение реального барьера, в то же время данная модель отличается простотой в построении. Поэтому для достижения достоверных результатов рекомендуется использовать оболочечную модель. В соответствии с требованиями правил, моделирование удара выполнено со стороны сиденья водителя. При этом точка Н манекена соответствует среднему положению сиденья. Скорость движения модели автомобиля в момент удара составляет 56 км/ч, что соответствует типичной дорожной ситуации. Зона перекрытия передней части модели составляла 40 % (842 мм) его общей ширины. Модель барьера была уста-

новлена неподвижно, при этом ее нижняя кромка с выступающей частью находилась на высоте 200 мм от опорной поверхности колес автомобиля. Это обуславливается стандартизированными условиями для моделирования лобового столкновения автомобилей и позволяет точно оценить результаты влияния удара на структуру автомобиля. Моделирование столкновения осуществлялось с использованием программного комплекса *Abaqus EXPLICIT*, что гарантирует высокую точность и достоверность полученных результатов. Полученные результаты по напряженно-деформированному состоянию автомобиля показаны на рис. 4 и 5.



Рис. 4. Конечное состояние расчетной модели, вид сбоку

Fig. 4. The final state of the computational model (side view)

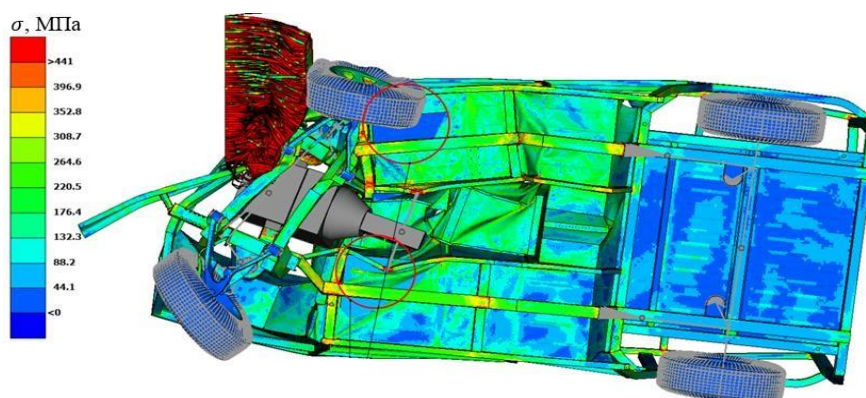


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние кузова, вид снизу

Fig. 5. Stress-strain state of the body (bottom view)

На рис. 6 показаны графики изменения энергии удара (кинетическая энергия) и поглощаемых конструкцией автомобиля энергий во время удара. Анализ полученных результатов показал, что исходная конструкция автомобиля имеет недостаточную энергоемкость и сопротивляемость разрушениям при рассмотрении столкновения с барьером. Большие деформации произошли в зонах действия ударной нагрузки и основания кузова (в зонах центрального тоннеля). Это привело к большому смещению левой боковины кузова по отношению к правой. Сильно деформировался пол в зоне ног водителя. Элементы этой части основания внедрились в зону необходимого остаточного пространства. Специально предусмотренные в конструкции энергопоглощающие зоны приняли на себя основную часть энергии удара и снизили воздействие на элементы каркаса. Однако этого было недостаточно, поэтому были проведены дальнейшие многовариантные исследования по оценке влияния отдельных силовых элементов и их конструктивных изменений на повышение пассивной безопасности. На основе проведенного анализа полученных результатов были разработаны рекомендации по повышению несущей способности кузова к разрушающим ударным нагрузкам и его энергоемкости. Для укрепления тоннеля пола в модель были введены дополнительные раскосы (рис. 7, поз. 1) и X-образные поперечины (поз. 2).



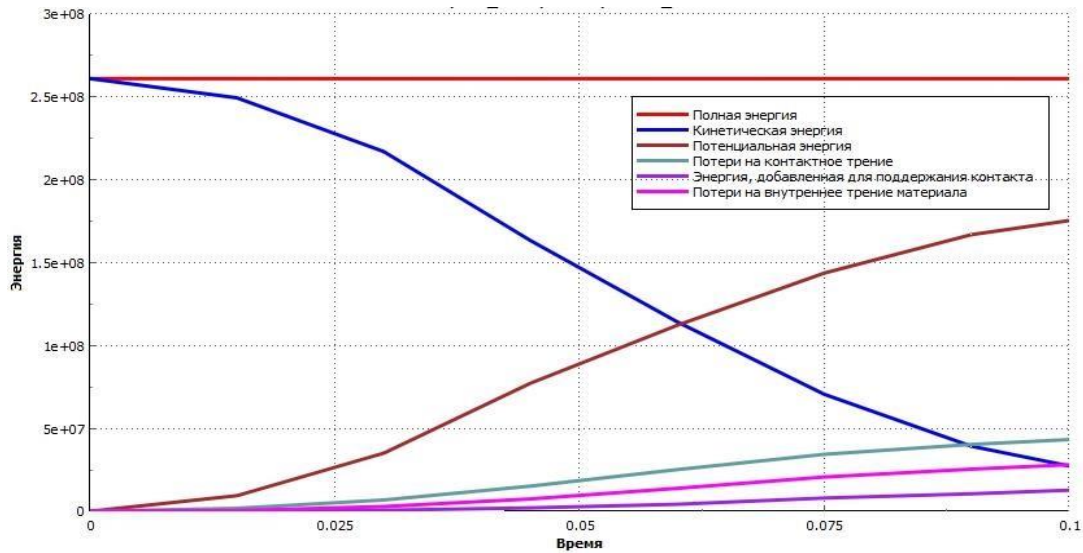


Рис. 6. Графики изменения энергий (Дж)

Fig. 6. Graphs of energy change (J)

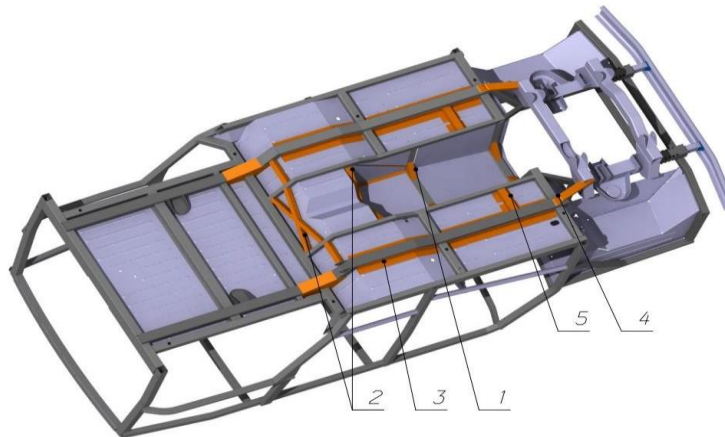


Рис. 7. Конструктивные изменения каркаса кузова

Fig. 7. Structural changes of the body frame

При ударе наблюдалось сильное смещение подрамника передней подвески в сторону салона, что деформировало тоннель пола и делало перемещение рулевой колонки больше допустимого. Для решения данной проблемы были введены дополнительные точки крепления подрамника на лонжеронах (поз. 4), что добавило дополнительную линию распределения энергии удара. Кроме этого, были усилены лонжероны основания (поз. 3), а также введены дополнительные с силовыми элементами тоннеля (поз. 5). Были усилены элементы передней части салона и их связи с несущими элементами основания.

В результате краш-теста остаточное жизненное пространство не было нарушено. Остаточное смещение рулевого колеса в центре уменьшилось на 80,3 % в вертикальном направлении вверх и 81,96 % в горизонтальном направлении назад, находясь в допустимых пределах в соответствии с Правилами № 94. Нарушения формы дверных проемов отмечено не было. Требования, предъявляемые к конструкции кузова на данном этапе проектирования, выполняются.

В результате получена более рациональная и безопасная конструкция кузова, способная выдерживать рассматриваемую ударную нагрузку, деформируясь в допустимых пределах при сохранении регламентируемого пространства в салоне.

### Заключение

Внесение изменений в конструкцию каркаса кузова не только привело к достижению приемлемых показателей деформации, но и повысило общую безопасность автомобиля. Также существенно повысилась эффективность защиты пассажиров в случае аварийных ситуаций в результате проведенной работы по доводке кузова на основе инженерных расчетов.

Разработанные рекомендации по повышению пассивной безопасности кузова автомобиля имеют прикладное значение. Их практическое применение может сделать значительно более эффективными меры по обеспечению безопасности транспортных средств в соответствии с современными стандартами.

Применение компьютерного моделирования при рассмотрении аварийных ситуаций, связанных с автомобилем, в соответствии с требованиями технического регламента дает возможность прогнозировать его пассивную безопасность на ранних этапах проектирования. Этот подход позволяет оценить и анализировать безопасность на всех этапах разработки конструкции кузова и ее последующих изменений, что является важным аспектом обеспечения существующих стандартов безопасности транспортных средств.

### Библиографический список

1. **Орлов, Л.Н.** Основы разработки конечно-элементных моделей кузовных конструкций автотранспортных средств. Расчеты на безопасность и прочность / Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, Е.В. Кочанов [и др.]. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. – 144 с.
2. **Орлов, Л.Н.** Методы расчета и оценки пассивной безопасности, прочности кузовных конструкций наземных транспортных средств: учебное пособие / Л.Н. Орлов, В.П. Могутнов, Е.В. Кочанов, С.А. Багичев, А.С. Вашурин. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2020. – 260 с.
3. **Орлов, Л.Н.** Расчетная оценка пассивной безопасности наземного транспортного средства с внесенными в его конструкцию изменениями. / С.А. Багичев, А.В. Тумасов, В.А. Колтунов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 1 (128). С. 96-104.
4. **Орлов, Л.Н.** Determination of the most efficient bus rollover computer simulation technique according ECE R66 / Л.Н. Орлов, П.С. Рогов // International Journal of Heavy Vehicle Systems. 2020. Т. 27. № 4. С. 422-440.
5. **Орлов, Л.Н.** Испытания на прочность и компьютерное моделирование локальных участков кузовных конструкций / Л.Н. Орлов, А.В. Герасин, А.В. Тумасов, Ю.П. Трусов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013 № 4 (101). С. 86-90.
6. **Trylend T.** Alternative Models of the Offset and Side Impact Deformable Barriers// 9<sup>th</sup> European LS-DYNA user conference. Raufoss (Norway), 2008. pp. 24-39.
7. **Правила ООН № 94, Добавление 93, Пересмотр 3** «О принятии единообразных технических предписаний для колесных транспортных средств, предметов оборудования и частей, которые могут быть установлены и/или использованы на колесных транспортных средствах, и об условиях взаимного признания официальных утверждений, выдаваемых на основе этих предписаний». Европейская Экономическая Комиссия, Женева, 2021.
8. **Сулегин, Д.А.** Топологическая оптимизация конструкции крыши легкового автомобиля с целью повышения энергоемкости при боковом ударе / Д.А. Сулегин, В.Н. Зузов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2021. № 1 (47). С. 2-14.
9. **Лю, И.** Исследование влияния применения клеевого соединения в двери на пассивную безопасность автомобиля при боковом ударе / И. Лю, В.Н. Зузов // Сборник статей XV Международной научно-практической конференции «Перспективные направления автотранспортного комплекса». Пенза, 2021. С. 38-45.

*Дата поступления  
в редакцию: 22.02.2024*

*Дата принятия  
к публикации: 28.06.2024*



## НАШИ АВТОРЫ

### ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

**Бураго Павел Николаевич** – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Герасимов Евгений Александрович** – инженер-технолог ОАО «ОКБМ Африкантов»

**Епифанов Сергей Александрович** – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Епифанова Анастасия Сергеевна** – научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук

**Крестьянинов Павел Алексеевич** – заместитель начальника отдела ОАО «ОКБМ Африкантов», канд. хим. наук

**Малышев Григорий Сергеевич** – инженер-конструктор ОАО «ОКБМ Африкантов»

**Наумов Евгений Александрович** – инженер-испытатель ОАО «ОКБМ Африкантов»

**Рыбин Артем Валерьевич** – доцент, инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук

**Санников Николай Александрович** – техник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Тряев Петр Владимирович** – начальник отдела контроля химического состава материалов и защиты от коррозии ОАО «ОКБМ Африкантов»

**Хранилов Валерий Павлович** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Эгамов Альберт Исмаилович** – доцент Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, канд. физ.-мат. наук

### ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

**Горбунов Владимир Александрович** – профессор Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина, д-р техн. наук

**Лоншаков Никита Андреевич** – доцент Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина, канд. техн. наук

**Мечтаева Мария Николаевна** – заместитель начальника учебно-методического управления, преподаватель Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина

**Минеев Павел Алексеевич** – аспирант Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина

**Полуничев Виталий Иванович** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Сосин Валерий Михайлович** – студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева им. Р.Е. Алексеева

**Савельев Алексей Юрьевич** – студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева им. Р.Е. Алексеева

**Теплякова Светлана Сергеевна** – аспирант Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

**Аникин Алексей Александрович** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Бузунов Николай Викторович** – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

**Вахидов Умар Шахидович** – заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Гончаров Роман Борисович** – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

**Гулин Максим Сергеевич** – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Капустин Александр Германович** – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева им. Р.Е. Алексеева

**Клубничкин Евгений Евгеньевич** – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

**Клубничкин Владислав Евгеньевич** – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), канд. техн. наук

**Коростелев Сергей Анатольевич** – заведующий кафедрой Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, доцент, д-р техн. наук

**Кулепов Виктор Федорович** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Лелиовский Константин Ярославич** – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

**Макаров Владимир Сергеевич** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Манянин Сергей Евгеньевич** – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

**Марковнина Алина Ивановна** – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Молев Юрий Игоревич** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Наумов Валерий Николаевич** – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

**Орлов Лев Николаевич** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Поляков Артем Олегович** – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

**Пирожков Роман Дмитриевич** – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

**Рубанов Павел Сергеевич** – инженер-конструктор ООО «Инновационный центр «КАМАЗ»

**Филин Илья Александрович** – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Хамитов Азамат Равилевич** – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

**Хренов Илья Олегович** – главный конструктор по инновациям инжинирингового центра ЛиАЗ, территориально обособленное подразделение Москва

## 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@nntu.ru\*\*](mailto:hranilov@nntu.ru)

**2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл,  
радиационная безопасность**

Максим Александрович Легчанов: [\*\*legchanov@nntu.ru\*\*](mailto:legchanov@nntu.ru)

**2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы**

Юрий Игоревич Молев: [\*\*rsl@nntu.ru\*\*](mailto:rsl@nntu.ru)

16+

**ТРУДЫ НГТУ  
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

**№ 3 (146)**

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**

*Редакция:*

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

rsl@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать: 03.09.2024 Дата выхода в свет 16.09.2024. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>.

Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 8,50. Тираж 300 экз. Заказ .

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.

Типография НГТУ.

Адрес университета и типографии:

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24