

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*

**№ 1 (136)**

**Нижний Новгород 2022**

УДК 050(06)  
ББК 9я54  
Т 78

Т78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2022. № 1(136).  
– 168 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: 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины; 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации; 05.13.17 – Теоретические основы информатики; 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы; 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование и вывод из эксплуатации

**Главный редактор А.А. Куркин**

### **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Члены редколлегии: Н.Ю. Бабанов, В.В. Беляков, Г.Я. Вагин, В.А. Горбунов, С.М. Дмитриев,  
Г.О. Котиев, А.Л. Куликов, В.Н. Ланцов, М.А. Легчанов, А.Б. Лоскутов,  
В.С. Макаров, В.Н. Наумов, Н.А. Прибатурин, В.П. Хранилов, А.Е. Хробостов**

**В.П. Хранилов** – ответственный секретарь рубрики  
«Информатика и управление в технических и социальных системах»  
**М.А. Легчанов** – ответственный секретарь рубрики «Энергетические системы и комплексы»  
**В.С. Макаров** – ответственный секретарь рубрики  
«Машиностроение и транспорт: теория, технологии, производство»

В.И. Казакова (ответственный редактор)  
А.В. Крылова (ответственный секретарь)

### **РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

**Председатель**

*Сергей Михайлович Дмитриев*  
(д.т.н., проф., ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

### **ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА**

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

### **УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:**

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»  
(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

*Электронная версия журнала:*  
<http://www.nntu.ru/content/trudy/>

*Свидетельство о регистрации в Роскомнадзоре  
периодического печатного издания:*  
ПИ № ФС 77-56417

УДК 050(06)  
ББК 9я54

© Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2022

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

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

*Published since 2010*

**№ 1 (136)**

**Nizhny Novgorod 2022**



*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: 05.05.03 – Wheeled and tracked vehicles;  
05.13.01 – System analysis, management and information processing;  
05.13.17 – Theoretical foundations of computer science;  
05.14.02 – Electric power stations and electric power systems;  
05.14.03 – Nuclear power plants, including design and decommissioning

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

## **EDITORIAL BOARD**

**Members of Editorial Board: N.Yu. Babanov, V.V. Belyakov, G.Ya. Vagin, V.A. Gorbunov, S.M. Dmitriev G.O. Kotiev, A.L. Kulikov, M.A. Legchanov, V.N. Lantsov, A.B. Loskutov, V.S. Makarov, V.N. Naumov, N.A. Pribaturin, V.P. Khranilov, A.Ye. Khrobostov**

**V.P. Khranilov** – Executive Secretary of the Section «Informatics and Management in Technical and Social Systems»  
**M.A. Legchanov** – Executive Secretary of the Section «Energy Systems and Complexes»  
**V.S. Makarov** – Executive Secretary of the Section «Mechanical Engineering and Transport»

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

## **EDITORIAL COUNCIL**

**Chairman**

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

### **Members of Editorial Council**

***Pelinovski Dmitri***

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

***László Palkovics***

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

***Péter Várlaki***

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

***Vijay Kumar Chakka***

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

***Yalciner Akhmet***

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ .....</b>	<b>7</b>
<b>Галкина Е.Д.</b> О принципах функционирования мобильного навигационного приложения с системой предупреждения водителя о возможных опасностях на пути следования .....	7
<b>Логанов С.В.</b> Особенности применения принципа разделения интерфейсов .....	17
<b>Манцеров С.А.</b> Функциональная систематика в управлении качеством и безопасностью состояний сложных технических объектов .....	24
<b>Михайлов Е.А., Степанова А.П., Таранюк А.А.</b> Анализ и модель системы электровихревых течений между двумя плоскостями при больших токах .....	32
<b>Тимофеева О.П., Савкин А.Е., Тимофеев Е.Р., Балашова Т.И., Сидорова Е.В.</b> Реставрация и колоризация старых фотографий с использованием нейронных сетей .....	43
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ .....</b>	<b>54</b>
<b>Аркадов Г.В., Павелко В.И., Поваров В.П., Слепов М.Т.</b> Вибросостояние корпуса и внутрикорпусных устройств реакторной установки ВВЭР-1200 .....	54
<b>Саляев А.В., Усынина С.Г.</b> Моделирование расчетного бенчмарка по облучению топливных элементов ВТГР .....	68
<b>Тихонов А.И., Тучков М.Ю., Поваров П.В., Литвак М.М.</b> Разработка требований для перехода от автоматизированного функционально-группового управления к автоматической цифровой системе «Виртуальный оператор» .....	77
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>86</b>
<b>Вольская Н.С., Басманов И.В.</b> Динамический метод оценки напряженно-деформированного состояния полупространства «грунт» в контактных задачах «шина-грунт» .....	86
<b>Евсеев К.Б.</b> Экспериментальное исследование движения гусеничного поезда. Верификация математической модели .....	97
<b>Левенков Я.Ю., Чичекин И.В., Лебедев Д.Р.</b> Методика разработки несущей системы снегохода с использованием методов оптимизации конструкции .....	114
<b>Мазунова Л.Н., Беляков В.В., Макаров В.С., Бушуева М.Е., Ерофеева Л.Н., Аникин А.А., Наумов В.Н.</b> Сравнительный анализ методов многокритериальной оценки конкурентоспособности и подвижности автотракторной техники с учетом весовой значимости характеристик .....	125
<b>Порубов Д.М., Родин А.А., Пинчин А.В., Зарубин А.В., Зарубин Д.Н., Тумасов А.В., Кулепов В.Ф., Орлов Л.Н.</b> Экспериментальные исследования системы контроля полосы движения на основе нейронных сетей .....	137
<b>Степанов Е.В.</b> Снижение вибронегруженности коммерческих автомобилей за счет применения упругодемпфирующих устройств подвески на основе эластомерных материалов .....	148
<b>НАШИ АВТОРЫ .....</b>	<b>164</b>

## CONTENTS

<b>COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS .....</b>	<b>7</b>
<b>E.D. Galkina.</b> Principles of functioning of mobile navigation application with a system for warning a driver about possible dangers on the route .....	7
<b>S.V. Loganov.</b> Application features of the interface segregation principle .....	17
<b>S.A. Mantserov.</b> Functional systematics in quality management and safety of states of complex technical objects .....	24
<b>E.A. Mikhailov, A.P. Stepanova, A.A. Taranyuk.</b> Analysis and model of electric vortex flow system between two planes at high currents .....	32
<b>O.P. Timofeeva, A.E. Savkin, E.R. Timofeev, T.I. Balashova, E.V. Sidorova.</b> Restoration and colorization of old photographs using neural networks .....	43
<b>ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES .....</b>	<b>54</b>
<b>G.V. Arkadov, V.I. Pavelko, V.P. Povarov, M.T. Slepov.</b> Vibration resistance state of vessel and in-vessel equipment of PWR (VVER)-1200 reactor system .....	54
<b>A.V. Salyaev, S.G. Usynina.</b> Simulation of calculated benchmark for radiation exposure of HTGR fuel cells .....	68
<b>A.I. Tikhonov, M.Yu. Tuchkov, P.V. Povarov, M.M. Litvak.</b> Development of requirements for transition from automated functional group management to «virtual operator» automatic digital system .....	77
<b>MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION .....</b>	<b>86</b>
<b>N.S. Volskaya, I.V. Basmanov.</b> Dynamic method for estimating the stress-strain state of the «soil» half-space in contact problems «tire-soil» .....	86
<b>K.B. Evseev.</b> Experimental study of a tracked train motion. mathematical model verification .....	97
<b>Y.Y. Levenkov, I.V. Chichekin, D.R. Lebedev.</b> Methodology for the development of a snow-mobile undercarriage system using design optimization methods .....	114
<b>L.N. Mazunova, V.V. Belyakov, V.S. Makarov, M.E. Bushueva, L.N. Erofeeva, A.A. Anikin, V.N. Naumov.</b> Comparative analysis of methods of multi-criteria assessment of competitiveness and mobility of automotive equipment, taking into account the weight significance of characteristics .....	125
<b>D.M. Porubov, A.A. Rodin, A.V. Pinchin, D.N. Zarubin, A.V. Tumasov, V.F. Kulepov, L.N. Orlov.</b> Experimental studies of traffic lane control system based on neural networks .....	137
<b>E.V. Stepanov.</b> Reduction of vibration load of commercial vehicles due to the use of elastic damping suspension devices based on elastomeric materials .....	148
<b>AUTHORS .....</b>	<b>164</b>

---

# ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

---

УДК 004.031

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_7

## О ПРИНЦИПАХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНОГО НАВИГАЦИОННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ С СИСТЕМОЙ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ВОДИТЕЛЯ О ВОЗМОЖНЫХ ОПАСНОСТЯХ НА ПУТИ СЛЕДОВАНИЯ

Е.Д. Галкина

ORCID: 0000-0002-7160-1060 e-mail: [ekaterinagalka@gmail.com](mailto:ekaterinagalka@gmail.com)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Представлены принципы функционирования мобильного навигационного приложения с системой предупреждения водителя о возможных опасностях на пути следования. Мобильное приложение рассматривается как одна из подсистем интеллектуальной информационной транспортной системы повышения безопасности дорожного движения. Рассматривается задача о наиболее эффективном способе информирования водителя и факторы, оказывающие влияние на формирование аннотаций, уточняется алгоритм автоаннотирования.

**Ключевые слова:** навигация, ДТП, Google Maps, геоинформационная система, интерактивная карта, мобильные приложения.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Галкина, Е.Д. О принципах функционирования мобильного навигационного приложения с системой предупреждения водителя о возможных опасностях на пути следования // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 1. С. 7-16. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_7

## PRINCIPLES OF FUNCTIONING OF MOBILE NAVIGATION APPLICATION WITH A SYSTEM FOR WARNING A DRIVER ABOUT POSSIBLE DANGERS ON THE ROUTE

E.D. Galkina

ORCID: 0000-0002-7160-1060 e-mail: [ekaterinagalka@gmail.com](mailto:ekaterinagalka@gmail.com)Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Principles of functioning of mobile navigation application with a system for warning a driver about possible dangers on the route are presented. The mobile application is considered as one of the subsystems of intellectual information transport system to improve road safety. Problem of the most effective method of informing a driver, as well as factors influencing the formation of annotations, are considered, the auto-annotation algorithm is specified.

**Key words:** navigation, traffic accidents, Google Maps, geographic information system, interactive map, mobile applications.

**FOR CITATION:** E.D. Galkina. Principles of functioning of mobile navigation application with a system for warning a driver about possible dangers on the route. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 1. Pp. 7-16. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_7

## Введение

Настоящая работа продолжает серию публикаций, посвященных созданию интеллектуальной информационной транспортной системы, направленной на повышение безопасности дорожного движения [1-7]. В качестве одной из ее подсистем рассматривается создание навигационного приложения с подсказками по безопасности дорожного движения. Дорожно-транспортные происшествия с участием личного транспорта регулярно становятся причиной трагедий, приводя к потере жизни и здоровья людей. Согласно открытой статистике ГИБДД, начиная с 2000 г., в Российской Федерации ежегодно регистрируется более 140 000 ДТП, в которых более 15 000 чел. погибают и более 170 000 чел. получают ранения различной степени тяжести [8]. При этом участниками ДТП наиболее часто становятся представители трудоспособной и экономически активной части общества, что приводит к существенному ущербу экономики и негативно влияет на демографический потенциал государства. Как показывает практика, лишь незначительная (0,57 %: 1 121 из 199 431, согласно официальной статистике ГИБДД РФ за 2010 г.) часть аварий происходит вследствие технической неисправности автотранспорта; это число настолько мало, что по состоянию на 2021 г. МВД РФ предложило отменить обязательный ежегодный техосмотр для некоммерческих легковых автомобилей и мотоциклов.

Более 80 % всех ДТП происходит по вине самих водителей; таким образом, «человеческий фактор» является ключевой причиной [9]. При этом большое число аварий на городских и загородных дорогах происходит, в том числе, из-за того, что водители недостаточно хорошо ориентируются на незнакомых участках пути и не осведомлены об особенностях движения на конкретном отрезке дороги. Своевременное уведомление водителя о потенциальной опасности предположительно способно снизить риск возникновения аварии.

## Материалы и методы

Разработка информационных систем повышения безопасности дорожного движения представляет собой актуальную задачу и рассматривается в ряде работ [10-13]. Принципы функционирования одной из них – «Интеллектуальной информационной транспортной системы» (ИИТС), которая на ранних версиях носила название «Интерактивной карты аварийности» – подробно описаны в [1-4]. Она представляет собой набор программных инструментов и веб-интерфейс, которые позволяют пользователю заблаговременно ознакомиться с потенциально опасными участками на заданном маршруте следования. Также система поддерживает формирование и демонстрацию аннотаций в реальном времени, предупреждающих об опасности при проезде определенного участка дороги или приближении к нему. Однако следует учитывать, что веб-интерфейс ИИТС предназначен, в первую очередь, для работы со стационарных устройств перед поездкой, так как имеет набор расширенных функций, избыточных для водителя, осуществляющего движение по маршруту (например, демонстрация видеороликов). Навигатор с подсказками по безопасности дорожного движения (БДД) представляет собой мобильное приложение и является естественным дополнением веб-интерфейса ИИТС, предназначенным для использования водителем в дороге непосредственно во время движения.

В настоящее время есть два основных типа мобильных навигационных приложений: оффлайн- и онлайн-навигаторы. Оффлайн-навигаторы (например, *Navitel*) являются самостоятельными приложениями и хранят предварительно подготовленные карты во внутренней памяти мобильного устройства. Их преимуществами являются работоспособность даже в условиях слабого или отсутствующего интернет-сигнала, а также экономия интернет-трафика. К недостаткам стоит отнести большое количество данных, занимающих память устройства и необходимость постоянного обновления карт, чтобы поддерживать их в актуальном состоянии.



Онлайн-навигаторы (Яндекс-Навигатор, Google-Навигатор) являются программами-интерфейсами, или «клиентами» в терминологии клиент-серверных систем. Такие приложения работают только при подключении мобильного устройства к сети. Все карты, базы данных и прочие информационные материалы, необходимые для их корректной работы, находятся на удаленных серверах разработчика, на смартфон устанавливается только интерфейс для работы с ними. Таким образом, карты постоянно подгружаются на смартфон, что требует стабильного интернет-канала. Эти приложения регулярно расходуют мобильный трафик пользователя, однако все вычислительные процессы при этом происходят за пределами мобильного устройства. Оно получает и выводит пользователю окончательный результат, что значительно экономит ресурсы и внутреннюю память. Также постоянное подключение к сети позволяет получать информацию о дорожной ситуации в режиме реального времени (например, о пробках, авариях, дорожных работах), что иногда принципиально для построения оптимального маршрута.

Для Навигатора с подсказками по БДД был выбран онлайн-формат ввиду того, что:

- интеллектуальная информационная транспортная система (ИИТС), в первую очередь, рассчитана на обеспечение безопасности дорожного движения в крупных городах, где повсеместно доступен мобильный интернет;
- ИИТС работает с базой данных о ДТП, произошедших за несколько лет, требующей значительный объем памяти для хранения;
- в оффлайн-режиме невозможно учитывать погодный фактор при построении маршрута;
- в случае оффлайн-навигации на устройство пользователя в дополнение к картам должен быть загружен алгоритм построения путей, что еще больше утяжелит приложение и поднимет требования к производительности устройства.

Таким образом, Навигатор является мобильным интерфейсом для вывода результатов работы программных модулей ИИТС. Вычисления для поиска очагов ДТП и оценки влияния различных факторов на безопасность движения, а также построение оптимального маршрута на основе этих вычислений будут выполняться на сервере, а на мобильное устройство будут передаваться только результаты в формате «json».

### Принцип работы навигатора

На рис. 1 представлен скриншот главного меню навигатора. В режиме «Навигация»



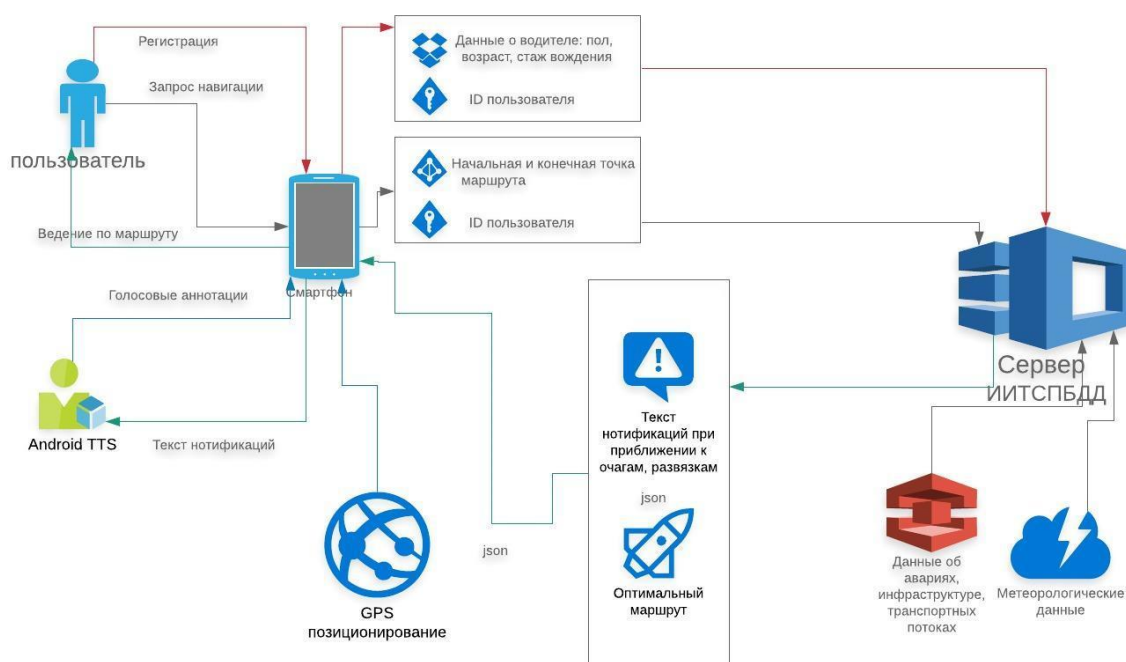
Рис. 1. Главное меню Навигатора

Fig. 1. Navigator Main Menu

приложение обеспечивает непосредственно ведение по маршруту, с использованием технологии GPS, голосовым уведомлением водителя о приближении к очагам аварийности, а также с краткой подсказкой, как минимизировать риск аварии. В режиме «Карта» приложение, по аналогии с ИИТС, позволит посмотреть расположение очагов аварийности с заданными параметрами. Ко всему прочему, ИИТС поддерживает функцию персонализации для информирования пользователей о дорожных опасностях, наиболее релевантных для них. Чтобы воспользоваться этой функцией, пользователю необходимо зарегистрироваться и сообщить данные о себе (пол, возраст, стаж вождения) – это можно сделать через веб-интерфейс ИИТС или через меню «Профиль» в Навигаторе.

Приложение отправит данные на сервер, где они будут использованы для поиска и последующего предоставления пользователю информации о наиболее опасных именно для него очагах аварийности на пути следования. В настройках приложения можно указать объем предоставляемой инфор-

мации (например, только пробки/только ДТП и т.д.), включить или отключить звуковое сопровождение, выбрать другие опции, которые сделают работу с Навигатором наиболее комфортной для конкретного пользователя. Общая схема работы Навигатора представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Схема функционирования Навигатора с подсказками по безопасности дорожного движения**

**Fig. 2. Navigator functioning scheme with tips on road safety**

Предполагается, что:

- на мобильном устройстве установлено навигационное приложение;
- мобильное устройство имеет GPS-модуль;
- подключен интернет-канал достаточной пропускной способности;
- на сервере размещен интернет-модуль ИИТС.

Алгоритм работы Навигатора следующий.

1. При первичном запуске (регистрации) пользователь передает на сервер ИИТС данные о своем поле, возрасте, стаже вождения. Это позволит системе учитывать особенности водителя при создании аннотаций к очагам ДТП.

2. Водитель указывает начальную и конечную точки маршрута.

3. Навигационное приложение передает гео-координаты этих точек серверу ИИТС.

4. Подсистема построения путей ИИТС строит маршрут от начальной точки до конечной и накладывает на него очаги аварийности.

5. ИИТС формирует текстовые аннотации, предупреждающие о приближении к очагам ДТП, в соответствии с алгоритмом, описанным в следующем пункте, а также поворотам, дорожным развязкам, потенциально опасным участкам дороги.

6. ИИТС формирует json-файл с описанием маршрута и аннотациями. Файл отправляется сервером ИИТС навигационному приложению.

7. Навигационное приложение динамически отслеживает перемещение ТС по маршруту в соответствии с информацией json-файла.

8. Если ТС уходит с маршрута, то шаги 3-7 повторяются для перестроения маршрута, вместо начальной точки берутся гео-координаты текущей точки.

### Алгоритм формирования аннотаций

Общая логика формирования аннотаций описана в [5], в данной работе алгоритм аннотирования уточняется и конкретизируется для навигационного приложения. Для аннотирования очага аварийности по сути нужно дать прогноз показателей аварийности в данном месте концентрации ДТП (принципы выделения очагов подробно рассматривались в [6]). Построение модели для прогнозирования аварийности по данному фактору  $f_i$  заключается в нахождении зависимости (1):

$$K_i = F_i(t), \quad (1)$$

где  $K_i$  – коэффициент, характеризующий риск происшествия ДТП с данным фактором,  $t$  – время,  $F_i(t)$  – функция определяемая отдельно для каждого из факторов. Коэффициент  $K_i$  далее будем называть коэффициентом опасности по заданному фактору. Сложность нахождения функций  $F_i(t)$  заключается в том, что описание этих функций для различных факторов не единообразно. Рассматривается следующий список факторов, сопутствующих ДТП, и типов ДТП: «Дистанция», «Приоритет», «Скорость», «Боковой интервал», «Движение задним ходом», «Заснеженная дорога», «Гололедица», «Снежный накат», «Снегопад», «Дождь», «Туман», «Ослепление», «Наезд на пешехода» (англ. «Distance», «Priority», «Speed», «Side interval», «Backing», «Snow road», «Ice», «Packed snow», «Snowfall», «Rain», «Fog», «Blinding», «Accident on the pedestrian»). Коэффициенты опасности обозначим в соответствии с английскими названиями:  $K_d, K_p, K_s, K_{si}, K_b, K_{sr}, K_{ice}, K_{ps}, K_{sf}, K_r, K_f, K_{bl}, K_{ap}$ . Их можно условно разделить на три группы:

- 1) факторы, связанные с режимом движения, маневрами (коэффициенты  $K_d, K_p, K_s, K_{si}, K_b$ );
- 2) факторы, связанные с погодой (и, соответственно, состоянием дорожного покрытия) (коэффициенты  $K_{sr}, K_{ice}, K_{ps}, K_{sf}, K_r, K_{bl}$ );
- 3) аварии с участием пешеходов (коэффициенты  $K_{ap}$ ).

Для факторов, связанных с погодой модель нахождения  $K_i$  имеет следующие особенности:

- сезонность;
- действие только при определенных условиях.

Условия – критерии, при которых фактор действует, описаны в [7]. Вычисление  $K_{sr}, K_{ice}, K_{ps}$  (2):

$$K_i = \varepsilon_i \frac{n_{io} N}{N_o n_i} + k_i \sum_{j=1}^m \frac{1}{d_j} \quad (2)$$

Вычисление  $K_s, K_r, K_f, K_{bl}$  (3):

$$K_i = \varepsilon_i \frac{n_{io} N}{N_o n_i} + k_i \sum_{j=1}^m \frac{1}{d_j^2} \quad (3)$$

Первое слагаемое в формулах характеризует общие статистические закономерности и показывает, во сколько раз ДТП с данным фактором в очаге превышают средние значения по населенному пункту. Здесь  $N$  – общее число ДТП (по рассматриваемому населенному пункту),  $n_i$  – количество ДТП, при совершении которых присутствовал  $i$ -ый фактор,  $N_o$  – число ДТП в очаге,  $n_{io}$  – количество ДТП в очаге, при совершении которых присутствовал  $i$ -ый фактор – все величины берутся за последние три года;  $\varepsilon_i = 0$ , если погодный критерий не выполнен,  $\varepsilon_i = 1$ , если критерий выполнен. Второе слагаемое отвечает динамике ДТП в очаге за последнее время. Для всех аварий с данным фактором за последние три месяца:  $k_i$  – коэффициенты, определяемые экспериментально, для каждого фактора и характеризующие время действия фактора (например, образование снежного наката как правило имеет пролонгированный эффект – образовавшись он не исчезает мгновенно),  $d_j$  – количество дней про-

шедших со времени ДТП (нецелые данные округляются в большую сторону, т.е. если менее суток, то  $d_j = 1$ ). Гиперболическая зависимость в модели (2) обусловлена тем, что по мере увеличения временного интервала априорно предполагается, что действие фактора ослабевает (заканчивается). Действие факторов в формуле (3) более кратковременно, но может иметь остаточный эффект для дождя, снегопада или действовать несколько дней подряд – в случае ослепления, ввиду схожих углов падения световых лучей. Поэтому в формуле (3) второе слагаемое присутствует, но убывает по времени быстрее, чем в (2).

Вычисление  $K_d, K_s, K_{si}, K_b$  (4):

$$K_i = \frac{n_{io}N}{N_o n_i} + k_i \sum_{j=1}^m \frac{1}{d_j}; \quad (4)$$

вычисление  $K_p$  и  $K_{ap}$  (5):

$$K_i = \frac{n_{io}N}{N_o n_i} + k_i \sum_{j=1}^m \frac{1}{\sqrt{d_j}} \quad (5)$$

где  $N$ , как и выше – общее число ДТП (по рассматриваемому населенному пункту),  $n_i$  – количество ДТП, при совершении которых присутствовал  $i$ -ый фактор,  $N_o$  – число ДТП в очаге,  $n_{io}$  – количество ДТП в очаге, при совершении которых присутствовал  $i$ -ый фактор; все величины берутся за последние три года; для всех аварий с данным фактором за последние три месяца:  $k_i$  – коэффициенты, определяемые экспериментально для каждого фактора и характеризующие время действия фактора,  $d_j$  – количество дней прошедших со времени ДТП (нецелые данные округляются в большую сторону, т.е. если менее суток, то  $d_j = 1$ ). Основное отличие формул (4) и (5) от (2) и (3) – отсутствие множителя  $\varepsilon_i$ , т.е. факторы действуют постоянно. Меньшая степень  $d_j$  в знаменателе формулы (5) обусловлена тем, что в ряде случаев фактор «Приоритет» и аварии с участием пешеходов появляются при модификации дорожной инфраструктуры, в частности, при изменении приоритета проезда перекрестка, светофорных циклов и т.п. Значительная часть водителей едет «по памяти», а не по знакам, поэтому при модификациях дорожной инфраструктуры риск ДТП возрастает, привыкание водителей к изменениям может занять существенное время. Существенной особенностью формул (2)-(5) является то, что происшедшее за последние три месяца аварии одновременно увеличивает оба слагаемых. Данные формулы используются (работают), только если за последний год в очаге произошло минимальное количество ДТП –  $M_i$ , методика вычисления которых описана в [6]. Эти константы пересчитываются для конкретного населенного пункта (или другой территории) раз в год, так как они дискретны и слабо подвержены изменениям. В зависимости от значений  $K_i$ , фактор относим к одной из групп опасности в соответствии с заданными в ИИТС пороговыми константами (которые вычисляются экспериментально):

0)  $K_i \leq P_0$  – нулевой класс опасности, фактор признается неопасным (для данного очага);

1)  $P_0 < K_i \leq P_1$  – первый класс опасности, фактор имеет низкую степень опасности;

2)  $P_1 < K_i \leq P_2$  – второй класс опасности, фактор имеет среднюю степень опасности;

3)  $K_i > P_2$  – третий класс опасности, фактор имеет высокую степень опасности.

Формирование аннотированного сообщения происходит следующим образом:

1) если по очагу имеется комментарий эксперта, то он имеет высший приоритет (если комментарий был привязан к определенному фактору, то если происходит ДТП с данным фактором, то комментарий автоматически пролонгируется на период, указанный экспертом);

2) вычисляются коэффициенты  $K_i$  по формулам (2) – (5), аннотируются только факторы 1-3 класса опасности;

3) при видеоаннотировании отображаются три наиболее значимых фактора опасности (имеющие наибольшее значение  $K_i$ ), цвет отображения соответствует классу опасности: 1 – зеленый, 2 – желтый, 3 – красный;

4) при аудиоаннотировании учитываются только два наиболее значимых фактора (имеющие наибольшее значение  $K_i$ );

5) если водитель авторизован (известен его стаж), то для начинающих водителей (со стажем менее 1 года) озвучиваются все очаги, имеющие аннотации, при стаже 1-2 года – только очаги с факторами 2 и 3 класса опасности, при стаже более 2 лет – только очаги с факторами 3 класса опасности, при условии, что водитель не выберет режим, при котором воспроизводятся все аннотации.

### Механизм озвучивания аннотаций

Отдельно остановимся на механизме озвучивания аннотаций. Как уже говорилось ранее, сервер ИИТС передает приложению только текстовые сообщения в формате json. Для озвучивания используется встроенная в ОС Android программа TTS (texttospeech). Оно выполняется голосом, который выбирается из стандартного набора голосов в настройках TTS. При желании пользователь может загрузить дополнительные голоса из интернета.

Аннотации Навигатора с подсказками по безопасности дорожного движения можно условно разделить на несколько типов.

1. *Информирование о маневрах* используется для предупреждения пользователя о въезде и выезде для кругового движения, поворотах, въездах и выездах для мостов и акведуков. По аналогии с существующими навигаторами аннотации озвучиваются дважды: за 500 м до развязки, чтобы водитель подготовился и непосредственно перед маневром. На рис. 3 представлены примеры значков на экране Навигатора, обозначающие необходимость изменить направление движения.



Рис. 3. Примеры значков на экране Навигатора, обозначающие необходимость изменить направление движения

Fig. 3. Examples of signs on Navigator screen indicating the need to change the movement direction

2. *Информация об изменении состояния дорожной инфраструктуры* используется для предупреждения пользователя о неработающем светофоре, ремонтных работах, аварии на дороге, камере фиксации нарушений ПДД. Обозначается соответствующим ситуации значком на карте и единовременным предупреждением голосом за 500 м. На рис. 4 представлены примеры значков на экране Навигатора, обозначающие изменение состояния дорожной инфраструктуры.



Рис. 4. Примеры значков на экране навигатора, обозначающие изменение состояния дорожной инфраструктуры

Fig. 4. Examples of signs on Navigator screen indicating the change of road infrastructure state



3. *Информация о допустимых режимах движения (ограничения скоростного режима)* используется для предупреждения пользователя специфическим звуковым сигналом (без голосового сообщения) после превышения им разрешенного лимита скорости на данном участке дороги. Она не повторяется, если пользователь не изменил скорость. На экране приложения обозначается значком лимита скорости (рис. 5).



**Рис. 5. Значок «Лимит скорости»**

**Fig. 5. «Speed Limit» sign**

Вышеуказанные оповещения, совместно или по отдельности, уже реализованы в существующих навигационных программах, так как удобны для водителя и делают использование навигатора наиболее комфортным. Нижеследующие пункты являются оригинальными решениями для Навигатора с подсказками по безопасности.

4. *Информация об очагах ДТП* – в зависимости от переданных водителем данных о себе и погодных условий в текущий момент, сервер ИИТС передает навигатору информацию об очагах ДТП, встречающихся вдоль маршрута и факторах их возникновения. В зависимости от количества совпадающих факторов, очаги могут быть классифицированы как средней опасности и особо опасные. Например, на некотором участке дороги регулярно случаются ДТП в ясную солнечную погоду ранним вечером по причине того, что солнце резко слепит прямо в глаза водителю после выезда из темного тоннеля, и он не видит знак приоритета «Уступите дорогу». Если водитель использует Навигатор с подсказками по безопасности – при проезде по тоннелю в ясную солнечную погоду ранним вечером – он заблаговременно получит предупреждение, что впереди опасный участок, и нужно быть внимательнее. Навигатор один раз озвучивает предупреждение об очаге средней опасности за 100 м до него. В сообщении включается информация о наиболее вероятной причине аварий: ослепление солнцем, ледяной накат, игнорирование знаков приоритета и т.д. Навигатор один раз озвучивает предупреждение об очаге высокой опасности за 100 м до него. В сообщении включается слово-маркер «Внимание!», информация об одной или нескольких наиболее вероятных причинах аварий и рекомендация снизить скорость. На экране навигатора видна иконка с рекомендуемой скоростью.

Очаги средней и высокой опасности обозначаются на экране Навигатора значками желтого и красного цвета соответственно. Внешний вид этих значков представлен на рис. 6.



**Рис. 6. Знаки «Очаг аварийности» и «Очаг аварийности повышенной опасности»**

**Fig. 6. «Accident Cluster» and «Accident Cluster of Increased Danger» signs**

5. *Режим ведения по дороге для малоопытных водителей* может быть полезен для водителей с малым стажем вождения. Он наиболее подробное информирование, которое может быть избыточным для опытных водителей, но полезным для начинающих; может быть включен или отключен в настройках приложения. В этом режиме:

- на маршруте отображаются все возможные очаги ДТП без учета личных данных водителя, что позволяет ему быть готовым к максимальному числу возможных аварийных ситуаций; дополнительные очаги аннотируются как очаги средней опасности;
- дополнительные подсказки для водителя: о необходимости заблаговременного перестроения в нужную полосу, автобусных остановках на однополосной дороге или необходимости уступить дорогу.

Эта функция позволит водителю с малым опытом или опытному водителю, впервые двигающемуся по данному маршруту, заранее подготовиться к маневру, что поможет снизить количество необдуманных действий со стороны водителя, и как результат – количество вызванных этими действиями аварий. Если необходимо получить наиболее детальную информацию по маршруту следования, рекомендуется использовать веб-версию ИИТС, которая предназначена, в первую очередь, для просмотра со стационарных компьютеров. ИИТС дает возможность показать максимальное количество деталей, включая информационно-обучающие видеоролики, фото с места аварии и подробные комментарии экспертов. Разумеется, в условиях следования по маршруту детальная аннотация не должна использоваться, чтобы не отвлекать внимание водителя от дороги, тем самым создавая риск аварии, который должна минимизировать.

Потому веб-версия имеет расширенный функционал, а в Навигаторе с подсказками по безопасности дорожного движения в каждую аннотацию включается не более трех факторов, которые ранжируются в зависимости от их значимости для данного очага ДТП при текущих условиях. Факторы можно объединить в несколько категорий, которые по-разному влияют на формирование аннотации.

1. *Данные о водителе.* Информация этой категории, предоставленная водителем, используется для того, чтобы определить, входит ли он в группу риска для конкретного очага ДТП на маршруте. Если очаг потенциально опасен для конкретного водителя, он будет отображен на карте, а аннотация озвучена. Если конкретный очаг статистически не опасен для данной категории водителей, он, соответственно, не будет отображен. При включенном режиме «неопытный водитель» очаг отобразится с соответствующей аннотацией. Пример звукового предупреждения: *«Через 50 м нерегулируемый пешеходный переход. Рекомендуется снизить скорость».*

2. *Погодные данные.* Алгоритм аннотирования сравнивает текущую информацию о погоде с погодными условиями, являющимися потенциально аварийноопасными. Если очаг выделяется только при определенных погодных условиях, он будет отображен лишь в случае соответствующих погодных условий. Например, очаг ДТП, связанный с ледяным накатом, не будет отображаться в летнее время, в том числе – при включенном режиме «неопытный водитель». Пример звукового предупреждения: *«Через 50 м возможно возникновение снежного наката!»*

3. *Данные дорожной инфраструктуры.* Если очаг ДТП был образован из-за изменения состояния дорожной инфраструктуры, например, причиной является неработающий светофор или ремонтные работы, такой очаг будет отображен лишь в случае сохранения проблемной обстановки на дороге. Если инфраструктура восстановлена и отсутствуют другие факторы, позволяющие говорить об очаге ДТП, то такой очаг не будет отображен, в том числе – при включенном режиме «неопытный водитель». Пример звукового предупреждения: *«Через 50 м неработающий светофор!»*

4. *Остальные факторы, влияющие на аварийность конкретного очага* (несоблюдение дистанции, несоблюдение скоростного режима, несоблюдение правил приоритета, несоблюдение правил проезда пешеходного перехода и т.д.) Алгоритм выбирает наиболее значимые из них и озвучивает водителю так, чтобы в сообщении содержалось не более трех подсказок, например: *«Через 50 м опасный участок, соблюдайте дистанцию, обратите внимание на скоростной режим и боковой интервал!»*

## Заключение

Комплекс ИИТС, включающий набор серверных программных средств, веб-интерфейс и мобильное приложение «Навигатор с подсказками по БДД» позволит водителям своевременно получать достоверную информацию о возможных дорожных опасностях и заранее выбрать безопасный режим движения, что снизит риск аварий и будет способствовать повышению безопасности дорожного движения.

## Библиографический список

1. **Елисеев, М.Е.** Подсистема мониторинга интерактивной карты аварийности / М.Е. Елисеев, А.С. Блинов, Е.Д. Галкина, А.В. Липенков // Организация и безопасность дорожного движения. Материалы X международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения д.т.н., профессора Л. Г. Резника: в 2 томах. 2017. С. 374-379.
2. **Елисеев, М.Е.** Об интерактивной системе повышения безопасности дорожного движения / М.Е. Елисеев, А.С. Блинов, Е.Д. Галкина, А.В. Липенков // Информационные технологии и инновации на транспорте. Материалы 4-ой Международной научно-практической конференции. Под редакцией А.Н. Новикова. 2019. С. 213-221.
3. **Елисеев, М.Е.** Технологии, необходимые при создании интерактивной карты аварийности / М.Е. Елисеев, Т.Н. Томчинская, А.А. Репников, А.С. Блинов, Е.Д. Галкина, А.А. Уваров, Е.В. Ярова // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы. сборник материалов 94 международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров. Главный редактор С.М. Дмитриев. 2016. С. 211-216.
4. **Eliseev, M.E.** Virtual Reality and Navigation subsystems of the Interactive System for Road Safety Improving [Text] / Eliseev, M. E., Tomchinskaya, T. N., Galkina, E. D., Dudakov, N. Yu., Musarsky, R. A. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – С. 012027.
5. **Eliseev, M.E.** Algorithm of automated annotation of areas of roads with increased accidents / Eliseev M.E. Blinov A.S., Lipenkov A.V. // MATEC Web Conf., 334 (2021) 01007 DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202133401007>.
6. **Елисеев, М.Е.** Критерий для выявления мест концентрации аварий при разработке интеллектуальной информационной транспортной системы / М.Е. Елисеев, Е.Д. Галкина, Л.Н. Мазунова // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2021. № 1 (132). С. 14-23.
7. **Елисеев, М.Е.** Статистический и корреляционный анализ погодных факторов в интерактивной информационной системе повышения безопасности дорожного движения / М.Е. Елисеев, Л.Н. Мазунова, И.Н. Елисеева // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2020. № 2 (129). С. 28-41.
8. Госавтоинспекция [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Режим доступа: <http://stat.gibdd.ru/>, дата обращения 17.10.2021.
9. Российская Газета [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://rg.ru/2009/09/23/nurgaliev.html>, дата обращения 17.10.2021.
10. **Daito, Kodama** Real Time Accident Risk Information Provision on a Urban Expressway Network: Prediction Model Analysis and Development of a Provision System / Kodama Daito, Ozawa. // Proceedings of the 51st Spring Conference of the Committee of Infrastructure Planning and Management, 2015.
11. **Khan, G.** Application and Integration of Lattice Data Analysis, Network K-Functions, and Geographic Information System Software to Study Ice-Related Crashes / G. Khan, K.R. Santiago-Chaparro, X. Qin, D.A. Noyce // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2136, 2009. P. 67-76.
12. **Paz Alexander** Traffic and Driving Simulator Based on Architecture of Interactive Motion / Alexander Paz, Naveen Veeramisti, Romesh Khaddar, Hanns de la Fuente-Mella, Luiza Modorcea // The Scientific World Journal, vol. 2015, Article ID 340576, 9 pages, 2015.
13. **Espie, S.** A hybrid traffic model coupling macro and behavioural micro simulation / S. Espie, D. Gattuso, F. Galante // Proceedings of the 85th Annual Meeting Transportation Research Board; January 2006, Washington, DC, USA.

*Дата поступления  
в редакцию: 09.11.2021*

УДК 004.045

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_17

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИНЦИПА РАЗДЕЛЕНИЯ ИНТЕРФЕЙСОВ

**С.В. Логанов**

ORCID: 0000-0002-7302-4586 e-mail: loganovserg@yandex.ru

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

Проанализирован принцип разделения интерфейсов и его применение для классов, расположенных в одном или нескольких компонентах. Показано, что первоначальная формулировка принципа разделения интерфейсов справедлива только для классов, расположенных в различных компонентах. В качестве принципа проектирования классов принцип разделения интерфейсов необходимо рассматривать как поддержку принципа LSP. Разделение интерфейсов позволяет исключить из них методы, реализация которых не всегда возможна, тем самым предотвратив нарушение принципа LSP.

**Ключевые слова:** объектно-ориентированное программирование, принципы SOLID, принцип ISP, принцип LSP, иерархия классов, повторное использование, обобщение/специализация.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Логанов, С.В. Особенности применения принципа разделения интерфейсов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 1. С. 17-23. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_17

## APPLICATION FEATURES OF THE INTERFACE SEGREGATION PRINCIPLE

**S.V. Loganov**

ORCID: 0000-0002-7302-4586 e-mail: loganovserg@yandex.ru

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

**Abstract.** Interfaces separation principle and its use for classes located in one or several components, are analyzed. It is shown that the initial formulation of the interfaces separation principle is true only for classes located in different components. As a class design principle, the interfaces separation principle should be considered as support for the LSP principle. Separation of interfaces makes it possible to exclude methods, the implementation of which is not always possible, and thereby to prevent the breach of LSP principle.

**Key words:** object-oriented programming, SOLID principles, ISP principle, LSP principle, class hierarchy, reuse, generalization/specialization.

**FOR CITATION:** Loganov S.V. Application features of the interface segregation principle. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №1. Pp. 17-23. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_17

### Введение

В настоящее время принципы SOLID являются основой для разработки структуры классов любой информационной системы. Одним из них является принцип разделения интерфейсов (Interface Segregation Principle ISP), сформулированный Р. Мартином следующим образом: клиенты не должны вынужденно зависеть от методов, которыми не пользуются [1]. Принципы SOLID позиционируются как принципы гибкого проектирования классов, поскольку принципы проектирования компонентов выделены в отдельную группу [2-4]. Принцип разделения интерфейсов был обозначен Р. Мартином при консультировании фирмы Херох по разработке широкой функциональности программных компонентов принтеров [5]. Таким образом, будучи изначально применен для классов, расположенных в различных ком-

понентах, он был сформулирован как принцип гибкого проектирования для любых классов. Отсутствие указаний о местоположении классов приводит к неоднозначному пониманию принципа разделения интерфейсов.

### Особенности применения

Для демонстрации принципа разделения интерфейсов для классов безотносительно их местоположения в [1, 2] приведен достаточно противоречивый пример с дверями системы безопасности, в котором используется наследование интерфейса Door от интерфейса TimerClient, что явно противоречит основному принципу наследования. Кроме этого, совершенно надуманный пример демонстрации принципа ISP с точки зрения классов, располагаемых в рамках одного компонента, приведен в [3]. Согласно ему, три класса User1, User2 и User3 пользуются операциями некоторого класса OPS. При этом класс User1 использует только операцию op1, User2 — только op2 и User3 — только op3 (рис. 1) [3].

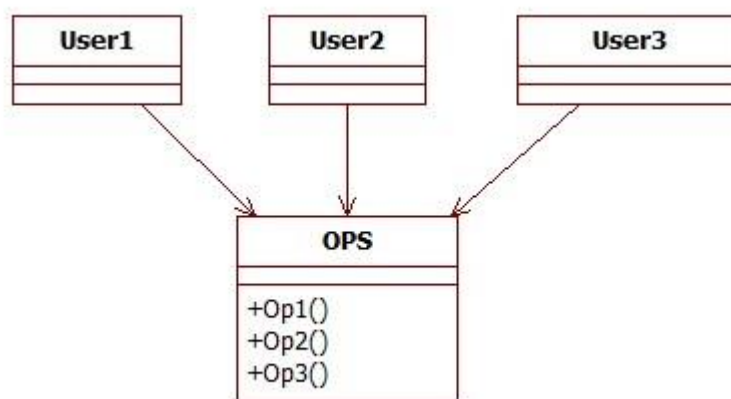


Рис. 1. Структура классов без использования интерфейсов

Fig. 1. Class structure without using interfaces

«Очевидно, что в такой ситуации исходный код User1 непреднамеренно будет зависеть от op2 и op3 даже при том, что он не пользуется ими. Эта зависимость означает, что изменения в исходном коде метода op2 в классе OPS потребуют повторной компиляции и развертывания класса User1, несмотря на то, что для него ничего не изменилось» [3]. Совершенно очевидно и то, что если все указанные классы расположены в одном компоненте, то они компилируются и развертываются совместно и требование повторной компиляции здесь является не применимым. Также очевидно, что все клиенты данного класса непреднамеренно зависят не только от неиспользуемых публичных методов, но и от частных методов их реализации, которые используют публичные методы. Ввод дополнительных отдельных интерфейсов (рис. 2), как рекомендовано в [3], никоим образом не изменяет данные зависимости.

Классы User1, User2, User3 в данной ситуации по-прежнему зависят от состояния объекта класса OPS, только данная зависимость становится еще более завуалированной. Использование различных объектов класса OPS позволяет существенно уменьшить зависимость от текущего состояния конкретного объекта OPS, однако данное действие не возбраняется и для исходной структуры классов. Кроме этого, если класс OPS не требует сложных методов инициализации, то классы в первоначальном варианте для снижения влияния текущего состояния сами могут решить вопрос создания нового экземпляра класса, что принципиально невозможно для варианта с интерфейсами. Таким образом, введение дополнительного слоя интерфейсов лишь усложняет и затуманивает восприятие программного кода при условии расположения всех классов в одном компоненте.



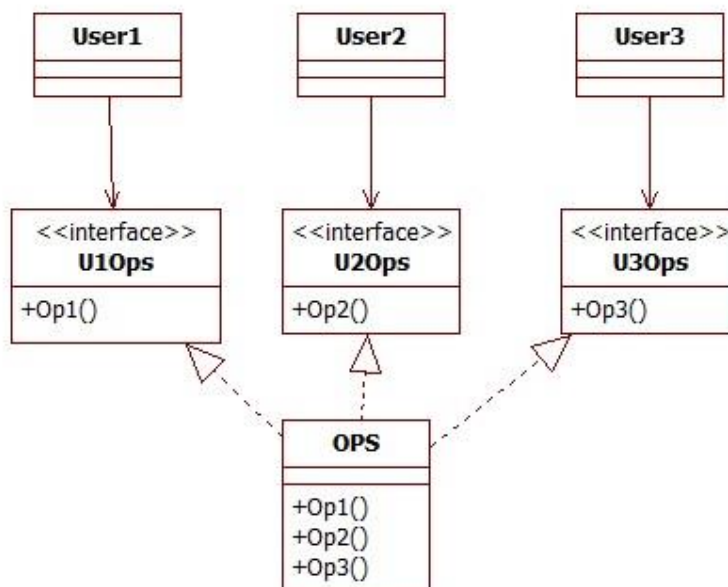


Рис. 2. Структура классов с использованием разделения интерфейсов

Fig. 2. Class structure using interface segregation

Наличие у класса OPS в том же самом компоненте трех клиентов, которые независимо используют лишь им необходимые методы, как правило, свидетельствует о нарушении однородности (низком зацеплении) методов класса и нарушении им принципа единственности ответственности. Таким образом, класс OPS необходимо просто разделить на три класса с соответствующими интерфейсами, а при необходимости для них общей информации предоставить им один экземпляр совместно используемого класса (рис. 3).

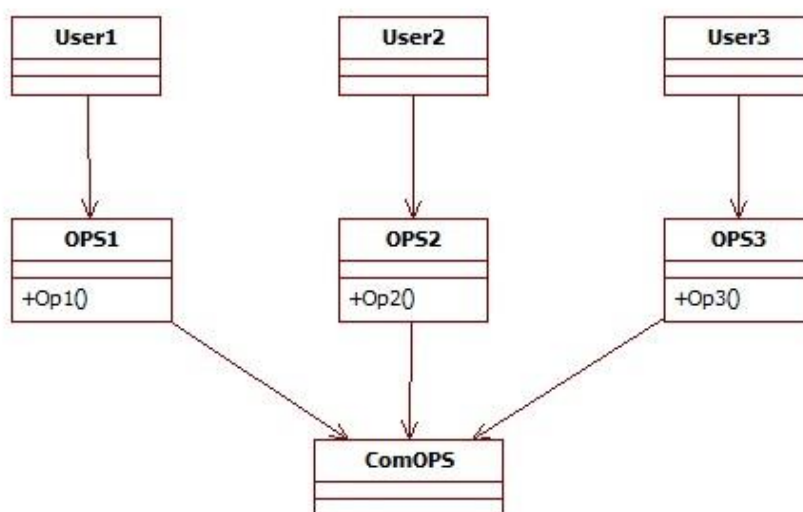


Рис. 3. Структура классов, соответствующих принципу единственности ответственности

Fig. 3. The structure of classes corresponding to the single responsibility principle

Если же разнести указанные классы по различным компонентам (рис. 4), ситуация кардинально меняется, и основным требованием становится обеспечение независимости напрямую не связанных между собой компонентов. Изменение же требований, например, к

классу User3 означает, что требуются изменения в исходном коде метода op3 класса OPS, которые потребуют повторной компиляции и развертывания компонентов CompU1 и CompU2, несмотря на то, что для классов User1 и User2 ничего не изменилось.

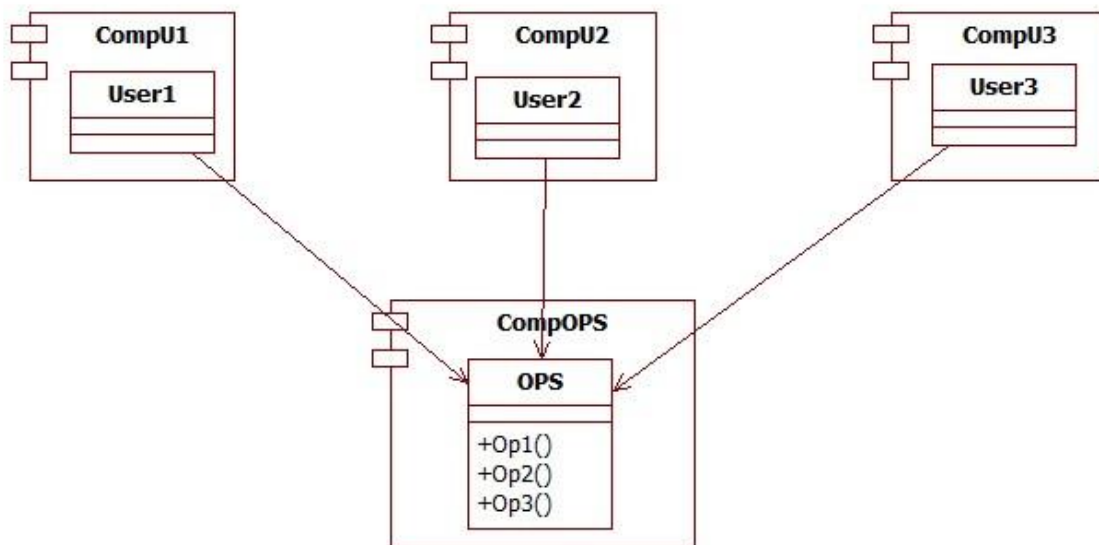


Рис. 4. Отношения классов, расположенных по различным компонентам

Fig. 4. Relationships of classes located on various components

Эта проблема действительно решается разделением операций по различным интерфейсам (рис. 5). Однако разделение интерфейсов лишь на основе заранее неизвестного количества внешних компонентов, которые будут использовать разрабатываемый компонент, невозможно и просто бессмысленно. Поэтому для компонентов необходимо разрабатывать интерфейсы, обеспечивающие выполнение каждой значимой извне узкоспециализированной задачи. Примером такого разделения могут служить узкоспециализированные интерфейсы IDbConnection, IDbCommand, IDataReader библиотеки ADO.NET, обеспечивающие независимость ее клиентов от конкретного провайдера данных. Таким образом, если класс обладает сфокусированными и однородными обязанностями и имеет единственную ответственность, то его клиентам, расположенным в том же компоненте, как правило, необходимы большинство его методов или же такая необходимость с высокой долей вероятностей появится при совершенствовании и развитии данного компонента. И введение промежуточного слоя в виде интерфейсов лишь усложняет разработку, затуманивает понимание структуры и затрудняет поддержку и развитие компонента. Проектирование класса как некоего набора независимых групп операций, а не как цельной однородной сущности, обладающей единственной ответственностью, требует проведения рефакторинга, а не ввода дополнительных сущностей, пытающихся скрыть этот факт. Далее в [1, 2] приводится пример с применением пользовательского интерфейса банкомата, реализованного с помощью экрана, брайлевского планшета или синтезатора речи, которые очевидно располагаются в различных компонентах. Кроме того, достоинства приведенного решения в полной мере проявляются при размещении транзакций банкомата по внесению, снятию и переводу наличных денег в различных компонентах. Таким образом, эффективность принципа разделения интерфейсов достаточно наглядно продемонстрирована для классов, расположенных в различных компонентах. Следовательно, данный принцип логичнее использовать при распределении классов по различным компонентам.

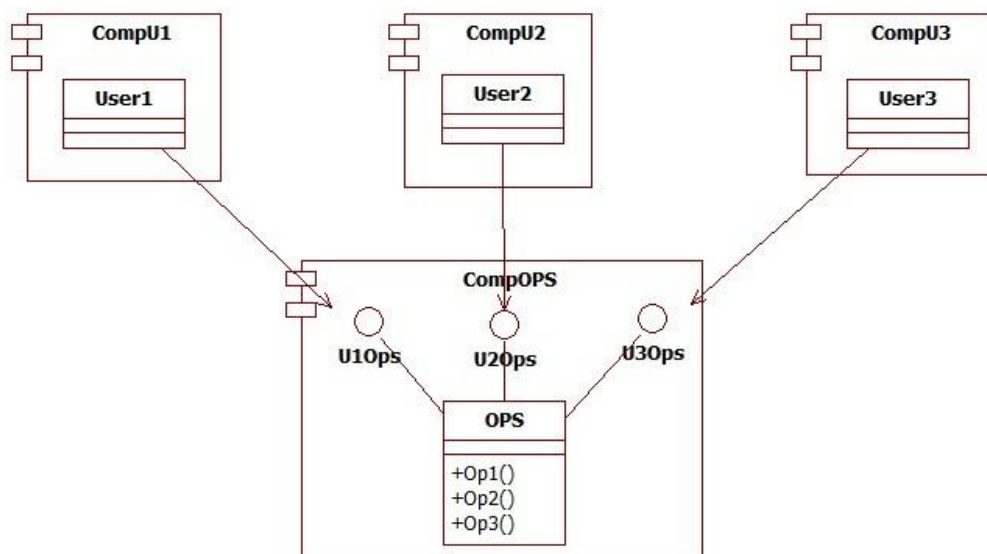


Рис. 5. Взаимодействие классов через отдельные интерфейсы

Fig. 5. Interaction of classes through segregate interfaces

Однако, с другой стороны, если класс выполняет достаточно сложную функциональность, а для полноценной ее реализации требуется предоставление ряда услуг, для независимой работы такого класса может быть определен достаточно «жирный» интерфейс. Реализацию такого интерфейса должен предоставить клиент, пользующийся услугами данного класса. При этом возможна ситуация, когда какой-либо клиент частично использует функциональность такого класса и принципиально не может обеспечить реализацию некоторых методов его «жирного» интерфейса. Таким образом, если классом возможно частичное предоставление услуг, но для этого требуется реализация «жирного» интерфейса, которую невозможно выполнить целиком всем клиентам, то такой интерфейс должен быть разделен.

Например, если в целях повышения безопасности требуются операции для переименования и (или) изменения владельца файлов различных операционных систем, то создается следующий интерфейс [4]:

```
public interface FileInterface
{
    void rename(string OldName, string NewName);
    void changeOwner(string user, string group);
}
```

Может показаться очевидным, что у файла всегда есть имя и владелец, и их можно изменить. Однако, если потребуется использовать данный интерфейс для изменения владельцев файлов облачного хранилища, что принципиально невозможно, то реализация функции change Owner в классе потомке становится также невозможной. Поэтому данный интерфейс необходимо разделить на два более узкоспециализированных интерфейса:

```
public interface FileInterface
{
    void rename(string OldName, string NewName);
}
public interface FileOwnerInterface : FileInterface
{
    void changeOwner(string user, string group);
}
```

Вместе эти интерфейсы образуют иерархию файловых типов (рис. 6). Сначала идет универсальный файловый тип, определяемый с помощью FileInterface, и содержащий только метод для переименования. Затем идет подтип файлов, владельца которого можно изменять.

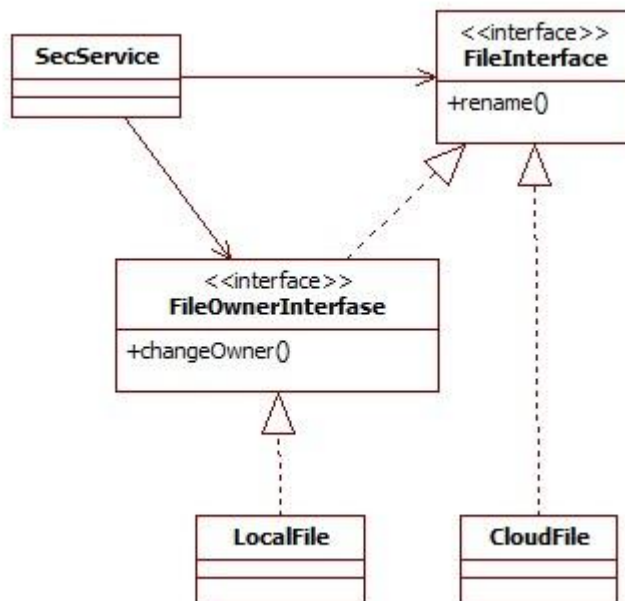


Рис. 6. Раздельные интерфейсы иерархии файловых типов

Fig. 6. Segregate interfaces of the file type hierarchy

В данном случае интерфейс FileOwnerInterface обязывает исполнять и FileInterface, поскольку предполагается, что все без исключений файлы могут быть переименованы. Однако возможна ситуация, когда части исходного интерфейса достаточно независимы, тогда разделенные интерфейсы также могут быть независимыми. В данном случае классы-реализаторы могут выбирать наследовать либо один, либо сразу два интерфейса в зависимости от их ответственности.

Первоначально идея FileInterface заключалась в том, чтобы представить некие действия («переименовать» и «изменить владельца»), которые подойдут для любого файла независимо от места его расположения, в виде единого интерфейса. Пытаясь абстрагироваться от подробностей выполнения этих операций для конкретных файлов, сделали неверное предположение, согласно которому любая реализация FileInterface сможет обеспечить значимые реализации всех методов этого интерфейса. Однако, когда потребовалась реализация FileInterface для файлов, расположенных в облаке, это предположение оказалось неверным. Таким образом, FileInterface – это неправильное обобщение понятия «файл» и его необходимо модернизировать. Поэтому, если при определении интерфейса существует вероятность, что некоторые из его методов смогут реализовать не все клиенты, такой интерфейс необходимо разделить на более специализированные интерфейсы.

Таким образом, принцип разделения интерфейсов для классов следует рассматривать как противоположность принципа LSP (Liskov Substitution Principle) в том смысле, что в LSP классы-потомки не должны преподносить сюрпризы клиентам базового класса, а согласно принципу ISP – определение интерфейсов клиентами не должно преподносить сюрпризы в виде «жирных» интерфейсов, которые смогут реализовать не все классы-потомки. Наличие такого «жирного» интерфейса неизбежно приводит к нарушению принципа LSP теми классами-реализаторами, которые принципиально не могут предложить значимую реализацию для всех его методов.

## Выводы

Принцип разделения интерфейсов следует относить как к принципам проектирования классов, так и к принципам проектирования компонентов. Первоначальная формулировка наглядно и убедительно продемонстрирована на примерах при расположении классов по различным компонентам.

Как принцип проектирования классов принцип разделения интерфейсов направлен на поддержание принципа LSP. Он позволяет предотвратить нарушение принципа LSP, когда класс выполняет некоторые обязанности, для независимой реализации которых требуется выполнение дополнительных сопутствующих услуг. Разработка нескольких специализированных интерфейсов позволяет полностью или частично использовать функциональность данного класса, выбирая реализацию соответствующих интерфейсов.

## Библиографический список

1. **Martin, R.C.** Agile software development: principles, patterns, and practices: / R.C. Martin. – Person Education, Inc, 2003. – 529 p.
2. **Мартин, Р.** Принципы, паттерны и методики гибкой разработки на языке C#: / Р. Мартин, М. Мартин – СПб.: Символ-Плюс, 2011. – 768 с.
3. **Мартин, Р.** Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения / Р. Мартин. – СПб.: Питер, 2018. — 352 с.
4. **Нобак, М.** Принципы разработки программных пакетов: Проектирование повторно используемых компонентов / М. Нобак. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 274 с.
5. **Janssen, T.** SOLID Design Principles Explained: Interface Segregation with Code Examples [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://stackify.com/interface-segregation-principle> (дата обращения: 29.09.2021).

*Дата поступления  
в редакцию: 23.11.2021*



УДК 681.518.2

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_24

## ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМАТИКА В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ И БЕЗОПАСНОСТЬЮ СОСТОЯНИЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**С.А. Манцеров**

ORCID: 0000-0001-8458-8259 e-mail: mca\_9@nntu.ru

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

Рассматривается применение модифицированных методов функциональной систематики для идентификации и дальнейшего управления показателями качества и безопасности состояний сложных технических объектов. Предлагается подход к комплексной оценке экологической безопасности на основе множества единичных показателей, которые формируются в результате декомпозиции и детального анализа объекта утилизации. Определяются коэффициенты разборки, применяемости, рециклинга и утилизации. Проводится обобщенная оценка утилизационной способности изделия на основе единого показателя экобезопасности. Использование модифицированных методов функциональной систематики для кодификации и поиска объектов-аналогов как объектов-функционалов, объектов, подвергающихся воздействию и факторов внешних воздействий, позволяет организовать эффективный поиск эквивалентов при условии наличия базы систематизированных объектов. Особенностью баз данных, основанных на методах функциональной систематики, является неоднократная запись одного и того же объекта в зависимости от выполняемой роли (объект-функционал; объект, на который оказывается воздействие; объект внешних воздействий). Предлагаемая модификация таксономической модели функциональной систематики обеспечивает возможность записи вектора состояния сложного технического объекта. Рассмотрена практическая реализация методов модифицированной функциональной систематики для сложных технических объектов на примере металлорежущего оборудования.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, функциональная систематика, базы данных, классификация, таксон, технический объект, состояние, сложная структура.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Манцеров, С.А. Функциональная систематика в управлении качеством и безопасностью состояний сложных технических объектов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 1. С. 24-31.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_24

## FUNCTIONAL SYSTEMATICS IN QUALITY MANAGEMENT AND SAFETY OF STATES OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

**S.A. Mantserov**

ORCID: 0000-0001-8458-8259 e-mail: mca\_9@nntu.ru

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

**Abstract.** Use of functional systematics modified methods for identification and further management of quality and safety indicators of states of complex technical objects is considered. Approach to comprehensive assessment of environmental safety is proposed based on a set of single indicators that are formed as a result of decomposition and detailed analysis of disposal object. Coefficients of disassembly, applicability, recycling and disposal are determined. Generalized assessment of disposal capacity of the product is carried out based on environmental safety single indicator. Use of functional systematics modified methods for codification and search of analog objects as functional objects, affected objects, and external influence factors, allows to organize an effective search for equivalents, provided that a database of systematized objects database is available. A distinctive feature of databases based on functional systematics methods is the repeated recording of the same object depending on the role performed (functional object; object that is affected; object of external influences). Proposed modification of the functional systematics taxonomic model provides a possibility of recording the vector of a complex technical object state. Practical implementation of modified functional systematics methods for complex technical objects on the example of metal-cutting equipment, is considered.

**Key words:** environmental safety, functional systematics, databases, classification, taxon, technical object, state, complex structure.

**FOR CITATION:** S.A. Mantserov. Functional systematics in quality management and safety of states of complex technical objects. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №1. Pp. 24-31.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_24

## Введение

В сравнении с традиционными направлениями, современное наукоемкое производство предъявляет значительно более высокие требования к качеству и безопасности состояния технических и технологических объектов. Это обусловлено высокой долей НИОКР, ускорением сроков разработки и вывода новых продуктов на рынок, жесткими требованиями к экологической безопасности продукции и производственных процессов. Возникает необходимость в едином системном подходе к управлению качеством и безопасностью технических и технологических объектов, а также к оценке его технического состояния. Для этого используют показатели качества, т.е. количественные и качественные характеристики свойств объекта, рассматриваемые применительно к этапам разработки, производства или эксплуатации объекта сложной структуры.

Обеспечение эксплуатационной способности сложного технического объекта достигается за счет управления его техническим состоянием, связанных с рядом трудностей. С одной стороны, многие современные сложные технические и технологические объекты характеризуются отсутствием или недостаточной пригодностью к контролю технического состояния (диагностированию). С другой стороны, отсутствует общий системный подход для определения технического состояния сложного объекта при обработке и дальнейшем анализе разнородной информации – множества параметров разного типа, описывающих его техническое состояние. При этом для промышленного технического оборудования задача определения технического состояния часто является невозможной. Это связано с недоступностью получения значений многих параметров в процессе эксплуатации промышленного оборудования. Таким образом, процесс определения состояний сложных технических объектов для эффективного управления качеством требует системного подхода.

При этом промышленные технические и технологические объекты в подавляющем большинстве случаев являются потенциальными источниками опасности. На первый план выходят проблемы соответствия промышленного производства современным экологическим требованиям, соблюдения норм безопасности. Их решение невозможно без обеспечения экологической безопасности (*экобезопасности*) состояния технических и технологических объектов. Данная задача, прежде всего, направлена на реализацию мероприятий, обеспечивающих допустимое воздействие факторов экологической опасности сложных технических объектов на окружающую среду и человека, что не может быть достигнуто без утилизируемости объектов по истечении срока эксплуатации, выхода из строя или ликвидации. Учитывая современную тенденцию ускорения технологического развития и увеличения наукоемкого оборудования, что ведет к уменьшению периодов обновления технических и технологических объектов, можно утверждать, что в настоящее время возникла необходимость в новых подходах к данной проблеме, а именно: предотвращении негативных воздействий на окружающую среду, а не борьбы с последствиями. Решению данной проблемы может способствовать разработка метода систематизации экобезопасных технических или технологических объектов. Ключевой особенностью метода должна являться возможность классификации разнородной слабоструктурированной информации с учетом воздействий объектов сложной структуры на окружающую среду. Возникает острая необходимость в создании системы классификации, позволяющей охватить все обширное пространство разнородных объектов, идентифицировать набор их состояний, а также степень взаимодействия с окружающей средой (экобезопасность).

### Теоретический анализ

Основы функциональной систематики (ФС) базируются на концепции функциональных воздействий, в соответствии с которой «процессы, реализуемые в материальном производстве, в экологии, в научных исследованиях, представляются как взаимодействие минимум двух материальных объектов, совершаемое в рамках определенной среды. Концепция функциональных воздействий реализуется в принципе применимости» [1]. Одним из основополагающих принципов движения материи является функциональное воздействие. Систематика служит основой деления технических и технологических объектов на иерархию систем и подсистем. Для обозначения служебных целевых функций, введем наименование «исходные», для объектов, взаимодействующих с главным объект-функционалом (далее – ОФ).

На рис.1 изображена такая функциональная система, где ОФ –  $R_i$ , объект  $V_i$ , который принимает воздействие от ОФ, а факторы внешней среды обозначаются  $B_a$ .

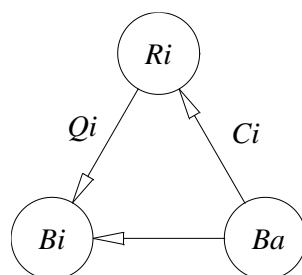


Рис. 1. Структура функциональных систем [2]

Fig. 1. Structure of functional systems [2]

Технические объекты определяют функциональные воздействия  $R_i$  и характеризуют влияние на исходные объекты. ОФ ( $R_i$ ) подразделяются на:

- 1) вещественные объекты  $M_i$ ;
- 2) поля, волны и микрочастицы-функционалы  $T_i$ ;
- 3) энергию-функционал  $J_i$ ;
- 4) процессы-функционалы  $P_i$ .

ОФ  $R_i$  влияет на исходный объект, при помощи заданной служебной функции  $F_i$  (функциональная связь  $R_i - V_i$ ), что можно отобразить следующим образом (1):

$$R_i \rightarrow F_i \rightarrow V_i \quad (1)$$

где  $R_i$  – объект, определяющий функциональные воздействия;  $F_i$  – служебная функция;  $V_i$  – исходный объект, подвергающийся воздействию.

Степень совместимости объектов можно отразить в виде зависимых связей  $B_a - R_i$  и  $B_a - V_i$  (рис. 1). Дополнительно они демонстрируют взаимодействие с факторами внешней среды. Вышепредложенная совместимость определяется собственным критерием ( $C_i$ ). Норма совместимости с внешней средой (критерий  $C_i$ ), определяется материальными объектами-факторами внешней среды ( $B_a$ ):  $C_i(B_a)$ .

Объекты в зависимости от поставленной задачи могут быть представлены:

- 1) ОФ;
- 2) объектами, на которые оказывается воздействие;
- 3) объектами внешней среды.

Все взаимодействия осуществляются в процесс-функционалах (внешняя среда, ОФ, исходные объекты) –  $R_i$ . Объекты-факторы внешней среды реализуют только служебную функцию –  $F_i$ .

### Методика

В соответствии с общим подходом, таксономия – теория систематики. Принципы и основы декомпозиции в ФС характеризуются таксономической моделью, имеющей четкую структуру функциональных формул. На рис. 2. наглядно представлена одна из таких структур материаловедческой систематики для сферы, которая затрагивает пространство материального производства, где [3]:

- $R_i$  – объекты и процессы, определяющие функциональные воздействия;
- $Q_{ijkl}$  – служебные функции; где  $(B_i, V_i)$  – мерон исходного объекта;
- $(B_i, V_i)$  в позиции перед правой квадратной скобкой – мероны факторов внешней среды;
- $(B_i, V_i)$  в позиции после правой квадратной скобки – мерон морфологического образа ОФ;
- $C_{ij}$  – факторы внешней среды (критерии).

По формулам можем определить отношение либо принадлежность объекта и процесса, классифицированного в системе, к выбранному таксону, а также способность объектов в условиях влияния внешней среды выполнять определенные служебные функции. Образец базовой (таксономической) модели ФС представлена на рис. 2. С некоторыми непринципиальными уточнениями, как показано ниже, модель используется в экологической классификации. Суть изображенной модели – последовательное увеличение представленной формулы за счет прибавления к делимому формулы основания.

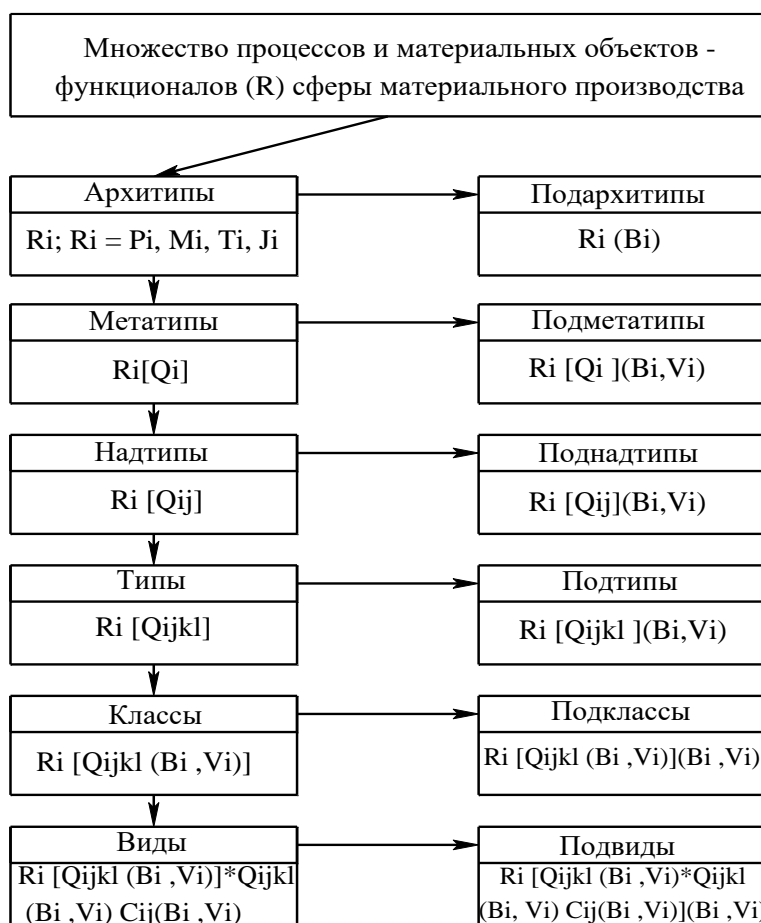


Рис. 2. Таксономическая модель процессов и объектов сферы материального производства [3]

Fig. 2. Taxonomic model of processes and objects in the sphere of material production [3]

Все пространство ОФ, объектов и процессов-функционалов делится на подвиды (только физическая сфера):

- Р – процессы, определяющие функциональные воздействия;
- М – вещественные объекты, реализующие функциональные воздействия;
- Т – поля, волны, излучения, микрочастицы и элементарные частицы-функционалы;
- J – энергия, определяющая функциональные воздействия.

Осуществление определенных служебных функций выполняется техническими и технологическими объектами сложной структуры, которые могут подвергаться декомпозиции. Таким образом, объекты сложной структуры декомпозируются на составные узлы, агрегаты, компоненты и конструкционные материалы. Последние используются для изготовления конструкций, невыполняющих иного функционального назначения. Главное отличие технических и технологических объектов от материалов и веществ – отсутствие размерной величины, весь учет осуществляется в штуках или других единицах. Для веществ, наоборот, фиксируются все размерные характеристики, у материалов один из параметров может быть свободным.

Представлена таксономическая модель (рис. 2), в соответствии с которой весь ряд функциональных процессов и объектов-функционалов делится на надтаксоны, таксоны и подтаксоны. Предлагается внести изменения в стандартную запись таксономической модели (1), для записи количественных характеристик объекта, прежде всего вектора состояний (2):

$$R_i[Q_{ijkl}(B_i, V_i) * Q_{ijkl}(B_i, V_i) C_{ij}(B_i, V_i)](B_i, V_i)(S_i(B_i, V_i), S_i(B_i, V_i), \dots) \quad (2)$$

где S – таксон характеристик ОФ, i – номер параметра, (B<sub>i</sub>, V<sub>i</sub>) после S<sub>i</sub> – мерон значения ОФ.

При этом предусмотрена возможность включения в модифицированную таксономическую модель комплексного показателя экобезопасности, который добавляется в формулу ОФ, например, M6[Q1.12.4.1(B5.11.1) C1.5(A)] (S<sub>i</sub>(L6.1)), где (S<sub>i</sub>(L6.1)) – таксон состояния объекта, значение которого характеризует комплексный показатель экобезопасности объекта L6.1. Показатель мерона S указывается без запятой (трехзначное значение).

Необходимо провести оценку параметров всех составных элементов для получения оценки вектора состояний сложных технических объектов. Для технического объекта сложной структуры (рис. 3), необходимо придерживаться иерархической системы. В качестве такого показателя можно использовать индекс технического состояния (ИТС) [3], который так же, как и комплексный показатель экобезопасности, может быть добавлен в виде таксона состояния объекта в формулу ФС.

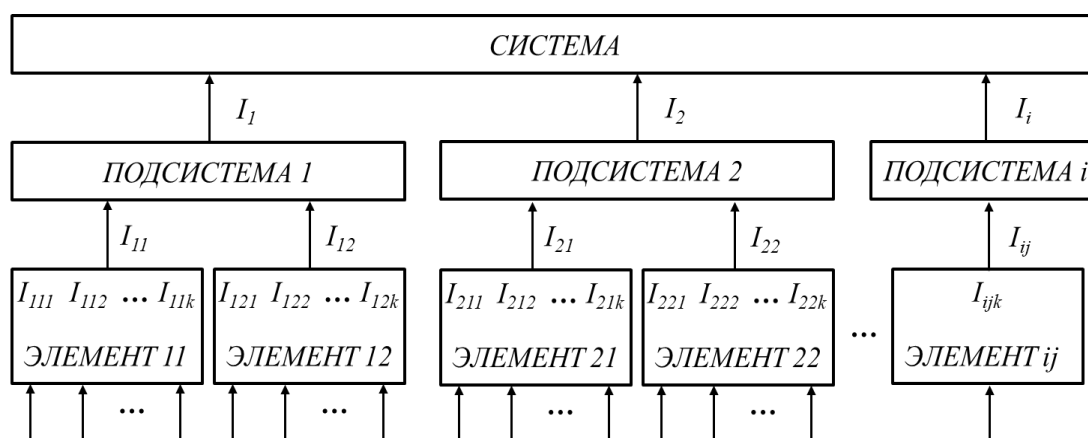


Рис. 3. Модель сложного технического объекта

Fig. 3. Model of complex technical object

Использование модифицированных методов ФС для кодификации и поиска объектов-аналогов (ОФ, объектов, подвергающихся воздействию и факторов внешних воздействий) позволяет организовать эффективный поиск эквивалентов. Безусловно, данный алгоритм осуществим и работает при условии наличия базы систематизированных объектов. При этом один и тот же объект может быть указан в базе ФС неоднократно.

### Экспериментальная часть

В качестве решаемой задачи рассматривается применение методов модифицированной ФС для промышленного технологического оборудования. Применительно к машиностроительной сфере анализируются основные концепции в форме таксономии выбранных объектов и процесс-функционалов сферы металлообработки, экологии, смазывающе-охлаждающих жидкостей (СОЖ). Проводится анализ состава и структуры функциональных систем, которые образуют рассматриваемый объект сложной структуры.

В качестве ОФ выбрано металлообрабатывающее станочное оборудование (МС), исходным объектом, на который оказывается воздействие – обрабатываемая заготовка-деталь (Д), объект внешней среды – СОЖ (рис. 4).

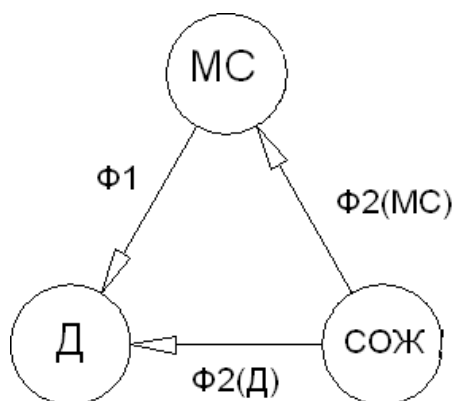


Рис. 4. Функциональная система металлообрабатывающего оборудования

Fig. 4. Functional system of metal-working equipment

Воздействия ОФ на исходный объект (функциональная связь МС – Д), происходят для реализации указанной функции Ф1. Данную зависимость можно охарактеризовать записью (3):

$$\text{МС} \rightarrow \text{Ф1} \rightarrow \text{Д} \quad (3)$$

Здесь служебной функцией выступает обработка детали. Функциональные связи Ф2(МС) и Ф2(Д) определяют совместимость ОФ с объектами-факторами внешней среды – СОЖ. Совместимость выражена критерием совместимости К. В зависимости от реализуемых служебных функций материальный объект может выступать любым объектом рассматриваемой системы: оказывающим или принимающим воздействие. Систематизируемый объект всегда рассматривается в качестве ОФ-объекта, предназначенного для реализации служебной функции в установленных условиях взаимного обмена с факторами внешней среды. В данном случае обрабатываемая заготовка-деталь из металла Д – исходный объект, по которому определяется морфология служебных функций.

Служебные функции реализуются в процессах-функционалах П. Полученная структура – основа для разбиения большого числа ОФ и процессов на иерархические группы – таксоны, объединенные общими признаками.

В функциональной компьютерной классификации токарный горизонтальный станок 16A20Ф3 в качестве ОФ может быть записан в следующем виде: М6[Q2.13.7.2(A5.16.11.4)C2.7(B)], где М6 – машины и оборудование, Q2.13.7.2 – для технологических преобразований в производстве, А5.16.11.4 – токарные станки для точения заготовок из металла, С2.7 – диаметр обработки 300-800 мм, В – расположение горизонтальное.

На основе предложенной методики разработан программный комплекс «Тахон», который может использоваться как для создания формул ФС, так и для дальнейшей их расшифровки. Также предусмотрена возможность дальнейшей его интеграции в современные системы управления базами данных (рис. 5).

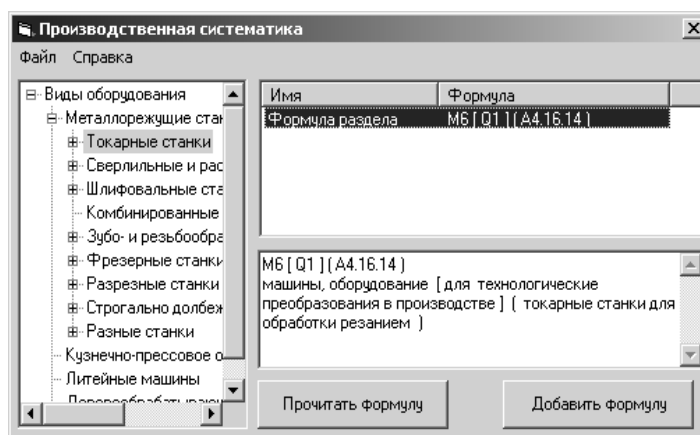


Рис. 5. Пример записи формулы в каталогах производственной систематики

Fig. 5. Example of writing a formula in catalogues of production systematics

### Результаты и выводы

В настоящее время все системы классификации, от самых распространенных (универсальная десятичная классификация и Международная классификация изобретений) до менее известных (библиотечно-библиографическая классификация), приводят к усилению и расширению тенденции разобщенности знаний всех систем, что будет препятствовать объективности оценочных суждений возможности применения на практике разных объектов и процессов материального производства и их взаимного действия друг на друга. Недостатки современных систем, задачей которых является классификация объектов, включают игнорирование:

- 1) структурных особенностей объектов;
- 2) особенностей взаимодействий;
- 3) способности выполнения объектом определенных функций в заданных условиях.

В свою очередь, вышесказанные факторы оказывает существенное влияние на эффективность поисковых механизмов в области материального производства и обеспечения. Сохранение преемственности стадий жизненного цикла и единства применения классификатора – главные и основополагающие условия эффективности применения классификационных систем. Естественно, что максимальная результативность процессов классификации достигается при комплексном изучении всех нюансов автоматизации поисковых механизмов. Ее необходимость резко возрастает при увеличении номенклатуры и уменьшении партийности промышленных изделий. Модифицированная ФС выделяется из известных систематизаций следующими показателями:

- 1) широким охватом классификационного поля;

2) ориентацией на включение показателей качества и безопасности состояний технических и технологических объектов;

3) информационно-поисковым языком;

4) долгосрочным целевым использованием.

Систематика охватывает все сферы жизнедеятельности человечества – от материалов и различных видов энергии до научной деятельности, документооборота, изучения носителей информации. О необходимости применения нового вида классификации говорит тенденция современных классификаторов к ухудшению (или деградации) имеющихся знаний. Напротив, ФС – толчок к развитию науки и техники. В существующих классификациях технических и технологических объектов (Общероссийский классификатор продукции (ОКП), единая система классификации и кодирования информации (ЕСКК), товарная номенклатура внешнеэкономической деятельности (ТН ВЭД) и др.) все изделия классифицируются, прежде всего, в соответствии с морфологическими свойствами (наименование). Но показатели, характеризующие качество и безопасность технических и технологических объектов (качественные и количественные признаки), не учитываются.

Современный подход неприменим для промышленных сфер (материаловедение, строительство и производство технического оборудования). Огромным дополнительным преимуществом предложенной системы является восприятие на всех естественных языках. Разработка автоматизированной системы классификации технических и технологических объектов, включающей данные их состояний, является важной задачей для промышленных предприятий. На основе модифицированных методов ФС возможно построение подобной системы, которая позволяет охватить все пространство материальных и нематериальных объектов, что имеет особенное значение при систематизации экологических факторов.

### Библиографический список

1. **Манцеров, С.А.** Развитие системы единой функциональной систематики для хранения данных о техническом состоянии объекта / С.А. Манцеров, А.Ю. Панов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 6. Ч. 1. С. 235-238.
2. **Бреховских, С.М.** Функциональная компьютерная систематика материалов, машин, изделий и технологий / С.М. Бреховских, А.П. Прасолов, В.Ф. Солинов. – Москва: Машиностроение, 1995. – 551 с.
3. **Манцеров, С.А.** Создание баз данных объектов машиностроения на основе формул функциональной систематики // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. 2007. Т. 3. № 11. С. 171-176.
4. **Gavriliuk, E.A.** Fuzzy Reliability Model of Systems for Decision Support in Technical Diagnostics [Electronic resource] / E.A. Gavriliuk, S.A. Mantserov / CEUR Workshop Proceedings. – Electronic text data. – 2018. – Vol. 2258. – P. 222–234. Mode of access: <http://ceur-ws.org/Vol-2258/paper28.pdf>. – Title from screen.
5. **Клячкин, В.Н.** Автоматизированная система диагностики технического состояния объекта с использованием агрегированных классификаторов / В.Н. Клячкин, Д.А. Жуков // Надежность и качество сложных систем. – 2020. – № 4 (32). – С. 50-57.
6. **Leukert, K.** Transferability of knowledge-based classification rules / K. Leukert, ISPRS2004, Istanbul. 2004.
7. **Savchenko, L.V.** Classification of a Sequence of Objects with the Fuzzy Decoding Method / L.V. Savchenko // Lecture Notes in Artificial Intelligence. 2014. Vol. 8536. P. 309-318.
8. PR 50.1.019-2000 Main provisions of the unified system of classification and coding of technical, economic and social information and standardized documentation systems in the Russian Federation
9. **Mishanov, R.O.** Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system [Reliability and quality of complex systems] / R.O. Mishanov. 2019, no. 4 (28), pp. 112-117.
10. ОК 005-93 National Classification of products.

*Дата поступления  
в редакцию: 23.01.2022*



## АНАЛИЗ И МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ МЕЖДУ ДВУМЯ ПЛОСКОСТЯМИ ПРИ БОЛЬШИХ ТОКАХ

**Е.А. Михайлов**

ORCID: 0000-0002-9747-4039 e-mail: [ea.mikhajlov@physics.msu.ru](mailto:ea.mikhajlov@physics.msu.ru)

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

*Москва, Россия*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

*Москва, Россия*

**А.П. Степанова**

ORCID: 0000-0002-6557-9901 e-mail: [nastasya\\_stepanova@mail.ru](mailto:nastasya_stepanova@mail.ru)

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

*Москва, Россия*

**А.А. Таранюк**

ORCID: 0000-0002-7836-8468 e-mail: [taranyuk.anton@gmail.com](mailto:taranyuk.anton@gmail.com)

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

*Москва, Россия*

Анализируется электровихревое течение между двумя плоскостями, играющими роль электродов одинаковой полярности. В предшествующих работах было показано, что решение достаточно быстро приходит к так называемому стационарному режиму. Поэтому можно пренебречь производными по времени в уравнении Навье-Стокса. Его удобно решать в классе фон Кармана, используя скалярную функцию тока. В таком случае мы получаем нелинейное обыкновенное дифференциальное уравнение четвертого порядка. При слабых токах можно пользоваться линейным приближением, а решение получается простым интегрированием. Тем не менее, в прикладных задачах оказывается существенным наличие больших токов. В таком случае решение можно получить последовательным образом с помощью методов теории возмущений. В настоящей работе построено решение с точностью до слагаемых, пропорциональных третьей степени параметра электровихревого течения. Оно было также проверено методами численного моделирования, что потребовало использования аналога завихренности течения. Изучен вопрос о том, для тока какой величины применимы различные приближения.

**Ключевые слова:** электровихревые течения, жидкие металлы, класс фон Кармана, уравнение Навье-Стокса, обыкновенные дифференциальные уравнения, теория возмущений.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Михайлов, Е.А. Анализ и модель системы электровихревых течений между двумя плоскостями при больших токах / Е.А. Михайлов, А.П. Степанова, А.А. Таранюк // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 1. С. 32-42. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_32

## ANALYSIS AND MODEL OF ELECTRIC VORTEX FLOW SYSTEM BETWEEN TWO PLANES AT HIGH CURRENTS

**E.A. Mikhailov**

ORCID: 0000-0002-9747-4039 e-mail: [ea.mikhajlov@physics.msu.ru](mailto:ea.mikhajlov@physics.msu.ru)

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

*Moscow, Russia*

M.V. Lomonosov Moscow State University

*Moscow, Russia*

**A.P. Stepanova**

ORCID: 0000-0002-6557-9901 e-mail: [nastasya\\_stepanova@mail.ru](mailto:nastasya_stepanova@mail.ru)

M.V. Lomonosov Moscow State University

*Moscow, Russia*

**A.A. Taranyuk**

ORCID: 0000-0002-7836-8468 e-mail: [taranyuk.anton@gmail.com](mailto:taranyuk.anton@gmail.com)

M.V. Lomonosov Moscow State University

*Moscow, Russia*

**Abstract.** Electric vortex flow between two planes used as electrodes of the same polarity, is analyzed. In previous works it was shown that the solution quickly enough comes to the so-called stationary mode. Therefore, it is possible to neglect the time derivatives in Navier-Stokes equation. It is convenient to solve it in the von Karman class using a scalar current function. In this case, we get a nonlinear ordinary differential equation of the fourth order. With weak currents, a linear approximation can be used, and the solution is obtained by simple integration. Nevertheless, in applied problems, the presence of large currents is essential. In this case, the solution can be obtained in a consistent manner using methods of perturbation theory. In this paper, a solution is constructed with accuracy of the terms of sum proportional to the third power of electric vortex flow parameter. It was also verified by numerical simulation methods, which required the use of flow vorticity analog. Issue of what current magnitude the various approximations are applicable, is studied.

**Key words:** electric vortex flows, liquid metals, von Karman class, Navier-Stokes equation, ordinary differential equations, perturbation theory.

**FOR CITATION:** E.A. Mikhailov, A.P. Stepanova, A.A. Taranyuk. Analysis and model of electric vortex flow system between two planes at high currents. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №1. Pp. 32-42.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_32

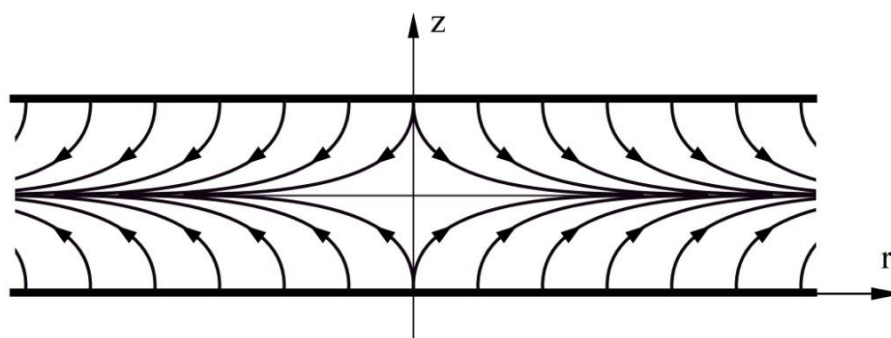
## Введение

Электровихревые течения играют достаточно важную роль как с точки зрения механики сплошных сред, так и с позиции технических приложений. Они возникают, когда неоднородный электрический ток протекает через среду с высокой проводимостью (например, жидкий металл) [1, 2]. В таком случае возникает магнитное поле, которое вместе с породившим его током порождает силу Лоренца, стремящуюся вызвать закрученные движения среды. Подобные процессы начали изучаться в Институте физики в Риге в 1970-е гг. под руководством Э.В. Щербинина [3]. Они исследовались как в ходе эксперимента, так и с использованием различных теоретических подходов. Весьма весомый вклад, связанный с техническими приложениями электровихревых течений, был внесен школой Б.Е. Патона в украинском Институте электросварки имени Е.О. Патона [4]. Большой опыт фундаментальных исследований электровихревых течений накоплен в пермском Институте механики сплошных сред Уральского отделения РАН [5, 6]. Нельзя не упомянуть изучение различных приложений (в основном, связанных с проблемами черной металлургии) в Магнитогорском государственном техническом университете имени Г.И. Носова [7]. В Москве в Объединенном институте высоких температур РАН ведутся интенсивные экспериментальные исследования электровихревых течений в полусферическом контейнере [1, 8]. Кроме того, данная задача исследуется в рамках численного моделирования, а также (совместно с МГУ имени М.В. Ломоносова) с помощью различных асимптотических методов математической физики [9].

В рамках европейских исследований необходимо отметить теоретические работы, проводимые в Университете Шеффилда (Великобритания). С их помощью были построены спектральные разложения для течений в полусфере для ряда простых случаев (например, при точечном центральном электроде) [10]. Значительный вклад внесли специалисты Университета Леобена (Австрия) [2, 11]. Систематические исследования на протяжении десятилетий ведутся в Центре имени Гельмгольца Дрезден – Россендорф (Германия) [12]. В рамках ос-

новой методологии всех вышеописанных исследований прослеживается достаточно ярко выраженная тенденция. Первые работы были связаны с попытками построить аналитические решения, хотя они и имели ограниченную точность. Начиная с 1990-х гг., с развитием вычислительной техники все чаще изучение стало проводиться методами прямого численного моделирования. Позволяя получить достаточно точные решения, они часто не дают возможности понять принципиальные закономерности, характеризующие взаимосвязь между принципиально важными параметрами. Вместе с тем, подобная взаимосвязь может быть изучена только с использованием аналитических подходов, связанных с применением методов математической физики.

Одним из интересных примеров электровихревых течений является осесимметричное течение между двумя плоскостями [13]. Схематически оно показано на рис. 1. Электрический ток распространяется от двух плоских электродов одноименной полярности к третьему, который расположен на достаточно большом расстоянии от оси симметрии. Это порождает электровихревое течение в форме двух встречных струй вдоль оси, причем вдоль обоих электродов жидкий металл подтекает к оси, а посередине межэлектродного расстояния образуется радиально-щелевая струя, расходящаяся от оси. Такое растекание тока встречается в ванне с расплавом в осесимметричных дуговых печах постоянного тока в окрестности оси симметрии, когда диаметр подового электрода примерно равен диаметру пятна контакта дуги с расплавом. Модельная задача для такого течения является предметом исследования в настоящей работе.



**Рис. 1. Схематическое изображение осесимметричного течения между двумя плоскостями (один из примеров электровихревых течений)**

**Fig. 1. Schematic representation of axisymmetric flow between two planes (one of the examples of electric vortex flows)**

Достаточно удобным в случае подобных процессов является использование скалярной функции тока. Это преобразует уравнение Навье-Стокса к уравнению в частных производных, которое имеет четвертый порядок по координате [14, 15]. Опыт решения подобных задач показывает, что течение достаточно быстро выходит на стационарный режим. Это приводит нас к возможности пренебречь производными по времени. Если искать решение в классе фон Кармана, мы получим обыкновенное дифференциальное уравнение четвертого порядка [14]. Его решение можно найти, пользуясь последовательными приближениями в рамках теории возмущений, хорошо известной в математической физике. В предыдущих работах было найдено решение вплоть до слагаемых, пропорциональных квадрату параметра электровихревого течения [14, 15]. Этого может оказаться недостаточным в том случае, если мы рассматриваем достаточно интенсивные электрические токи.

В данной работе мы представляем вывод третьего приближения для электровихревого течения, даем выражения для скалярной функции тока и компонент скоростей. Дается оценка, при каких значениях электрических токов оказывается возможным пренебречь нелинейными слагаемыми, а когда — ограничиться лишь более простым квадратичным приближением. Полученные аналитические результаты требуют численной верификации. В таком случае

с вычислительной точки зрения удобно воспользоваться вспомогательной функцией, имеющей смысл завихренности течения: это позволяет понизить порядок исходной системы уравнений до второго. В таком случае задача может быть решена с помощью хорошо известного метода счета на установление [16]. Отдельного внимания заслуживают граничные условия. Так, условие прилипания обычно сводится к условию равенства нулю как самой скалярной функции, так и ее нормальной производной на границе. Однако гораздо удобнее приравнять нулю только саму скалярную функцию, поставив второе условие для функции завихренности. В качестве такого условия мы применяем так называемое условие Тома [17], хорошо зарекомендовавшее себя в различных задачах гидродинамики.

### Уравнения для электровихревого течения

Запишем уравнение Навье-Стокса, описывающее движение жидкого металла между двумя плоскостями [3, 14] (1):

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \mathbf{f}; \quad (1)$$

где  $\mathbf{v}$  – скорость движения жидкого металла,  $\rho$  – его плотность,  $p$  – давление,  $\eta$  – коэффициент вязкости,  $\mathbf{f}$  – массовая плотность силы Лоренца, которая может быть выражена следующим образом:

$$\mathbf{f} = \frac{1}{\rho} [\mathbf{j} \times \mathbf{B}];$$

где  $\mathbf{j}$  – плотность электрического тока,  $\mathbf{B}$  – индукция магнитного поля.

Одна из сложностей уравнения (1) состоит в том, что оно содержит градиент давления, достаточно трудный для вычислений. С этой целью можно взять ротор от обеих частей равенства. С учетом несжимаемости жидкого металла это приведет нас к такому выражению:

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} = \text{rot}[\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}] + \frac{1}{\rho} \text{rot}[\mathbf{j} \times \mathbf{B}] + \eta \Delta \boldsymbol{\omega};$$

где  $\boldsymbol{\omega} = \text{rot} \mathbf{v}$  – завихренность течения [9].

Нас будет интересовать осесимметричная задача в цилиндрической системе координат, с учетом отсутствия вращения в азимутальном направлении. Тогда скорость течения можно представить с помощью скалярной функции тока  $\psi$  [13, 14]:

$$v_r = -\frac{\partial \psi}{r \partial z}; \quad v_z = \frac{\partial \psi}{r \partial r}.$$

Аналогично можно ввести электрическую функцию тока  $\phi$ , которая даст нам возможность представить компоненты тока таким образом [13, 14]:

$$j_r = -\frac{\partial \phi}{r \partial z}; \quad j_z = \frac{\partial \phi}{r \partial r}.$$

Магнитное поле будет обладать только азимутальной компонентой, определяемой следующим образом [13]:

$$B_\phi = \frac{1}{r} \mu_0 \phi.$$

Так же, как и в большом числе подобных уравнений, удобно было бы переписать (1) в безразмерных единицах. Будем измерять линейные размеры в единицах расстояния между параллельными плоскостями  $H$ , единицей для измерения скорости будет  $\frac{\eta}{H}$ , а для времени

– в  $\frac{H^2}{\eta}$ . Функция тока будет измеряться в единицах  $\eta H$ . Также для дальнейшей работы нам

потребуется так называемый параметр электровихревого течения  $S = \frac{\mu_0 I^2}{\eta^2 \rho}$ , где  $I$  – величина

на электрического тока [14]. Как и в большом количестве подобных задач, удобно использовать так называемый класс фон Кармана [13]. В таком случае для гидродинамической и электрической функций тока мы будем иметь выражения:

$$\begin{aligned}\psi(r, z, t) &= r^2 F(z, t); \\ \phi(r, z) &= r^2 \left( z - \frac{1}{2} \right).\end{aligned}$$

Для функции  $F(z, t)$  мы можем получить следующее уравнение (2):

$$\frac{\partial^3 F}{\partial z^2 \partial t} + F \frac{\partial^3 F}{\partial z^3} = \frac{\partial^4 F}{\partial z^4} + S \left( z - \frac{1}{2} \right). \quad (2)$$

Отметим, что в таком случае независимая переменная  $z$  будет меняться в промежутке  $0 < z < 1$ .

Опыт решения подобных задач показывает, что решение достаточно быстро выходит на стационарный режим. Поэтому можно пренебречь частной производной по времени. Это превратит (2) в обыкновенное дифференциальное уравнение [14] (3):

$$F \frac{d^3 F}{dz^3} = \frac{d^4 F}{dz^4} + S \left( z - \frac{1}{2} \right). \quad (3)$$

При формулировке граничных условий необходимо учитывать, что  $F(z)$  по сути представляет собой скалярную функцию тока. Исходя из физических соображений, как данная функция, так и ее нормальная производная к границе должны принимать нулевые значения. Примерно то же самое можно сказать и про данную функцию [14]:

$$F(0) = F(1) = F'(0) = F'(1) = 0.$$

Данную задачу можно решать как аналитически, с использованием теории возмущений, так и численно.

### Аналитическое решение в линейном и нелинейном случае

Решение уравнения (3) удобно искать в виде разложения по степеням параметра электровихревого течения  $S$  [14]:

$$F(z) = S^1 F_1(z) + \dots + S^n F_n(z) + \dots$$

В зависимости от требуемой точности мы можем ограничиться любым конечным числом слагаемых. Для их поиска удобно воспользоваться методом последовательных приближений: сначала найти функцию  $F_1$ , а потом вычислять каждую последующую через предыдущие. В предшествующих работах было получено уравнение для первого приближение [14, 15]:

$$\frac{d^4 F_1}{dz^4} + S \left( z - \frac{1}{2} \right) = 0.$$

Обе его части можно четыре раза проинтегрировать и найти константы интегрирования из начальных условий. Таким образом, функция для первого приближения запишется так [14]:

$$F_1(z) = -\frac{1}{120} \left( z^5 - \frac{5}{2} z^4 + 2z^3 - \frac{1}{2} z^2 \right).$$

Продолжая аналогично данные действия, мы можем получить уравнение для второго приближения:

$$\frac{d^4 F_2}{dz^4} = \varphi_2(z);$$

где

$$\varphi_2(z) = F_1(z) \frac{d^3}{dz^3} F_1(z).$$

Функция для второго приближения выглядит так [15]:

$$F_2(z) = \frac{1}{199584000} z^2 (z-1)^2 \left(z - \frac{1}{2}\right) (105z^6 - 315z^5 + 295z^4 - 65z^3 - 19z^2 - z + 3).$$

В предшествующих исследованиях были найдены только первые два приближения. Вместе с тем, для больших значений параметра электровихревого течения  $S$  этого оказывается недостаточно. Поэтому возникает необходимость поиска третьего приближения. Для поиска соответствующей функции получим уравнение (4):

$$\frac{d^4 F_3}{dz^4} = \varphi_3(z); \quad (4)$$

где:

$$\varphi_3(z) = (F_1(z) \frac{d^3}{dz^3} F_2(z) + F_2(z) \frac{d^3}{dz^3} F_1(z)).$$

Явная подстановка  $F_1(z)$  и  $F_2(z)$  дает следующее выражение:

$$\begin{aligned} \varphi_3(z) = & \frac{1}{7983360000} \left( 34650z^8 - 138600z^7 + 217140z^6 - 166320z^5 + 62370z^4 - 9240z^3 + 13 \right) \times \\ & \times \left( \frac{5z^4}{2} + \left( \frac{z^2}{2} - (z^5 + 2z^3) \right) \right) + \\ & + \frac{1}{199584000} z^2 (z-1)^2 \left( z - \frac{1}{2} \right) \left( \frac{z}{2} - \frac{1}{10} - \frac{z^2}{2} \right) (105z^6 - 315z^5 + 295z^4 - 65z^3 - 19z^2 - z + 3). \end{aligned}$$

Пошагово интегрируя обе части (4) четыре раза и находя константы интегрирования с помощью описанных выше начальных условий, получим:

$$\begin{aligned} F_3(z) = & \frac{-4299750}{53353114214400000} z^2 (z-1)^2 \left( z - \frac{1}{2} \right) \left( \frac{2124643}{143325} z^{10} + \frac{1898801}{143325} z^8 + \frac{141433}{716625} z^6 + \right. \\ & + \frac{169082}{2149875} z^4 + \frac{46556}{716625} z^5 + z^{12} - 6z^{11} - \frac{128}{716625} - \frac{3116}{2149875} z - \frac{10544}{2149875} z^2 - \\ & \left. - \frac{27364}{2149875} z^3 - \frac{612614}{143325} z^7 - \frac{548068}{28665} z^9 \right). \end{aligned}$$

Решение с точностью до третьего приближения будет выглядеть следующим образом:

$$F(z) \cong S^1 F_1(z) + S^2 F_2(z) + S^3 F_3(z).$$

Возможно получить и следующие приближения, и ниже мы планируем сделать оценку величины функции  $F_4(z)$ .

### Численное решение

С целью верификации решения, полученного в предыдущем разделе, и оценки оправданности использования третьего приближения необходимо также решить задачу численно.

Также важно понять, имеет ли место в действительности быстрый выход решения на стационарный режим. Безусловно, для этого можно взять решение исходной задачи (2). Тем не менее, процесс решения уравнения четвертого порядка представляет отдельную сложность с точки зрения численной схемы и ее устойчивости. По этой причине удобно ввести вспомогательную функцию:

$$W = \frac{\partial^2 F}{\partial z^2}.$$

Тогда можно заменить уравнение на следующую систему (3-4):

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -F \frac{\partial W}{\partial z} + S \left( z - \frac{1}{2} \right) + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2}; \quad (3)$$

$$0 = -W + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2}. \quad (4)$$

Уравнение (4) удобно решать с помощью так называемого счета на установление [16], когда эллиптическая задача заменяется на параболическую (5):

$$\mu \frac{\partial F}{\partial t} = -W + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2}; \quad (5)$$

где  $\mu$  – некоторый малый параметр, который обеспечивает разные масштабы времени по сравнению с задачей (3). Задача (3), (5) является типичным примером системы с коэффициентами разного порядка при производных [18]. При малом значении  $\mu$  решение оказывается достаточно близким к решению (3) – (4), а в случае выхода на стационарный режим – в точности равно ему.

Отдельного внимания заслуживают граничные условия. Для функции  $F$  потребуем равенства нулю на границе необходимой нам области:

$$F|_{z=0} = F|_{z=1} = 0.$$

Вместо условий равенства нулю нормальной производной для нас будет удобно использовать т.н. условия Тома. Для это разложим по формуле Тейлора с точностью до второго слагаемого функцию  $F$  :

$$F(\Delta z, t) \cong F(0, t) + \frac{\partial F}{\partial z} \Big|_{z=0} \Delta z + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \Big|_{z=0} \Delta z^2;$$

где  $\Delta z$  – шаг численной схемы. Учитывая, что согласно нашей модели  $F(0, t) = \frac{\partial F}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$ , данное уравнение запишется в форме:

$$F(\Delta z, t) \cong \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} \Big|_{z=0} \Delta z^2.$$

Сделав соответствующую замену, мы можем получить следующее:

$$W(0, t) = \frac{2}{\Delta z^2} F(\Delta z, t).$$

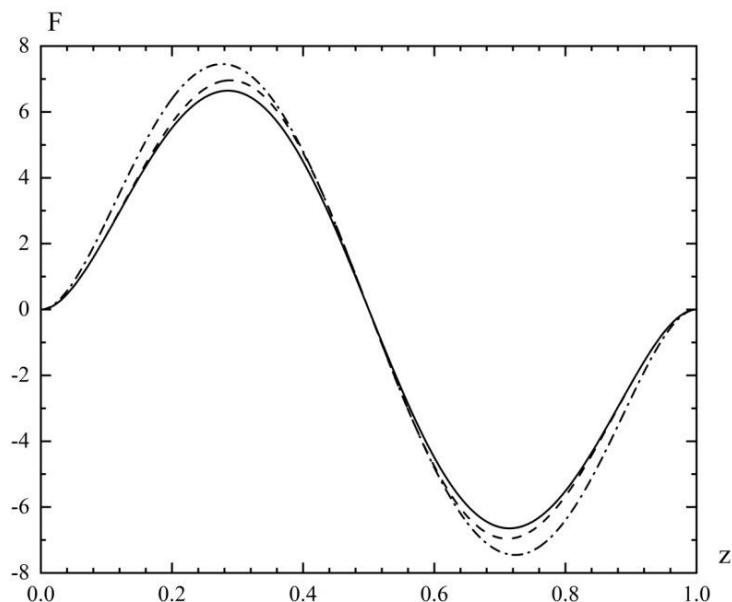
Аналогичные рассуждения можно провести и для области около верхней полуплоскости-электрода. Таким образом, мы можем решить систему уравнений (3) и (5) со следующими граничными условиями:

$$F(0, t) = F(1, t) = W(0, t) - \frac{2}{\Delta z^2} F(\Delta z, t) = W(1, t) - \frac{2}{\Delta z^2} F(1 - \Delta z, t) = 0.$$

Расчет показывает, что решение достаточно быстро (за время порядка единицы) выходит на стационарный режим:

$$F(z, t) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} F_{num}(z).$$

Результат, даваемый первым и вторым приближением при  $S = 10^4$ , а также результат численного моделирования представлен на рис. 2. Также показано численное решение. Отметим, что результат, даваемый третьим приближением, не приведен по той причине, что он практически полностью совпадает с численным, и их было бы невозможно отличить на данном графике.



**Рис. 2. Зависимость функции  $F$  от координаты при  $S = 10^5$ .  
Сплошная линия показывает результат численного моделирования,  
штриховая – второе приближение, штрих-пунктирная – первое приближение**

**Fig. 2. Dependence of the function  $F$  on the coordinate if  $S = 10^5$ .  
Solid line shows the result of numerical simulation,  
dashed line shows the second approximation, dash-and-dot line shows the first approximation**

Чтобы оценить разницу между ними, введем вспомогательную функцию:

$$G(z) = \frac{F_{num}(z) - S^1 F_1(z) - S^2 F_2(z)}{S^3}.$$

Если бы третье приближение давало абсолютно точное решение, данная функция бы совпадала с  $F_3(z)$ . Значение  $G(z)$ , полученное с помощью численного моделирования для разных  $S$ , показано на рис. 3. Можно видеть, что при больших значениях  $S$  различие между ними возрастает. Исходя из данного графика, можно заключить, что область применимости приближения ограничивается значениями  $S < S_0$ , где  $S_0 \sim 10^5$ .

Общий вид течения демонстрирует полная функция тока  $\psi = r^2 F$ , линии уровня которой соответствуют линиям тока жидкости. Рис. 4 показывает картину течения при  $S = 10^4$ .



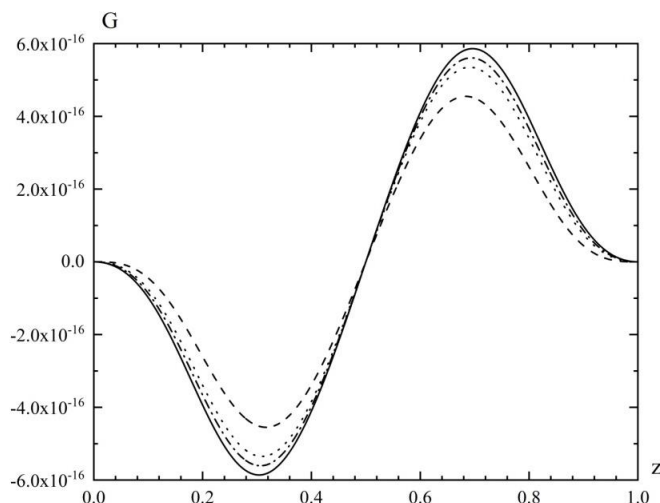


Рис. 3. Зависимость функции  $G$  от координаты. Сплошная линия – найденное аналитически третье приближение, штриховая – результат численного моделирования для  $S = 5 \cdot 10^4$ , пунктирная – для  $S = 2 \cdot 10^4$ , штрих-пунктирная – для  $S = 10^4$

Fig. 3. Dependence of the function  $G$  on the coordinate. The solid line is the analytically found third approximation, the dashed line is the result of numerical modeling for  $S = 5 \cdot 10^4$ , dot line – for  $S = 2 \cdot 10^4$ , dash-and-dot line – for  $S = 10^4$

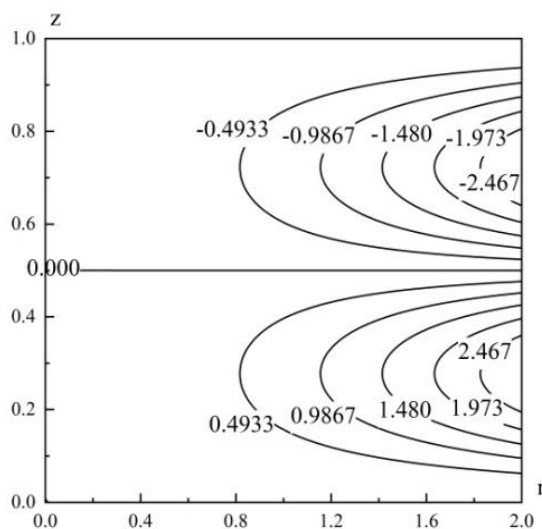


Рис. 4. Функция тока  $\psi(r, z)$  при  $S = 10^4$ .

Fig. 4. Current function  $\psi(r, z)$  if  $S = 10^4$ .

#### О четвертом приближении

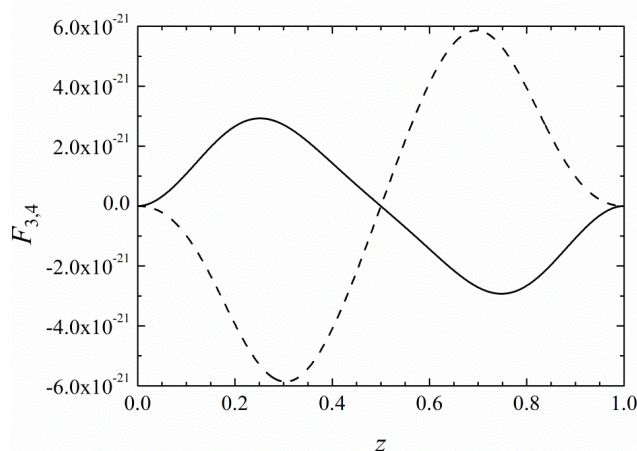
Теоретически вычисление дальнейших приближений можно продолжать практически до бесконечности. Вместе с тем, выражение для каждой из следующих функций  $F_n(z)$  оказывается все более сложным (выше было показано, что даже для  $F_3(z)$  оно является достаточно громоздким). Тем не менее, имея численное решение, мы вполне можем приближенно определить функцию, соответствующую четвертому приближению. Действительно, с точностью до четвертого приближения функция выглядит так:

$$F(z) \cong S^1 F_1(z) + S^2 F_2(z) + S^3 F_3(z) + S^4 F_4(z).$$

Если мы имеем численный результат  $F_{num}(z)$ , то предполагая, что  $F(z) \cong F_{num}(z)$ , мы имеем:

$$F_4(z) \cong \frac{F_{num}(z) - S^1 F_1(z) - S^2 F_2(z) - S^3 F_3(z)}{S^4}.$$

Данная функция представлена на рис. 5. Для сравнения там также приведена  $F_3(z)$ , уменьшенная на несколько порядков. Можно видеть, что функция для четвертого приближения значительно меньше, чем таковая для третьего. Таким образом действительно, при не слишком больших значениях  $S$  оказывается вполне возможным пренебречь четвертым приближением. Также из характерных значений  $F_3$  и  $F_4$ , показанных на данном графике, становится понятным, почему третье приближение оказывается применимым при величинах параметра электровихревого течения, не превышающих  $10^5$ .



**Рис. 5. Типичный вид функций для различных приближений. Сплошная линия показывает  $F_4(z)$ , пунктирная -  $10^{-5} F_3(z)$ .**

**Fig. 5. Typical type of functions for various approximations  
Solid line shows  $F_4(z)$ , dot line -  $10^{-5} F_3(z)$ .**

### Выводы

Исследовано электровихревое течение между двумя плоскостями при различной величине электрического тока. Наиболее удобно возможность использования той или иной модели описывается с помощью так называемого параметра электровихревого течения  $S$ , включающего в себя величину тока и другие основные характеристики задачи. Ранее [14, 15] было построено второе приближение, границы применимости которого, по-видимому, соответствуют его значениям вплоть до  $10^3$ . В настоящей работе было получено третье приближение, которое дает вполне приемлемую точность при  $S < 10^5$ . Также был оценен примерный вид функции, характеризующей четвертое приближение.

Вместе с тем, построение дальнейших приближений является достаточно затруднительным. Аналитические выражения для каждого следующего выражения усложняются, и поэтому для еще больших величин токов, видимо, нужно использовать различные численные подходы.

*Авторы выражают благодарность А.Ю. Чудновскому (Институт физики Латвийского университета) за помощь в постановке задачи и ценные замечания.*

**Библиографический список**

1. **Жилин, В.Г.** К вопросу о закрутке осесимметричных электровихревых течений / В.Г. Жилин, Ю.П. Ивочкин, И.О. Тепляков // Теплофизика высоких температур. 1995. Т. 49. № 6. С. 957-960.
2. **Kharicha, A.** Experimental and numerical analysis of free surface deformation in an electrically driven flow / A. Kharicha, I. Teplyakov, Y. Ivochkin, A. Guseva, M. Wu, A. Ludwig // Experimental Thermal and Fluid Science. 2015. V. 62. Pp. 192-201.
3. **Бояревич, В.В.** Электровихревые течения / В.В. Бояревич, Я.Ж. Фрейберг, Е.И. Шилова, Э.В. Щербинин. – Рига: Зинатне, 1985. – 315 с.
4. **Патон, Б.Е.** Исследование магнитогидродинамических явлений в шлаковой ванне при ЭСП / Б.Е. Патон, Б.И. Медовар, Ю.Г. Емельяненко и др. // Проблемы специальной электрометаллургии, 1982. Т. 17. С.3-8.
5. **Хрипченко, С.Ю.** Электровихревые течения в тонких слоях проводящей жидкости / С.Ю. Хрипченко // Магнитная гидродинамика. 1991. Т. 27. № 1. С. 126-129.
6. **Мандрыкин, С.Д.** Электровихревое течение жидкого металла в цилиндрическом канале / С.Д. Мандрыкин, И.В. Колесниченко, Г.Л. Лосев, П.Г. Фрик // Вестник Пермского университета. Физика. Вып. 2 (40). С.20-26.
7. **Ячиков, И.М.** Исследование на физической модели поведения токонесущей жидкости в ванне ДППТ под действием внешнего вертикального магнитного поля / И.М. Ячиков, И.В. Портнова, Т.П. Ларина // Известия вузов. Черная металлургия, 2018. № 1. С.28-34.
8. **Ивочкин, Ю.П.** Численное и экспериментальное исследование структуры закрученного электровихревого течения / Ю.П. Ивочкин, И.О. Тепляков, А.А. Гусева, Ю.Н. Токарев // Тепловые процессы в технике. 2012. № 8. С. 345-352.
9. **Михайлов, Е.А.** Аналитическое решение задачи об электровихревом течении в полусфере с электродами конечного размера в стоковом приближении / Е.А. Михайлов, И.О. Тепляков // Вестник Московского университета: Физ. Астрономия, 2018. № 2. С.39-44.
10. **Sozou, C.** Magnetohydrodynamic flow in a container due to the discharge of an electric current in a hemispherical container / C. Sozou, W.M. Pickering // Journal of Fluid Mechanics, 1976. Vol.73. P. 641-650.
11. **Kharicha, A.** Bohacek Review on Modeling and Simulation of Electroslag Remelting / A. Kharicha, E. Karimi-Sibaki, M. Wu, A. Ludwig. J.: Steel Res. Int., 2018. Vol. 89. 1700100.
12. **Liu, K.** Numerical and experimental investigation of electro-vortex flow in a cylindrical container / K. Liu, F. Stefani, N. Weber, T. Weier, B.W. Li // Magnetohydrodynamics. 2020. Vol. 56. No. 1. Pp. 27-42.
13. **Каудзе, М.З.** Осесимметричное электровихревое течение между двумя плоскостями, индуцируемое переменным током / М.З. Каудзе, А.Ю. Чудновский // Магнитная гидродинамика. 1989. Т. 25. №2. С. 55-62.
14. **Михайлов, Е.А.** Асимптотическое разложение решения уравнения для медленного осесимметричного электровихревого течения между двумя плоскостями / Е.А. Михайлов, А.Ю. Чудновский // Сибирский журнал индустриальной математики, 2020. Т. 23. С. 88-100.
15. **Михайлов, Е.А.** Решение задачи об электровихревом течении между двумя плоскостями при различной величине тока / Е.А. Михайлов, А.Ю. Чудновский // Волны и вихри в сложных средах: 11-я конференция – школа молодых ученых; 1-3 декабря 2020 г. С. 120-123.
16. **Белов, А.А.** Эволюционная факторизация и сверхбыстрый счет на установление / А.А. Белов, Н.Н. Калиткин // Математическое моделирование. 2014. Т. 26. № 9. С.47-64.
17. **Weinan, E.** Vorticity Boundary Condition and Related Issues for Finite Difference Schemes / E. Weinan, J.G. Liu // Journal of Computational Physics. 1996. V. 124. P. 368-382.
18. **Бутузов, В.Ф.** Контрастная структура типа ступеньки в сингулярно возмущенной системе уравнений с разными степенями малого параметра / В.Ф. Бутузов, И.В. Неделько // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2000. Т.40. № 6. С. 877-899.

*Дата поступления  
в редакцию: 07.10.2021*

УДК 681.518.2

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_43

## РЕСТАВРАЦИЯ И КОЛОРИЗАЦИЯ СТАРЫХ ФОТОГРАФИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

**О.П. Тимофеева**ORCID: 0000-0002-1935-7697 e-mail: [optimofeeva@mail.ru](mailto:optimofeeva@mail.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***А.Е. Савкин**ORCID: 0000-0003-4826-9087 e-mail: [sae.20@bk.ru](mailto:sae.20@bk.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***Е.Р. Тимофеев**ORCID: 0000-0001-5703-3784 e-mail: [ertimofeev1@gmail.com](mailto:ertimofeev1@gmail.com)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***Т.И. Балашова**ORCID: 0000-0002-1328-3228 e-mail: [tibalashova@mail.ru](mailto:tibalashova@mail.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***Е.В. Сидорова**ORCID: 0000-0002-6828-1625 e-mail: [sidorova-elena@yandex.ru](mailto:sidorova-elena@yandex.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Рассматривается подход к решению задачи восстановления и раскрашивания старых фотографий на основе комбинации методов машинного обучения и традиционных подходов к построению алгоритмов работы с изображениями с целью сохранения исторического наследия. Рассмотрены методы выявления физических дефектов на фотографиях и способы их устранения, проведены сравнения методов колоризации изображений и увеличения их разрешения по скорости и качеству выполнения поставленной задачи. Разработан метод асинхронной обработки видеоряда для ускорения работы программы.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, нейронные сети, колоризация и реставрация фотографий, OpenVINO, OpenCV.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Тимофеева, О.П. Реставрация и колоризация старых фотографий с использованием нейронных сетей / О.П. Тимофеева, А.Е. Савкин, Е.Р. Тимофеев, Т.И. Балашова, Е.В. Сидорова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 1. С. 43-53. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_43

## RESTORATION AND COLORIZATION OF OLD PHOTOGRAPHS USING NEURAL NETWORKS

**O.P. Timofeeva**ORCID: 0000-0002-1935-7697 e-mail: [optimofeeva@mail.ru](mailto:optimofeeva@mail.ru)Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.E. Savkin**ORCID: **0000-0003-4826-9087** e-mail: **sae.20@bk.ru**Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia***E.R. Timofeev**ORCID: **0000-0001-5703-3784** e-mail: **ertimofeev1@gmail.com**Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia***T.I. Balashova**ORCID: **0000-0002-1328-3228** e-mail: **tibalashova@mail.ru**Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia***E.V. Sidorova**ORCID: **0000-0002-6828-1625** e-mail: **sidorova-elena@yandex.ru**Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Approach to solving a problem of restoring and coloring of old photographs based on a combination of computer-assisted instruction methods and traditional approaches to building algorithms for work with images in order to preserve historical heritage, is considered. Methods of detecting of physical defects in photographs and ways to eliminate them are considered, comparisons of images colorization methods, as well as magnification of resolution thereof in terms of speed and quality of the task, are carried out. Method of video sequence asynchronous processing is developed to speed up the program in operation.

**Key words:** computer vision, neural networks, colorization and restoration of photographs.

**FOR CITATION:** O.P. Timofeeva, A.E. Savkin, E.R. Timofeev, T.I. Balashova, E.V. Sidorova. Restoration and colorization of old photographs using neural networks. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №1. Pp. 43-53. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_43

**Введение**

Создание машины, способной думать и принимать решения подобно человеку было мечтой всех ученых во все времена. Раньше за неимением технологий люди дрессировали животных для выполнения определенных задач или просто для возможности безопасного взаимодействия с ними. Однако с недавних пор у человека появилась возможность создать искусственный интеллект, способный выполнять вычисления событий, не поддающихся расчетам по заранее заготовленным формулам, на что раньше были способны лишь живые организмы. В настоящее время машинное обучение является одним из самых актуальных и быстро развивающихся направлений искусственного интеллекта в IT-сфере, а компьютерное зрение находит практическое применение во многих областях деятельности человека. Наиболее прогрессивным направлением в создании «компьютерного зрения» является применение нейронных сетей из-за их высокой точности и скорости работы.

В настоящей работе ставится задача исследования алгоритмов компьютерного зрения для создания автоматизированной системы «Time machine», способной восстанавливать, раскрашивать старые фотографии и видео, а также увеличивать их разрешение. Эта задача является одной из наиболее востребованных в компьютерном зрении в настоящее время, о чем свидетельствует большое количество публикаций на эту тему.

## Постановка задачи

В ходе работы требуется создать автоматизированную систему «Time machine» – программный продукт, способный восстанавливать старинные фотографии путем:

- нахождения и удаления с них различных дефектов;
- раскрашивания получившегося изображения;
- увеличения его разрешения, а также оптимизировать работу нейронных сетей для обработки видеоряда.

Для выполнения поставленной задачи требуется сравнить традиционные подходы к построению алгоритмов работы с изображениями и алгоритмы компьютерного зрения для выполнения тех же задач. Необходимо также исследовать различные фреймворки для создания, инфера (исполнения) и оптимизации нейронных сетей, сравнить популярные архитектуры по критериям качества и скорости работы.

## Стэк технологий

Для разработки системы «Time machine» был выбран язык программирования Python как один из наиболее популярных для использования при создании и сопровождении нейронных сетей. Также в качестве основного «плацдарма» для создания собственного приложения был применен инструментарий от компании Intel – OpenVINO Toolkit [1] – набор различных инструментов для сопровождения (оптимизации, валидации, оценки) и инфера (исполнения) нейронных сетей. Кроме того, использовалась библиотека алгоритмов компьютерного зрения, обработки изображений и численных алгоритмов общего назначения с открытым кодом - OpenCV, входящая в пакет OpenVino. Для применения нейронных сетей за пределами «зоопарка» оптимизированных моделей OpenVINO были использованы фреймворки Caffe, ONNX, TensorFlow, PyTorch.

## Устранение дефектов на фотографии

В ходе решения задачи поиска и устранения дефектов было решено классифицировать их на две группы по размеру: мелкие трещины в краске и крупные дефекты. Разница между представителями этих групп заключается в происхождении. Мелкие трещины образовались под воздействием времени, которое привело к высыханию краски и, как следствие, эти дефекты трудно различимы для человеческого глаза, однако из-за плотности их расположения на изображении его качество заметно падает. Крупные же дефекты стали следствием физического воздействия на фотографию: перегибы – толстые и длинные линии, проходящие через всё изображение, царапины – одна или совокупность тонких линий, имеющих схожую направленность короткой длины, потертости – крупные эллипсовидные дефекты с рваными краями (рис. 1,а). Анализ существующих фотографий показал, что поврежденные места имеют белый цвет – цвет поверхности, на которую наносится краска. В связи с этим была предпринята попытка выявления дефектов путем нахождения на изображении пикселей со значениями близкими к белому цвету. Однако данное простое решение ожидаемо не дало удовлетворительного результата, так как не выделяло большинство мелких трещин, но выделяло все элементы схожего цвета на изображении (рис. 1,б).

В поиске решения была рассмотрена свертка изображения с небольшим ядром – оператор Собеля [2], который аппроксимирует градиент со значительной погрешностью. Другими словами, он находит границы объектов. Использование свертки выделяло на фотографии все мелкие трещины и границы крупных дефектов с высокой точностью (рис. 1,в). Однако, у данного метода был выявлен ряд недостатков, одним из которых явилось выделение границ всех объектов на фотографии. Другим недостатком стало определение областей, находящихся внутри границ крупных дефектов, так как при определении соседних



пикселей с цветами близкими к белому цвету снова выделялись, кроме самих дефектов, объекты схожих цветов, а при выявлении соседних схожих траекторий границ, выделялись области между совокупностью тонких царапин. Была предпринята попытка реставрации мелких трещин путем сравнения с соседними пикселями, но несмотря на удовлетворительное решение данной проблемы, было принято решение отказаться от данного подхода из-за размытия границ объектов на изображении при устранении дефектов.

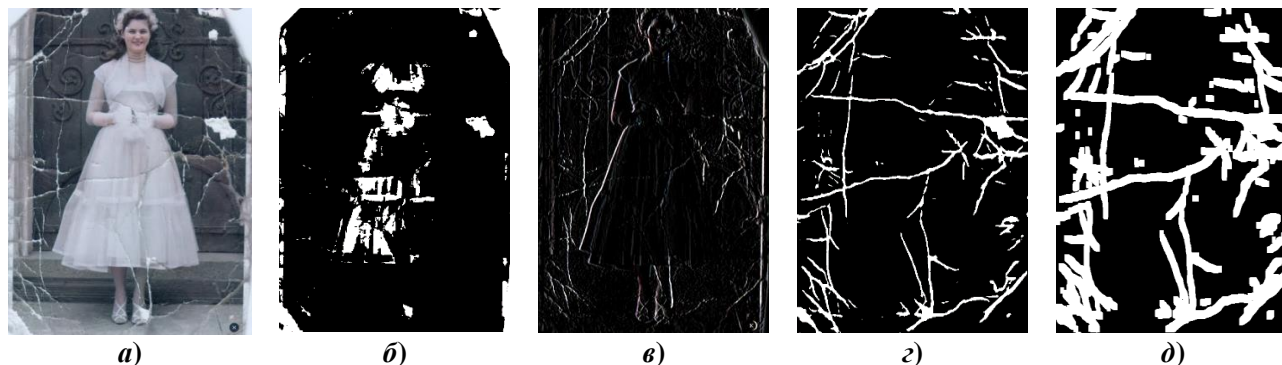


Рис. 1. Определение дефектов на фотографии

Fig. 1. Detection of defects on a photo

В связи с тем, что традиционные способы не дали желаемых результатов, решение задачи было реализовано с использованием нейронных сетей. Важным фактором в выборе сети послужило обязательное использование утилиты OpenVINO, что добавило параметр простоты конвертации в параметры выбора решения. В конечном итоге были выбраны сети *scratch\_detector* из проекта *Bring\_Old\_Photos\_Back\_to\_Life* [3] для выявления дефектов и *gmcnn-places2-tf* из *Open\_model\_zoo* [4] для их устранения. Сравнительные характеристики работы этих нейронных сетей представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Модели поиска трещин и закрашивания дефектов

Table 1.

Models for crack detection and defect painting

Model	Work speed <sup>1</sup>
<i>scratch_detector</i> (на основе U-net)	Count: 36 iterations Duration: 68720.52 ms Latency: 7535.71 ms Throughput: 0.52 FPS <sup>2</sup> При разрешении 512x608
<i>gmcnn-places2-tf</i>	Count: 28 iterations Duration: 70695.08 ms Latency: 10157.57 ms Throughput: 0.40 FPS <sup>2</sup> При разрешении 512x680

Результатом работы нейронной сети *scratch\_detector* стало выявление крупных дефектов на фотографии с высокой точностью, однако мелкие дефекты в краске данная нейронная сеть была неспособна определить (рис. 1,з). После приведения выходных данных первой сети к формату входных данных сети *gmcnn-places2-tf* был получен результат, который не в полной мере удовлетворил ожидания, так как границы устраненных дефектов оставались различимы.

<sup>1</sup> Здесь и далее результаты производительности получены с помощью инструмента «Benchmark App», входящего в пакет OpenVINO и используемого для оценки скорости моделей нейронных сетей

<sup>2</sup> Здесь и далее FPS (Frames per second) указан с использованием процессора Intel core i5-8300h





Рис. 2. Реставрация дефектов на фотографии

Fig. 2. Restoration of defects on a photo

Комбинация оператора Собеля и сети *scratch\_detector* не привела к значительному улучшению результата реставрации, – из-за проблемы оператора Собеля границы объектов снова оказались размытыми. Решением стало увеличение границ маски, полученной на выходе сети *scratch\_detector*, путем выбора соседних пикселей в область для реставрации (рис. 1,д). Несмотря на то, что это привело к предсказанию значений заранее известных нам, результат работы программы стал на порядок лучше по сравнению со всеми предыдущими попытками (рис. 2).

### Колоризация изображений

Второй этап работы – колоризация изображений (рис. 3). Эта задача является одной из сложнейших при работе с фотографиями. Люди, занимающиеся восстановлением фото, тратят огромное количество времени на то, чтобы раскрасить их. Задача усложняется ещё и тем, что достаточно трудно подобрать правильные цвета - для этого нужно хорошо знать историю и использовать дошедшие до нас артефакты того времени, когда была сделана фотография. До появления нейронных сетей автоматизировать эту задачу было практически невозможно из-за её огромной сложности. Однако современные алгоритмы компьютерного зрения позволяют сделать это. В работе были исследованы различные популярные нейросетевые модели, как из открытого зоопарка моделей OpenVINO, так и за его пределами (табл. 2).

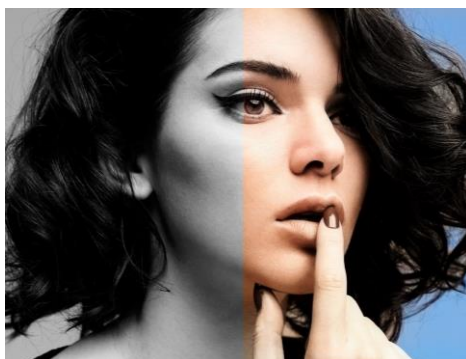


Рис. 3. Демонстрация работы модели *Colorization-siggraph*

Рис. 3. Demonstration of the model *Colorization-siggraph*

Таблица 2

## Модели колоризации фотографий

Table 2.

## Models of colorization of photographs

Model	MOS	Work speed
<i>Deoldify ONNX</i>	+++	Count: 16 iterations Duration: 82994.15 ms Latency: 20610.55 ms Throughput: 0.19 FPS При разрешении 512x512
<i>Deoldify_stable</i>	++	Count: 24 iterations Duration: 88209.61 ms Latency: 14584.08 ms Throughput: 0.27 FPS При разрешении 512x512
<i>Deoldify_video</i>	+	Count: 20 iterations Duration: 75107.52 ms Latency: 15067.23 ms Throughput: 0.27 FPS При разрешении 512x512
<i>Deoldify_art</i>	++	Count: 16 iterations Duration: 86643.72 ms Latency: 21637.18 ms Throughput: 0.18 FPS При разрешении 512x512
<i>Colorization-v2</i> (для FP16 моделей)	+	Count: 268 iterations Duration: 61493.61 ms Latency: 908.73 ms Throughput: 4.36 FPS При разрешении 256x256
<i>Colorization-v2 Caffe<sup>3</sup></i>	+	Count: 340 iterations Duration: 61038.82 ms Latency: 712.75 ms Throughput: 5.57 FPS При разрешении 224x224
<i>Colorization-siggraph<sup>3</sup></i>	+++	Count: 156 iterations Duration: 62477.90 ms Latency: 1553.37 ms Throughput: 2.50 FPS При разрешении 256x256

Модели, представленные в табл. 2, были сконвертированы и оптимизированы для работы с OpenVINO с помощью встроенного инструмента «Model Optimizer»; для оценки качества работы сетей была использована метрика MOS – Mean opinion score (средняя оценка мнений), представленная для моделей в виде плюсов: чем их больше, тем модель лучше справляется с колоризацией изображений. Такая субъективная метрика была выбрана по той причине, что объективно оценить результаты колоризации довольно сложно. В целом все исследуемые модели показали хорошие или отличные результаты в скорости и качестве работы. Нейросетевые технологии работают существенно быстрее любого человека, однако и результаты работы профессионала и нейросетевой модели будут различаться. Большое преимущество искусственного интеллекта в том, что можно использовать различные модели, каждая из которых будет иметь свой «стиль» раскрашивания изображений, что позволит бесплатно и быстро раскрасить старинные фотографии. Профессионалам же останется взять лучшую (по их мнению) модель из полученных и скорректировать ее.

На рис. 4 представлены результаты колоризации, полученные с помощью нейронных сетей, исследованных в работе (табл. 2). Можно заметить, что наиболее близкие к реальности цвета показывают модели *Deoldify ONNX* и *Colorization-siggraph*. Модели семейства *Deoldify* [5] (за исключением *Deoldify ONNX*) довольно схожи и используют в основном холодные (синие цвета), особенно *Deoldify\_video*. Модели семейства *Colorization* (за исключением *Colorization-siggraph*) имеют тенденцию к более теплым (желтым) цветам. Экспериментально показано, что наибольшим быстродействием обладают модели семейства *Colorization* из Open\_model\_zoo OpenVINO [4], так как они оптимизированы самой компанией Intel под собственные процессоры. Скорость работы моделей семейства *Deoldify* оставляет желать лучшего, особенно учитывая выходное разрешение изображения, которое ниже, чем у моделей из зоопарка OpenVINO (табл. 2).

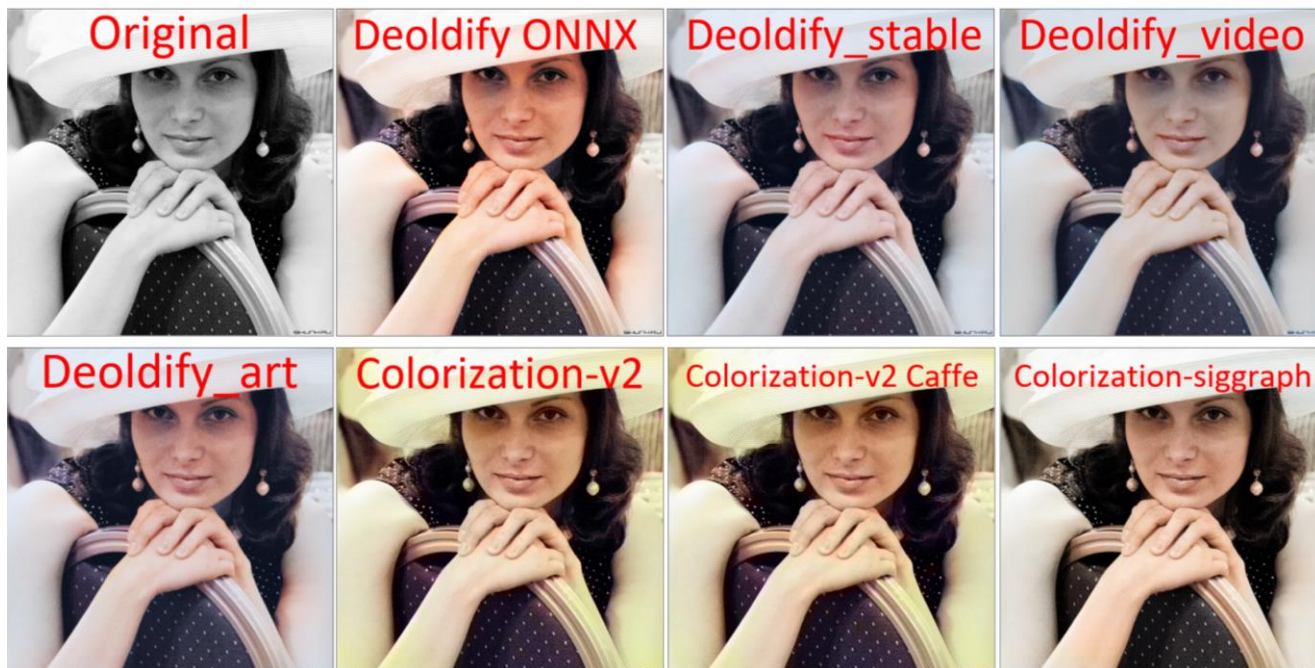


Рис. 4. Результат работы моделей колоризации фотографий

Fig. 4. Result of photo colorization models in operation

#### Увеличение разрешения

Поскольку старые фотографии обычно имеют малые размеры, в работе была поставлена задача увеличения масштаба этого изображения без потери качества (рис. 5). Классические алгоритмы интерполяции [6], такие как билинейная или бикубическая интерполяция, существовали задолго до появления современных нейронных сетей, однако данные алгоритмы не способны в полной мере увеличить разрешение без потери качества. В отличие от них, нейронные сети способны не просто использовать информацию с соседних пикселей, а буквально воссоздавать недостающие детали. Исследуемые в работе нейронные сети, направленные на увеличение разрешения, показывают лучший результат по сравнению с классическими видами интерполяции, даже если в связке с последними использовать алгоритмы или нейронные сети, направленные на уменьшение шума и размытия на изображении. В связи с этим было принято решение использовать именно нейросетевые модели для выполнения задачи увеличения разрешения.

Как и в случае с колоризацией, были рассмотрены как модели из зоопарка моделей OpenVINO, так и за его пределами (табл. 3). Для оценки результатов использовалась метрика PSNR – пиковое отношение сигнала к шуму (англ. peak signal-to-noise ratio). PSNR – инженерный термин, означающий соотношение между максимумом возможного значения сигнала и мощностью шума, искажающего значения сигнала [7]. Поскольку многие сигналы имеют широкий динамический диапазон, PSNR обычно измеряется в логарифмической шкале в децибелах.

Результаты работы нейронных сетей из табл. 3 представлены на рис. 6

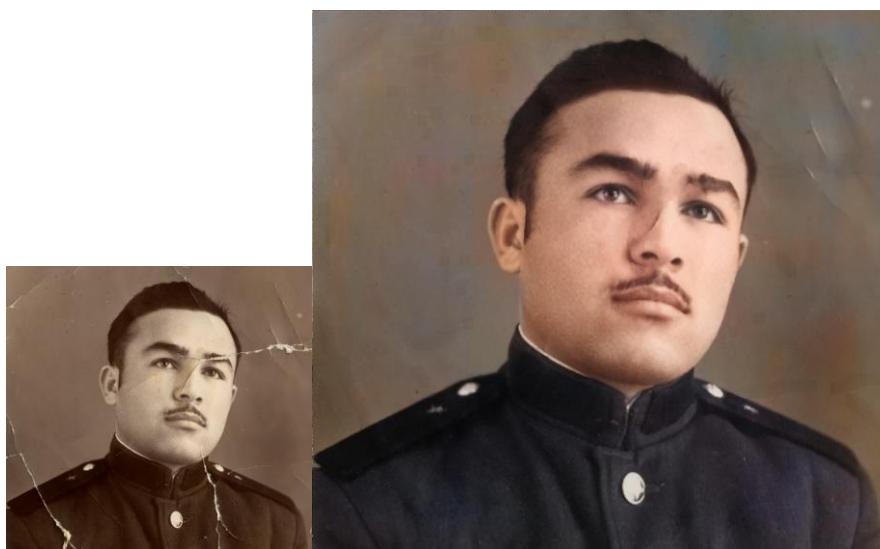


Рис. 5. Демонстрация работы программы «Time machine» от исходной фотографии до финального результата

Fig. 5. Demonstration of the «Time machine» program in operation from the original photo to the final result

Таблица 3

Модели увеличения разрешения

Table 3

Models of magnification of resolution

Model	Accuracy	Work speed
<i>single-image-super-resolution-1033</i> (для FP16 моделей)	PSNR: 40.39	Count: 364 iterations Duration: 60522.68 ms Latency: 659.88 ms Throughput: 6.01 FPS При разрешении 640x480
<i>single-image-super-resolution-1032</i> (для FP16 моделей)	PSNR: 49.62	Count: 308 iterations Duration: 61387.94 ms Latency: 788.56 ms Throughput: 5.02 FPS При разрешении 480x270
<i>EDSR</i>	PSNR: 68.18	Count: 92 iterations Duration: 65120.85 ms Latency: 2789.55 ms Throughput: 1.41 FPS При разрешении 256x256
<i>RCAN</i> (для FP16 моделей)	PSNR: 65.23	Count: 8 iterations Duration: 312597.10 ms Latency: 148520.46 ms Throughput: 0.03 FPS При разрешении 720x480
<i>SRGAN</i>	PSNR: 69.37	Count: 16 iterations Duration: 99383.44 ms Latency: 24717.16 ms Throughput: 0.16 FPS При разрешении 256x256



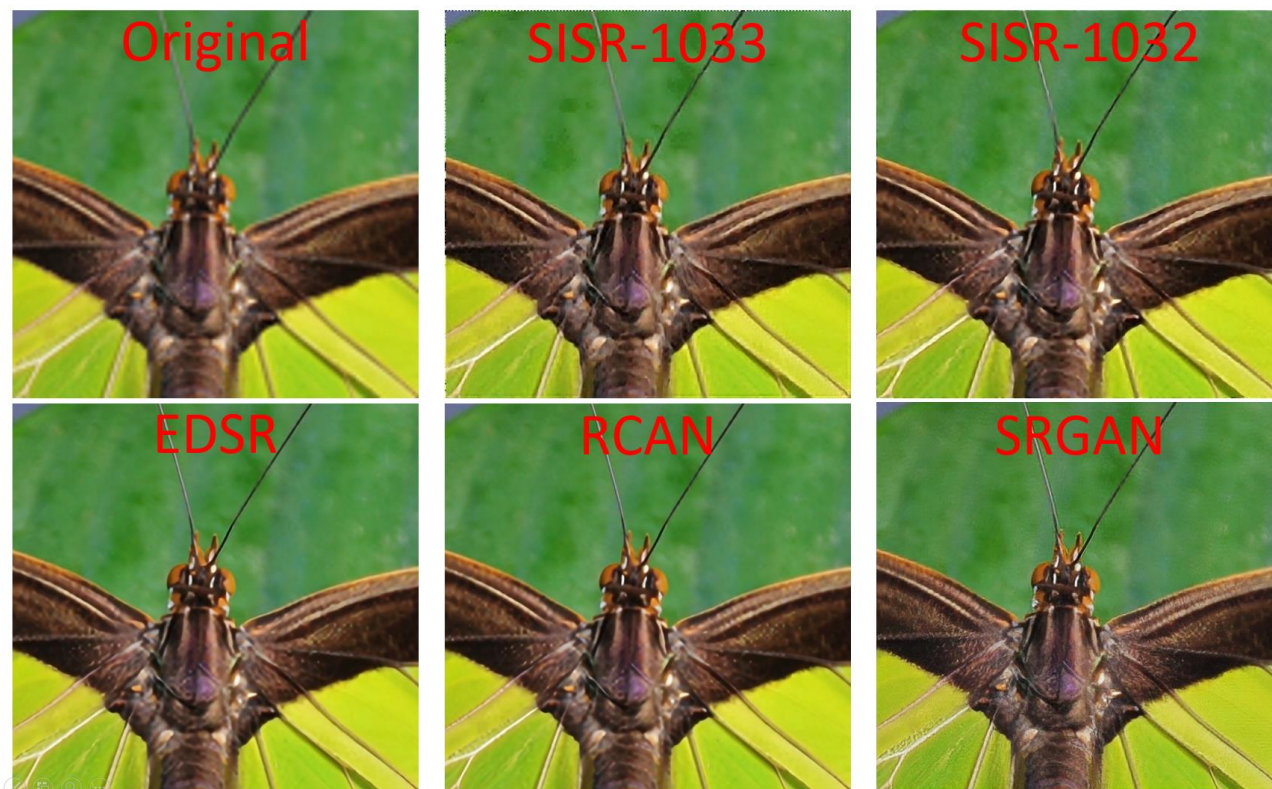


Рис. 6. Демонстрация работы моделей увеличения разрешения

Fig. 6. Demonstration of resolution magnification models in operation

Результат *single-image-super-resolution* (*SISR*) [4] виден сразу – изображение становится более четким. Если же мы сравним изображения, полученные *SISR* и *EDSR*, можем увидеть, что *EDSR* обработала усики насекомого лучше, и в целом прослеживается тенденция хорошей работы с линиями у *EDSR*. *RCAN* [8] обрабатывает линии еще лучше, они более «прямые», на них меньше искажений. Однако работа над одним изображением у этой сети занимает большое количество времени. Ещё одна нейронная сеть – генеративно-состязательная *SRGAN* [9]. Она обрабатывает линии с таким же качеством, что и *EDSR* [9]. Однако ее особенностью является то, что она сильно повышает резкость на изображении, из-за чего оно в каких-то моментах кажется более четким, а в каких-то добавляет излишние детали.

### Оптимизация работы сетей для обработки видеоряда

Все используемые в работе нейронные сети были оптимизированы или сконвертированы при помощи инструментов «Model optimizer» и «Converter», входящих в пакет инструментов OpenVINO; некоторые из сетей были дополнительно оптимизированы с помощью инструмента DL-Workbench в FP16 (для оптимизации работы веса были переведены в числа половинной точности, что практически не влияет на точность, однако существенно упрощает вычисления), что позволило улучшить показатели скорости их работы.

Исследуемые модели реставрации, колоризации и улучшения качества были также применены для обработки одного кадра видеоряда. Это привело к необходимости оптимизации не только скорости выполнения самих нейронных сетей, но и достижения оптимальности взаимодействия между ними. В разработанном приложении используется четыре нейронные сети (с возможностью выбора разных сетей для колоризации и увеличения разрешения). Были рассмотрены некоторые из способов организации взаимодействия между исследуемыми сетями [10].

Самый простой способ взаимодействия – синхронный. По очереди выполняется исполнение (инфер) каждой сети, передавая изображений от одной к другой. Такой способ имеет преимущество в плане написания кода и подходит для обработки одного изображения, но имеет очевидный минус в виде недостаточной производительности. Второй подход к организации взаимодействия сетей – использование готового класса AsyncPipeline из открытого зоопарка моделей OpenVINO. Благодаря ему удобно подавать изображения на вход сети и получать нужный результат. При этом предобработка и постобработка уже входит в класс модели, а также не нужно ждать, пока выполнится инфер. При использовании одной нейросети этот вариант выглядит замечательно. Однако в случае четырех нейросетей возникает проблема – как все это построить. Можно использовать класс AsyncPipeline несколько раз, но это приводит к сложности в восприятии кода: можно написать свой сложный класс модели для одного AsyncPipeline, но при этом необходимо продумать, как все эти модели связать внутри.

Было принято решение создать свой AsyncPipeline, суть которого заключается в создании четвертого экземпляра классов моделей. Каждый экземпляр на этапе своей инициализации запускает новый поток, который следит за входом сети и решает, когда вызывать инфер. Таким образом в коде четыре экземпляра классов, которые уже полностью готовы к работе. Затем запускается цикл, который будет проверять, можно ли подавать на вход первой сети изображение и в случае, если можно – делать это. Результат можно получить двумя способами - либо в цикле проверять выход последней модели, либо добавить callback, который вызывается всякий раз, когда изображение обработалось. Для устройств, имеющих графическое ядро от компании Intel, в работе предусмотрено распределение предобработки данных и вычисления нейронных сетей между процессором и видеокартой для увеличения скорости обработки данных.

### Выводы

Создан программный продукт «Time machine», позволяющий восстанавливать, раскрашивать и увеличивать разрешение старых фотографий и видео с применением компьютерного зрения. Исследованы различные архитектуры нейронных сетей, проведено их сравнение между собой и с традиционными алгоритмами. Разработанный программный продукт позволяет с довольно высокой скоростью и отличным качеством восстанавливать различные фотографии.

Репозиторий GitHub с исходниками программы – [https://github.com/eaidova/time\\_machine](https://github.com/eaidova/time_machine).

### Библиографический список

1. Intel Distribution of OpenVINO Toolkit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://software.intel.com/content/www/us/en/develop/tools/openvino-toolkit.html> (дата обращения 05.07.2021).
2. Алгоритмы выделения контуров изображений: своя игра [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/114452/> (дата обращения 07.07.2021).
3. Old Photo Restoration (Official PyTorch Implementation) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/microsoft/Bringing-Old-Photos-Back-to-Life> (дата обращения 08.07.2021).
4. OpenVINO Toolkit - Open Model Zoo repository [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://github.com/openvinotoolkit/open\\_model\\_zoo](https://github.com/openvinotoolkit/open_model_zoo) (дата обращения 05.07.2021).
5. DeOldify [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/jantic/DeOldify> (дата обращения 17.07.2021).
6. Методы интерполяции и аппроксимации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://portal.tpu.ru/SHARED/m/MBB/uchebnaya\\_rabota/Model/Tab/Interp\\_app.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/m/MBB/uchebnaya_rabota/Model/Tab/Interp_app.pdf) (дата обращения 16.07.2021).

- 
7. PSNR и SSIM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/126848/> (дата обращения 23.07.2021).
  8. Image Super-Resolution Using Very Deep Residual Channel Attention Networks [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/yulunzhang/RCAN> (дата обращения 13.07.2021).
  9. Single Image Super-Resolution with EDSR, WDSR and SRGAN [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/krasserm/super-resolution> (дата обращения 19.07.2021).
  10. Параллелизм против многопоточности против асинхронного программирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/337528/> (дата обращения 26.07.2021).

*Дата поступления  
в редакцию: 23.09.2021*



---

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

---

УДК 681.84/.85

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_54

### ВИБРОСОСТОЯНИЕ КОРПУСА И ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-1200

**Г.В. Аркадов**e-mail: [skrepka1964@gmail.com](mailto:skrepka1964@gmail.com)Акционерное общество «Научно-технический центр «Диапром»  
Обнинск, Россия**В.И. Павелко**e-mail: [vppvi@mail.ru](mailto:vppvi@mail.ru)Акционерное общество «Научно-технический центр «Диапром»  
Обнинск, Россия**В.П. Поваров**e-mail: [povarovvp@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:povarovvp@nvnpp1.rosenergoatom.ru)Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС  
Нововоронеж, Россия**М.Т. Слепов**ORCID: 0000-0001-5563-0526 e-mail: [slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru)Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС  
Нововоронеж, Россия

Приведены экспериментальные данные полученные в ходе эксплуатации различных систем технического диагностирования на первом и втором энергоблоках НВОАЭС-2. Благодаря новым конструкторским решениям по закреплению корпуса РУ ВВЭР-1200, а также новым узлам крепления ВКУ ВВЭР-1200, подтверждено снижение вибрационной нагрузки на корпус РУ ВВЭР1200. Описаны нейтронно-вибрационные измерения блока 1 НВОАЭС-2, приведены функции когерентности сигналов «ИК-Акс».

**Ключевые слова:** ВВЭР-1200, реакторная установка (РУ), шахта внутрикорпусная (ШВК), автоспектральная плотность мощности (АСПМ), главный циркуляционный контур (ГЦК), акустическая стоячая волна (АСВ), система контроля, управления и диагностики, датчик абсолютных перемещений (ДАП), система контроля вибраций (СКВ).

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Аркадов, Г.В. Вибросостояние корпуса и внутрикорпусных устройств реакторной установки ВВЭР-1200 / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, В.П. Поваров, М.Т. Слепов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 1. С. 54-67. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_54

### VIBRATION RESISTANCE STATE OF VESSEL AND IN-VESSEL EQUIPMENT OF PWR (VVER)-1200 REACTOR SYSTEM

**G.V. Arkadov**e-mail: [skrepka1964@gmail.com](mailto:skrepka1964@gmail.com)Joint Stock Company «Scientific and Technical Center «Diaprom»  
Obninsk, Russia

**V.I. Pavelko**

e-mail: [vippi@mail.ru](mailto:vippi@mail.ru)

Joint Stock Company «Scientific and Technical Center «Diaprom»

*Obninsk, Russia*

**V.P. Povarov**

e-mail: [povarovvp@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:povarovvp@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» Novovoronezh NPP

*Novovoronezh, Russia*

**M.T. Slepov**

ORCID: **0000-0001-5563-0526** e-mail: [slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» Novovoronezh NPP

*Novovoronezh, Russia*

**Abstract.** Experimental data obtained during operation of various technical diagnostics systems at the first and the second power units of NVNPP-2 (Novovoronezh Nuclear Power Plant), are presented. Due to new design solutions for anchorage of RS PWR-1200 vessel, as well as new IVC PWR-1200 attachment nodes, a decrease of vibration load on RS PWR-1200 vessel was confirmed. Neutron-vibration measurements of power unit 1 of NVNPP-2 are described, coherence functions of «IC-Acc» signals are given.

**Key words:** PWR-1200, reactor system (RS), in-vessel pit (IVP), auto-spectral power density (ASPD), main circulation loop (MCL), acoustic standing wave (ASW), monitoring, control and diagnostics system, absolute displacement sensor (ADS), vibration monitoring system (VMS).

**FOR CITATION:** G.V. Arkadov, V.I. Pavelko, V.P. Povarov, M.T. Slepov. Vibration resistance state of vessel and in-vessel equipment of PWR (VVER)-1200 reactor system. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 1. Pp. 54-67. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_54

## Введение

Принимая во внимание специфику освоения технических и программных средств, а также работы по их совершенствованию, выделим пять этапов внедрения системы диагностики на объект, находящийся в эксплуатации.

На первом этапе важно распознать главные физические источники (причины появления) резонансных спектральных особенностей, наблюдаемых вибрационных и шумовых сигналов. На втором необходимо найти их «пространственную протяженность» или ответить на вопрос: «привязан» ли данный резонанс к какому-либо конкретному элементу (узлу, блоку) объекта или является общекартинным явлением? На третьем следует изучить взаимовлияние элементов объекта друг на друга на частоте резонанса; на четвертом этапе – прокалибровать данную спектральную особенность, т.е. связать какие-либо параметры резонанса (амплитуду, эффективную ширину, местоположение на оси частот) с численными характеристиками идентифицированного физического явления (например, связать размах колебаний элемента в миллиметрах с амплитудой резонанса в единицах АСПМ ( $\text{ед}^2/\text{Гц}$ )). Последний, пятый этап – установление таких пороговых значений численных характеристик резонанса, выход за которые угрожает работоспособности объекта. Существенно, что данный порог должен выявлять неисправность на самой ранней стадии ее зарождения.

Такое разбиение на этапы не носит строго последовательного характера: по каким-то резонансам уже пройдены несколько этапов, некоторые – не распознаны вовсе. Поэтому данная работа относится к первому этапу – физической интерпретации спектральных особенностей, хотя большое внимание уделяется и исследованию различных взаимосвязей.

## Способы установки первичных преобразователей для регистрации вибрации корпуса РУ и ШВК реакторной установки ВВЭР-1200

Первое поколение систем виброшумовой диагностики контролировали вибрации корпуса РУ и ШВК с помощью четырех датчиков абсолютного перемещения, которые монтировались на нажимном кольце (ВВЭР-440 – позиция 1 на рис. 1) или на шпильках главного разъёма (ВВЭР-1000 – позиция 2 на рис. 1) в углах соответствующего квадрата. Эти вибродатчики относятся к классу высокочувствительных, способных измерять виброперемещения, начиная с единиц микрон. Высокие рабочие температуры, а также интенсивные радиационные поля делали их весьма ненадежными. Кроме того, они оказались не технологичными с точки зрения обслуживания, так как при снятии крышки реактора их приходилось демонтировать. Поэтому их заменили на четыре акселерометра, которые монтировались на четырех вертикальных стойках верхнего блока (ВВЭР-1000 позиция 3 на рис. 1 и ВВЭР-1200 позиция 4 на рис. 1) в углах соответствующего прямоугольника.

Рабочая температура и радиационные поля в местах установки акселерометров оказались благоприятными для длительной их эксплуатации. Тождественность такой замены типов вибродатчиков устанавливалась экспериментально на блоке 3 КАЭС, а затем на двух блоках Тяньваньской АЭС. Чувствительность акселерометров к колебаниям корпуса и ШВК оказалась выше, чем у ДАП при полном сохранении числа значимых резонансов и всех фазовых характеристик сигналов. Это означает, что стойки верхнего блока, на которых крепятся акселерометры, абсолютно жестко связаны с крышкой реактора, и они не искажают передачу вибрационной картины колебаний из горизонта фланца главного разъёма в горизонт установки акселерометров [8, 15].

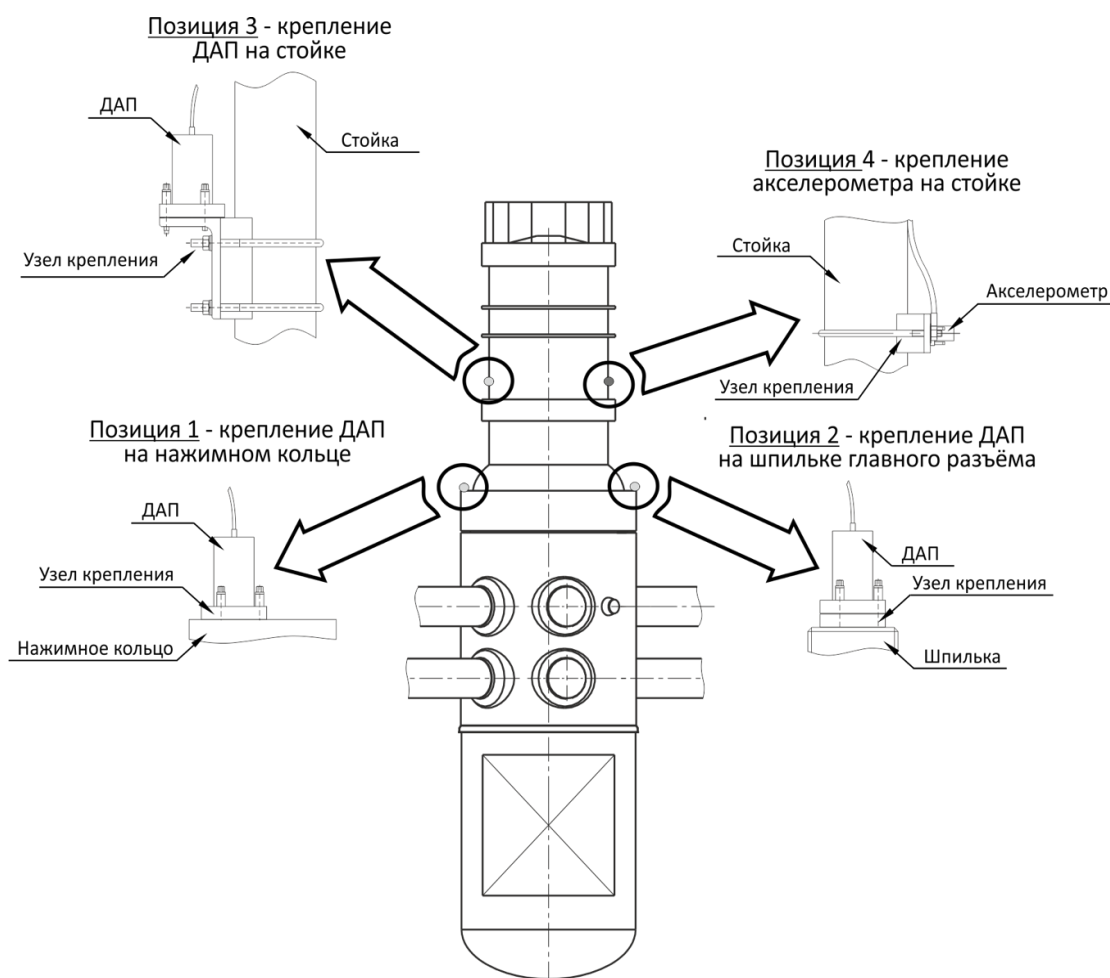
Виброперемещения корпуса возникают под действием гидродинамического напора ТН и вибраций, исходящих от ГЦНА по металлу конструкции. При этом в совместные с корпусом колебания вовлекаются ВКУ и ТВС. К ним также чувствителен внутризонный нейтронный поток, регистрируемый датчиками прямого заряда (ДПЗ), и внезонный нейтронный поток, регистрируемый ионизационными камерами (ИК). Корреляции сигналов разной физической природы позволяют выделять совместные колебания корпуса-ШВК, ШВК-ТВС, корпуса-ШВК-ТВС. До выхода РУ на мощность, когда присутствуют только измерения вибродатчиками, совершенно определенно селективировать совместные колебания преждевременно [14].

### Конструктивные особенности узлов крепления корпуса РУ и ШВК

Корпус РУ и ШВК представляют собой систему связанных масс, колебания которых вызваны внутренними гидродинамическими силами потока ТН. Они хорошо моделируются в цилиндрических координатах двумя коаксиалами (в технических приложениях их также называют обечайками), связанными между собой внутренними жесткостными элементами, а корпус связан со строительными конструкциями наружными кольцевыми распределенными жесткостями в двух горизонтах (рис. 2). Узлы крепления – элементы трехмерные и описываются соответствующими матрицами жесткости, но почти все имеют ярко выраженную направленность, т.е. существует координатный вектор, по направлению которого жесткость принимает экстремальное значение. Выделим также точечную (сосредоточенную) и распределенную жесткость. Например, кольцевая опора корпуса РУ – непрерывно распределенный по азимуту жесткостной элемент, а шпоночные узлы ШВК – точечные.

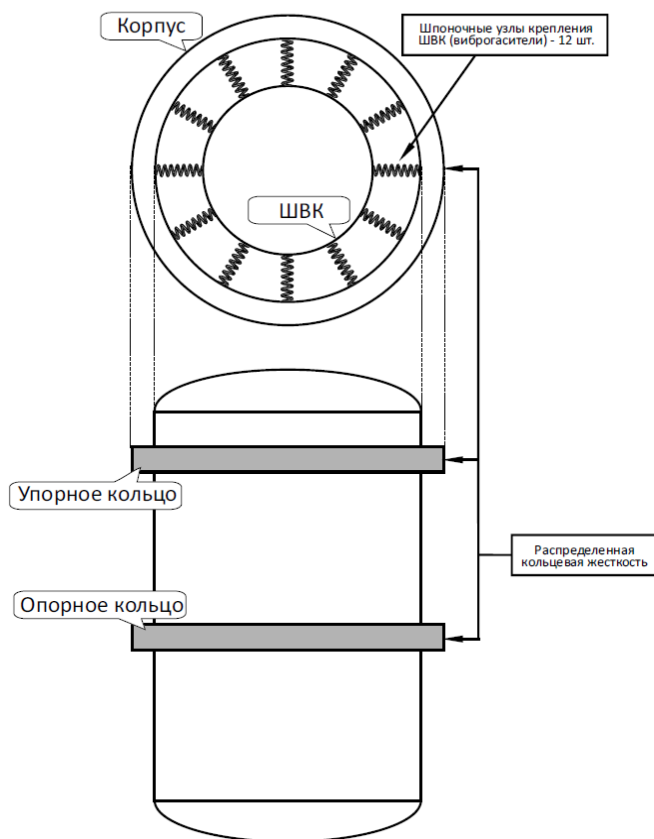
Рассматриваемые узлы крепления допускают зазоры между сочленяемыми элементами, что составляет наибольшую трудность при их моделировании. В проекте ВВЭР-1200 три горизонта узлов крепления ШВК получили дальнейшее развитие. Так, в верхнем узле крепления трубчатые упругие сегменты ВВЭР-1000 заменены на упругие элементы из расширенного графита, которые практически не теряют свои жесткостные характеристики за кампа-

нию. В нижнем узле крепления увеличено число виброгасителей с 8 до 12 шт. Жесткость среднего горизонта крепления ШВК определяется так называемым обжатием шахты при достижении номинальных температур ТН. В свою очередь, обжатие определяется постоянством по азимуту величины зазора в паре «ШВК-разделитель потока» в «холодном» состоянии и качеством исполнения поверхностей в этой паре. Недостаточная жесткость верхнего узла крепления может вызвать так называемые «плавающие» типы колебаний ШВК, соответствующие слабому закреплению верха ШВК, с очень низкой собственной частотой. Недостаточная жесткость среднего узла крепления снижает основной низший тип колебаний ШВК, соответствующий колебаниям балки с двумя закреплёнными концами. Недостаточная жёсткость нижних узлов крепления высвобождает низший маятниковый тип колебаний ШВК по типу колебаний балки с одним верхним креплением. Такие типы колебаний наблюдались в процессе длительного развития технологии ВВЭР.



**Рис. 1. Размещение ДАП на шпильках главного разъёма и акселерометров на стойках верхнего блока**

**Fig. 1. Arrangement of ADS on studs of the main connector and accelerometers on racks of the upper block**



**Рис. 2. Схематичное представление узлов крепления корпуса РУ и ШВК**

**Fig. 2. Schematic representation of the attachment nodes of RS vessel and IVP**

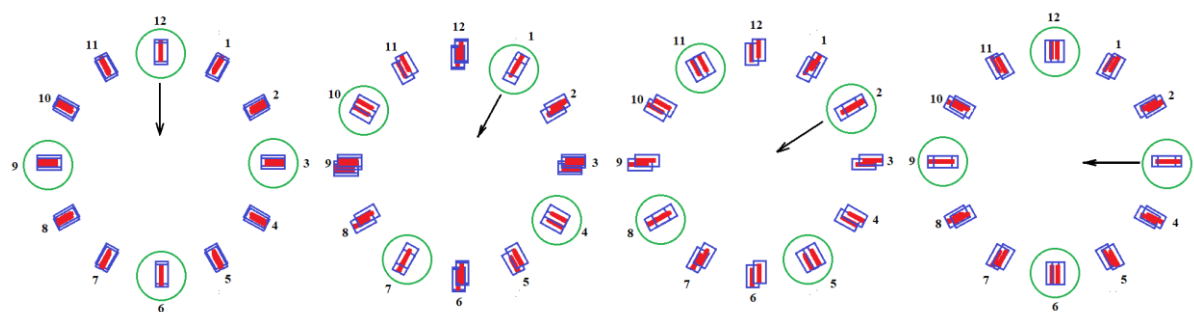
Строго говоря, нельзя объявлять некоторые колебания ШВК как собственные колебания только ШВК в отрыве от колебаний корпуса. Также некорректно объявлять, что некоторые колебания ШВК «навязаны» извне колебаниями только корпуса РУ. В любом случае необходимо говорить о совместных колебаниях корпуса и ШВК. Тем не менее, в нейтронно-шумовых вибрационных моделях ШВК, как правило, допускается предположение об абсолютно жестком закреплении корпуса РУ в строительных конструкциях и, как следствие, виброперемещение ШВК относительно корпуса РУ объявляется собственным типом колебаний ШВК. В данном случае априори не принимается во внимание состояние внешних узлов крепления корпуса РУ и предполагается, что регистрируемые нейтронные шумы несут информацию только о собственных колебаниях ШВК и, в частности, о состоянии ее узлов крепления.

Такая модель, при которой виброперемещения собственно корпуса РУ считаются нулевыми, бессмысленна при размещении вибродатчиков на самом корпусе РУ. Вибродатчики, физически регистрируя виброперемещения корпуса РУ, несут информацию и о вибрациях ВКУ, именно в силу того, что рассматриваемые колебания являются совместными. Типы колебаний корпуса определяются не только состоянием (жесткостными характеристиками) его собственных опорных конструкций, но и жесткостными характеристиками узлов крепления ВКУ и, в частности, тремя горизонтами узлов крепления ШВК. Именно поэтому в сигналах вибродатчиков, установленных на корпусе РУ или на верхнем блоке корпуса РУ, проявляются и компоненты вибраций ВКУ.

### Колебания корпуса РУ и ШВК при разном числе функционирующих ГЦНА

Рассмотрим активные эксперименты, позволяющие интерпретировать вибрационное состояние корпуса РУ и ШВК. При неполном числе функционирующих ГЦНА, что происходит всякий раз при разогреве и расхолаживании блока, гидростатический напор на корпус РУ и ШВК со стороны теплоносителя теплообменных петель может оказаться неуравновешенным. Только в двух случаях, когда функционируют два ГЦНА противоположных петель (первый и третий или второй и четвертый ГЦНА), результирующая статическая сила, воздействующая на корпус и ШВК со стороны ТН, будет нулевой. Этот вывод базируется на центральной симметрии ГЦК и противоположно направленных и равных по модулю сил со стороны ТН двух активных и двух пассивных петель, а также на допущении тождественности четырех петель. Во всех других случаях неполного числа функционирующих ГЦНА корпус реактора и ШВК будут уклоняться от своего состояния равновесия под действием ненулевой, неуравновешенной статической силы. В результате шахту вынуждают войти в «жесткое» зацепление с некоторыми виброгасителями (шпонками). К ним, прежде всего, относятся виброгасители, диаметрально противоположные по отношению к активной петле. Данное отклонение шахты от вертикали ограничивается другой парой диаметрально расположенных виброгасителей. Они располагаются в перпендикулярном направлении по отношению к активной петле [17].

Пусть активной петлей, по-прежнему единственной, станет петля, противоположно расположенная первой. Например, если вначале активным был ГЦНА1, а все остальные три ГЦНА не функционировали, то теперь активным стал только ГЦНА3 противоположной петли. Теперь шахта отклонится от вертикали в том же направлении, но в противоположную сторону. По-прежнему ограничивать перемещение будет та же пара перпендикулярно расположенных шпонок, но другими своими поверхностями. В итоге, суммируя по модулю перемещения шахты в одну и другую стороны, получим полный физически реализуемый размах колебаний шахты в одном направлении (в данном примере – по направлению «первая-третья» петля). Аналогичные переключения совершаются с ГЦНА2 и ГЦНА4, чтобы оценить размах колебаний шахты в направлении «петля2-петля4». Этими переключениями четырех ГЦНА совершается, во-первых, оценивание величин шпоночных зазоров в двух азимутальных направлениях, во-вторых, выявляются те частоты, с которыми может быть связан тип колебаний шахты, как балки с двумя закреплёнными концами. Это наиболее благоприятный, с точки зрения штатного закрепления шахты, тип колебаний. При износе виброгасителей и, соответственно, увеличения зазоров шпоночных соединений, высвобождается неблагоприятный тип колебаний с незакрепленным нижним концом. Его считают низшим типом колебаний шахты, хотя одновременное ослабление верхнего узла крепления шахты приводит к так называемому «плавающему» типу колебаний. Его собственная частота ещё ниже, чем собственная частота колебаний с одним верхним закреплённым концом [15]. Статическое перемещение ШВК будет ограничиваться величинами зазоров в узлах крепления ШВК. А турбулентные составляющие пульсаций давления ТН будут вызывать вибрации ШВК вокруг достигнутого статического состояния. Если при этом, некоторые зазоры узлов крепления будут выбраны, то есть станут нулевыми, то, вероятнее всего, вибрации будут происходить с соударениями в узлах крепления корпуса и ШВК. В процессе эксплуатации контактные пары шпоночных соединений изнашиваются, увеличивая тем самым соответствующие зазоры. Их контролируют периодически на ППР прямыми геометрическими измерениями пазов ШВК и шпонок на корпусе РУ. Измерение вибраций корпуса РУ при неполном числе функционирующих ГЦНА дает способ дистанционного косвенного контроля зазоров шпоночных узлов крепления, являясь, своего рода, экстремальным тестом (рис. 3). В номинальном режиме эксплуатации, при функционировании всех 4 ГЦНА, установившийся размах вибраций ШВК во всех направлениях может не «выбирать» зазоры, в отличие от принудительных отклонений ШВК при неполном числе функционирующих ГЦНА.



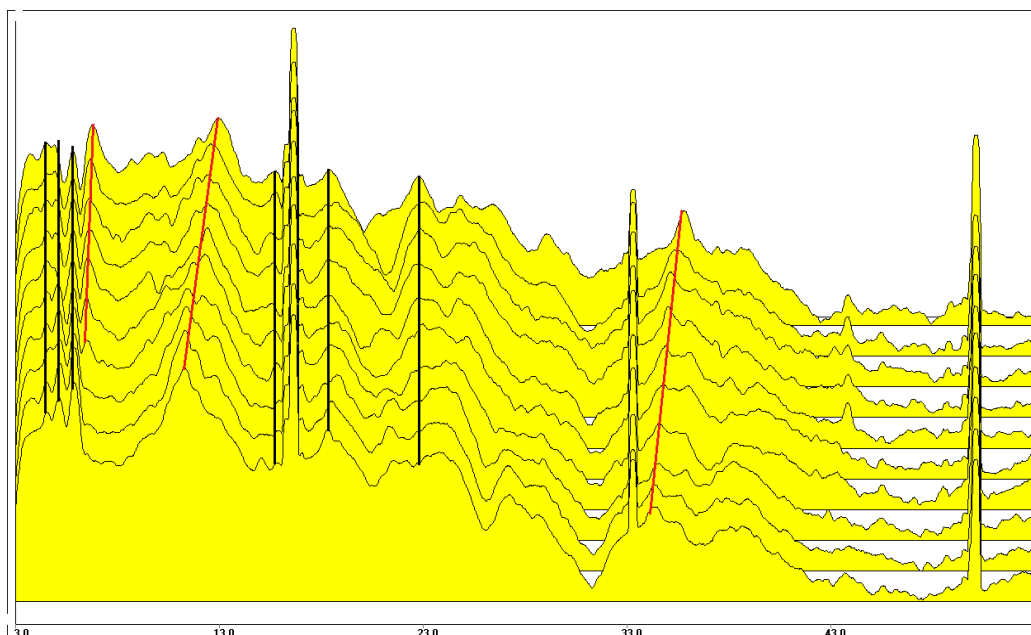
**Рис. 3. Условное изображение 12-шпоночных узлов при четырех разных направлениях вынужденных колебаний:**  
*направление «12-6» – левый циферблат, направление «1-7» – второй слева, направление «2-8» второй справа, направление «3-9» – крайний правый*

**Fig. 3. Conventional image of 12-key nodes with four different directions of forced oscillations:**  
*direction «12-6» is the left dial, direction «1-7» is the second from the left, direction «2-8» is the second from the right, direction «3-9» is the far right*

### Колебания корпуса РУ, измеренные четырьмя акселерометрами

Эксплуатируемые на НВОАЭС-2 системы контроля вибрации (СКВ) обладают функцией автоматической регистрации многоканальных реализаций по заранее заданному временному графику. Благодаря этому, впервые были зарегистрированы многочисленные процессы при многократном изменении (увеличении и уменьшении) мощности РУ. При увеличении мощности РУ водопады спектров сигналов акселерометров, установленных на верхнем блоке РУ, дают характерную картину монотонного снижения центральных частот акустических стоячих волн (АСВ), а также неизменных частот вибрационных резонансов (рис. 4). Таким образом, корпус подвержен вынужденным колебаниям на частоте АСВ1п (6,7 Гц) и на частоте ее второй гармоники АСВ2п (11,2 Гц), а корпусная АСВ1к (8,7 Гц) влияет на его вибросостояние весьма слабо. Колебания на частоте АСВ2п являются доминирующими по мощности, а по амплитуде уступают лишь колебаниям на оборотной частоте ГЦНА. Низкодобротный резонанс АСВ2п покрывает вибрационные частоты совместных колебаний оборудования ГЦК, образуя практически глобальный обобщенный колебательный процесс. Амплитуда этих колебаний незначительна, (порядка 5 мкм). Также по незначительной амплитуде вынужденных колебаний корпуса РУ можно заметить влияние на его вибрационное состояние высших АСВ4п, АСВ6п, АСВ8п. Резонанс АСВ1п при достижении 100 % мощности РУ практически совпадает с вибрационным резонансом, но сколько-нибудь опасного эффекта увеличения его амплитуды не наблюдается. Таким образом, два доминирующих резонанса АСВ1п и АСВ2п имеют в своих частотных окрестностях вибрационные эффекты [8, 9]. Взаимные характеристики рассматриваемых четырех сигналов акселерометров дают уникальную картину колебаний корпуса РУ ВВЭР-1200 (рис. 4, 5). При последовательном обходе пар датчиков по замкнутому контуру – 1-2, 2-3, 3-4, 4-1 – получаем так называемый баланс фаз, состоящий в том, что их сумма всегда кратна  $360^{\circ}$  или нулевая. В данном случае имеем последовательность  $0^{\circ}, 180^{\circ}, 0^{\circ}, 180^{\circ}$ , свойственную однонаправленным маятниковым колебаниям. Таким образом, когда синфазные сигналы датчиков с номерами 1 и 2 увеличиваются, противофазные им сигналы датчиков с номерами 3 и 4 – уменьшаются, и наоборот (таблица на рис. 5). Ось, вокруг которой происходят маятниковые колебания, определяется с точностью  $\pm 45^{\circ}$  и среднее ее положение совпадает с осью реактора «II-IV» [13]. Впервые в практике виброшумового анализа такая последовательность фаз наблюдается во всем исследуемом диапазоне частот. Обычно маятниковый тип колебаний реализуется на некоторой одной собственной частоте, захватывая очень малую окрестность вокруг данной ча-

стоты. Здесь же все регистрируемые частоты обладают одним и тем же свойством маятниковых колебаний. Очевидно, что это не собственные колебания. Практическая задача на собственные значения не может иметь решения на континууме частот.



**Рис. 4. Семейства АСПМ сигнала акселерометра S04, установленного на верхнем блоке при изменении мощности РУ (сверху вниз): МКУ, 9 %, 17 %, 32 %, 41 %, 57 %, 77 %, 94 %, 99 %, 100 %**

**Fig. 4. ASPM families of the accelerometer signal S04, installed on the upper block when the power of RS is changed (from top downward): MCR, 9 %, 17 %, 32 %, 41 %, 57 %, 77 %, 94 %, 99 %, 100 %**

Накопленный опыт вибромониторинга колебаний корпуса РУ на различных блоках ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 свидетельствует о существовании большого числа типов колебаний с комбинациями характерных фаз ( $0^0, 90^0, 180^0$ ). Среди них присутствуют и маятниковые, и круговые, и вертикальные, и так называемые стохастические типы колебаний с амплитудами много больше 5 мкм. Новые конструкторские решения по закреплению корпуса РУ ВВЭР-1200, а также новые узлы крепления ВКУ ВВЭР-1200 значительно снизили виброн нагруженность корпуса [14]. При заметном износе узлов крепления ШВК после многолетней эксплуатации будет преобладать тот или иной тип собственных колебаний, определяя тем самым горизонт крепления ШВК, который подвергся наибольшему изменению. В этом смысле стартовые спектральные характеристики вибрационных сигналов корпуса РУ блока 1 НВО АЭС-2, в которых не зафиксирован ни один тип собственных колебаний ШВК, представляются весьма благоприятными.

### Нейтронно-вибрационные измерения блока 1 НВОАЭС-2

В состав СКВ, помимо прямых виброизмерительных каналов, входят измерительные каналы, которые косвенно чувствительны к виброперемещениям активной зоны, а значит и к виброперемещениям ШВК. Таковыми являются вне- и внутризонные нейтронные каналы на базе ионизационных камер и датчиков прямого заряда. Автоспектры сигналов ИК на 100 % уровне мощности РУ ВВЭР-1200 (рис. 7) обладают единственным значимым локальным максимумом на частоте АСВ1к (8,7 Гц). Это частота вынужденных АСВ1к колебаний ШВК совместно с реактивным барометрическим эффектом [8, 12, 13].



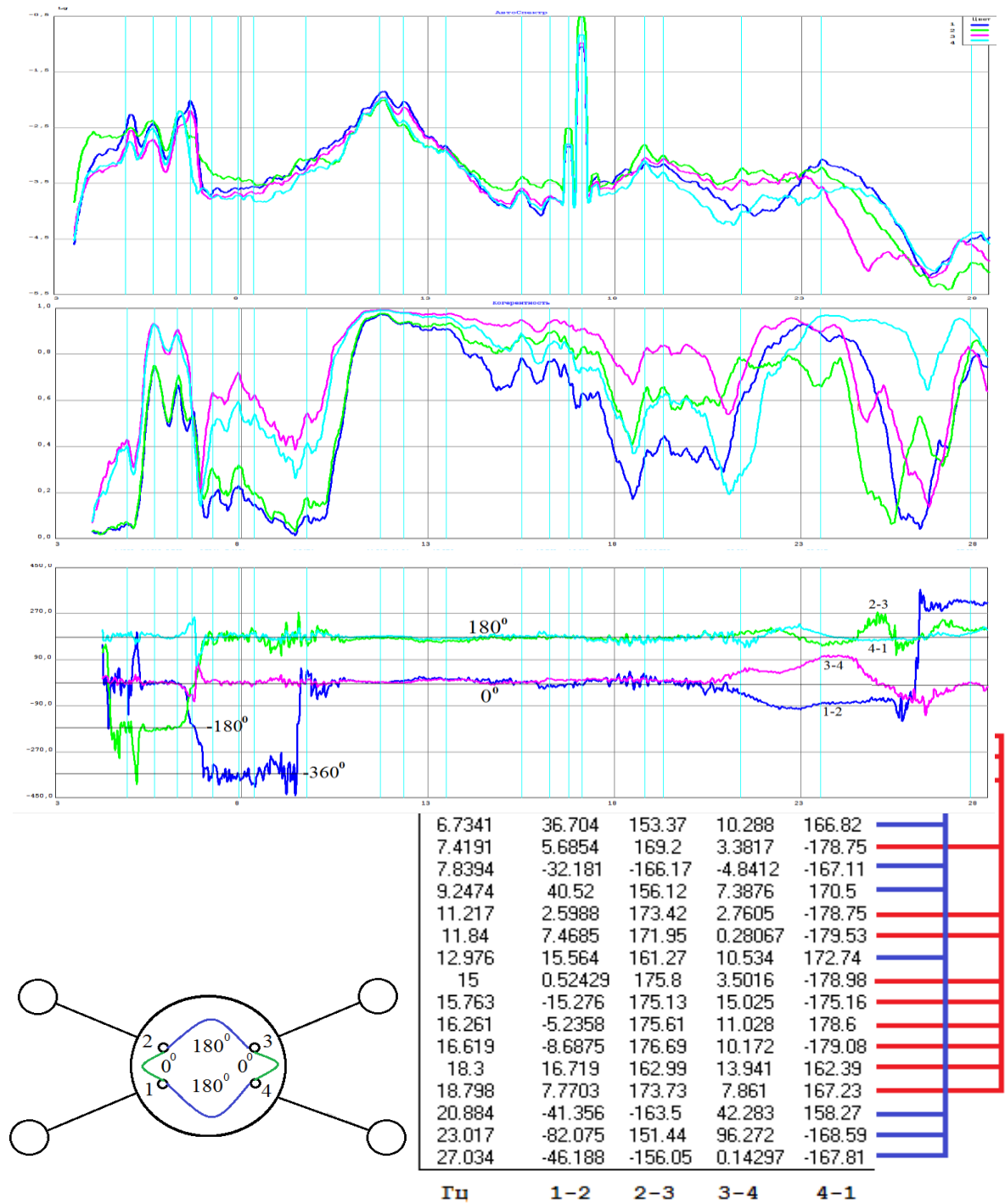
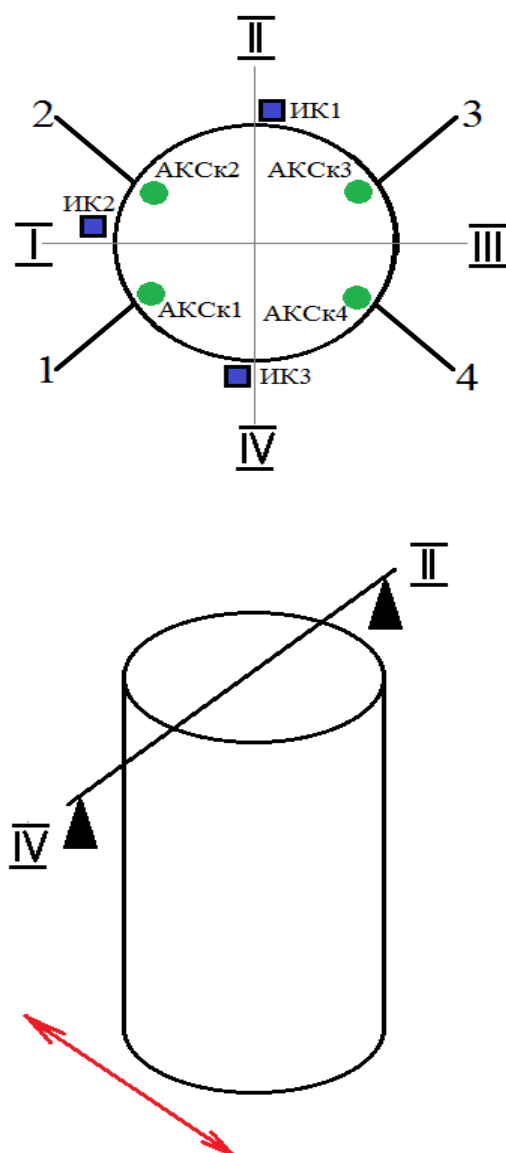


Рис. 5. АСПМ сигналов четырех акселерометров, установленных на верхнем блоке (верхнее семейство графиков), функции когерентности и фазы сигналов соседних акселерометров (1-2, 2-3, 3-4, 4-1), значения четырех фаз на отмеченных частотах. Красным цветом обозначено множество фаз  $0^{\circ}, 180^{\circ}, 0^{\circ}, 180^{\circ}$ , характерных для однонаправленных маятниковых колебаний. 100% мощность

Fig. 5. ASPM signals of four accelerometers installed on the upper block (upper family of graphs), coherence functions and phases of signals of neighboring accelerometers (1-2, 2-3, 3-4, 4-1), values of the four phases at the marked frequencies. The red color indicates a set of phases  $0^{\circ}, 180^{\circ}, 0^{\circ}, 180^{\circ}$ , specific to unidirectional pendulum oscillations. 100% power



**Рис. 6. Расположение ионизационных камер (ИК) и акселерометров на верхнем блоке и направление маятниковых колебаний корпуса РУ**

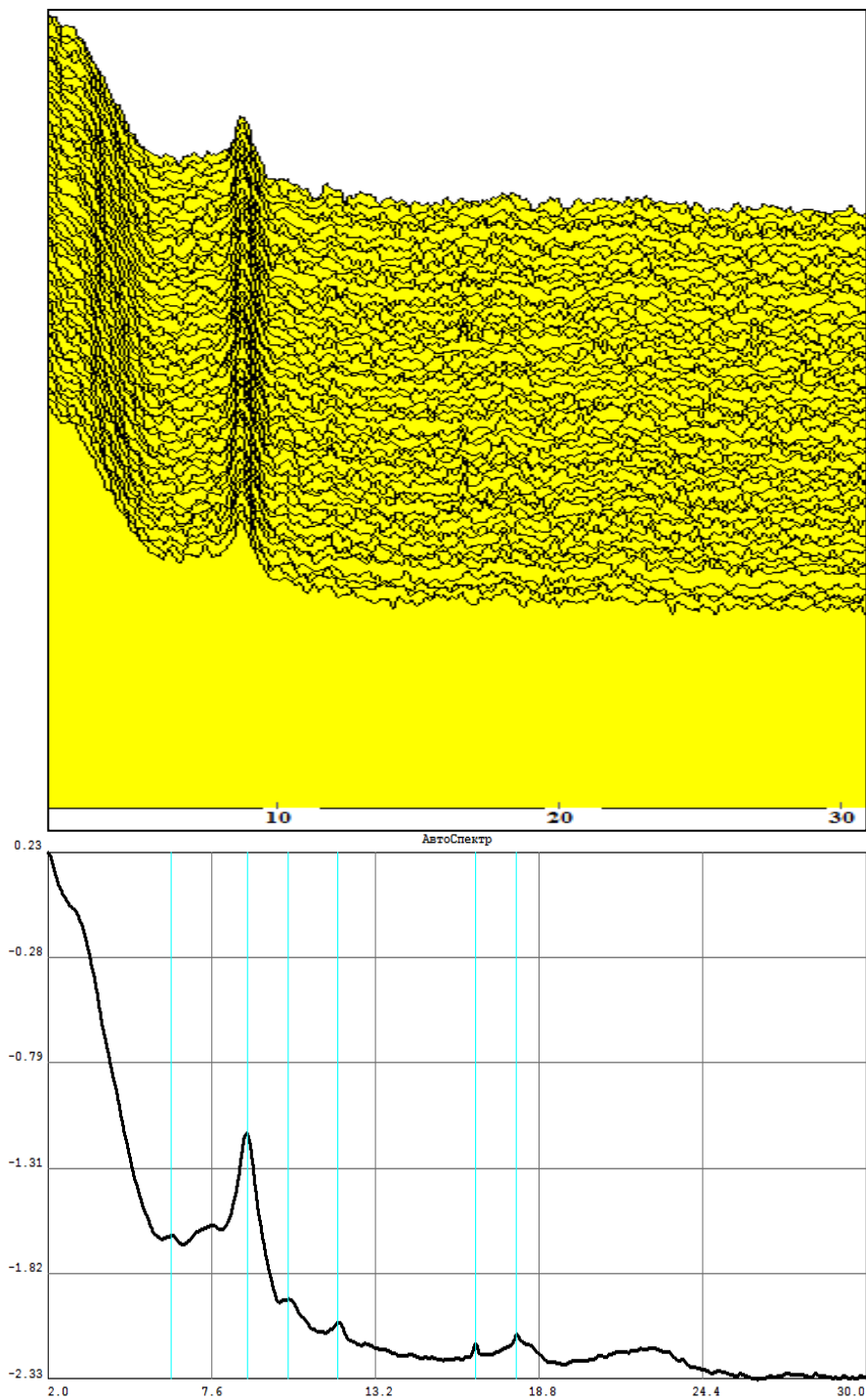
**Fig. 6. Location of ionization chambers (IC) and accelerometers on the upper block and direction of pendulum oscillations of the RS vessel**

Реактивный эффект доминирует, так как вибрационное воздействие АСВ1к мало. Имея возможность проводить многократные, практически ничем не ограниченные во времени измерения, при неизменном стационарном состоянии РУ, можно извлечь другие незначительные по амплитуде резонансы (нижний график на рис. 7). Функции когерентности сигналов «ИК-ИК» их выделяют как малозначимые (рис. 8), так как вибрационные эффекты столь ничтожны, что маскируются глобальными нейтронно-температурными эффектами на низких частотах, а на высоких частотах их маскирует собственный «белый» шум ИК.

Продолжая далее поиск вибрационных резонансов ШВК, рассмотрим взаимные характеристики сигналов «ИК-акселерометр». Когерентность между сигналом акселерометра на верхнем блоке РУ и сигналом ионизационной камеры выделяет совместные колебания корпуса и ШВК (табл. 1). Здесь та же проблема – крайне низкая когерентность из-за ничтожности вибрационных эффектов. Однако после усреднения большого числа оценок весьма малые значения функции когерентности становятся значимыми.

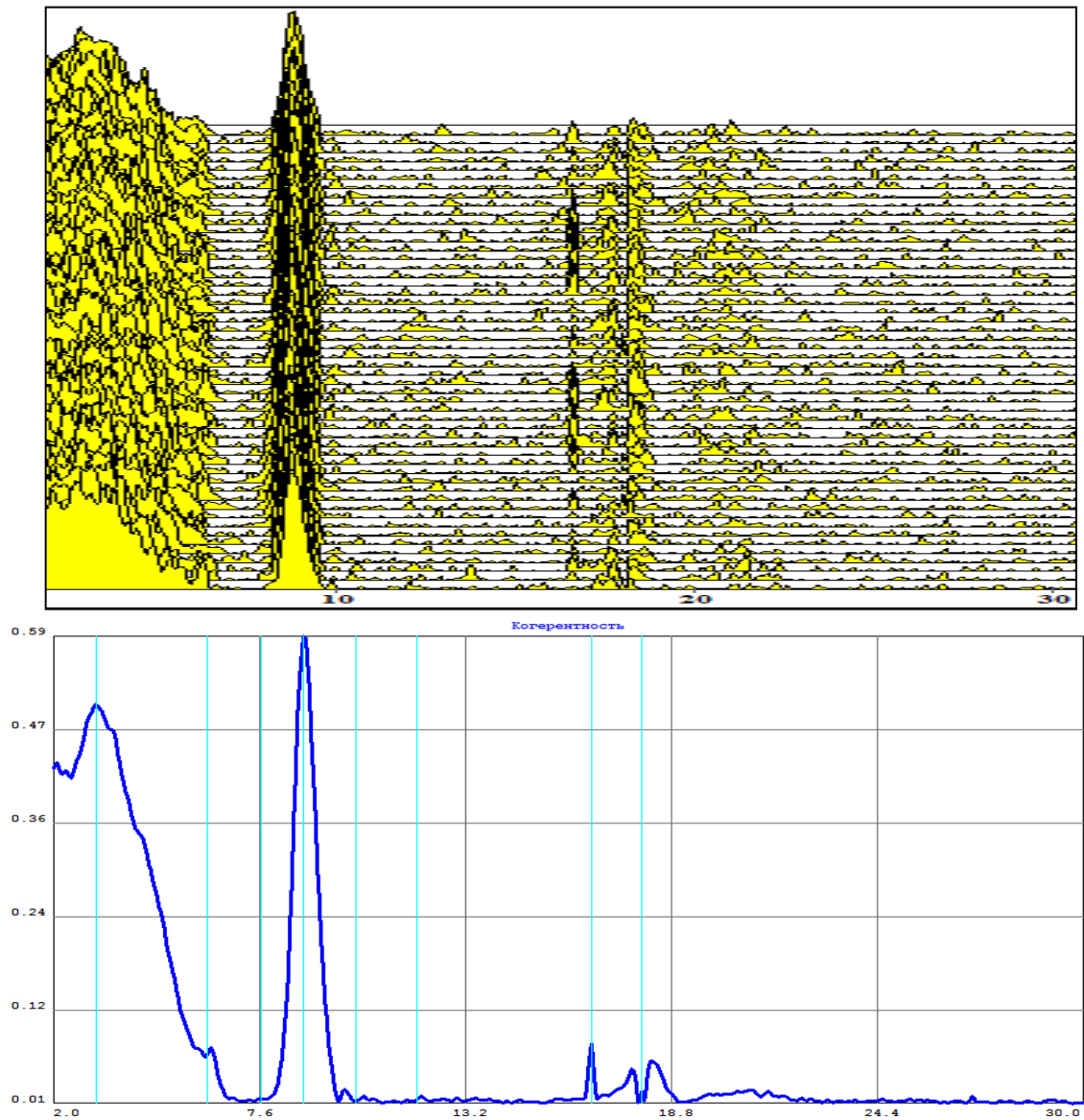
При трех ионизационных камерах (ИК1, ИК2, ИК3) и четырех акселерометрах на корпусе РУ (АксК1, АксК2, АксК3, АксК4) получаются 12 всевозможных когерентностей пар сигналов разной физической природы «ИК-АксК». Существенно, что во всех когерентностях выделены резонансы только на частотах АСВ.

Таким образом, собственных колебаний ШВК не удалось обнаружить ни по каким параметрам сигналов: «ИК-ИК», «ИК-АКСк», «ИК-АКСп», «АКСк-АКСк», что свидетельствует о весьма малых виброперемещениях ШВК и, как следствие, весьма благоприятном вибростоянии ШВК.



**Рис. 7. Семейство АСПМ сигнала ионизационной камеры (ИК1) при многократных измерениях на 100% уровне мощности РУ и их средняя АСПМ (нижний график)**

**Fig. 7. The ASPM family of the ionization chamber (IC1) signal with multiple measurements at 100% power level of RS and their average ASPM (lower graph)**

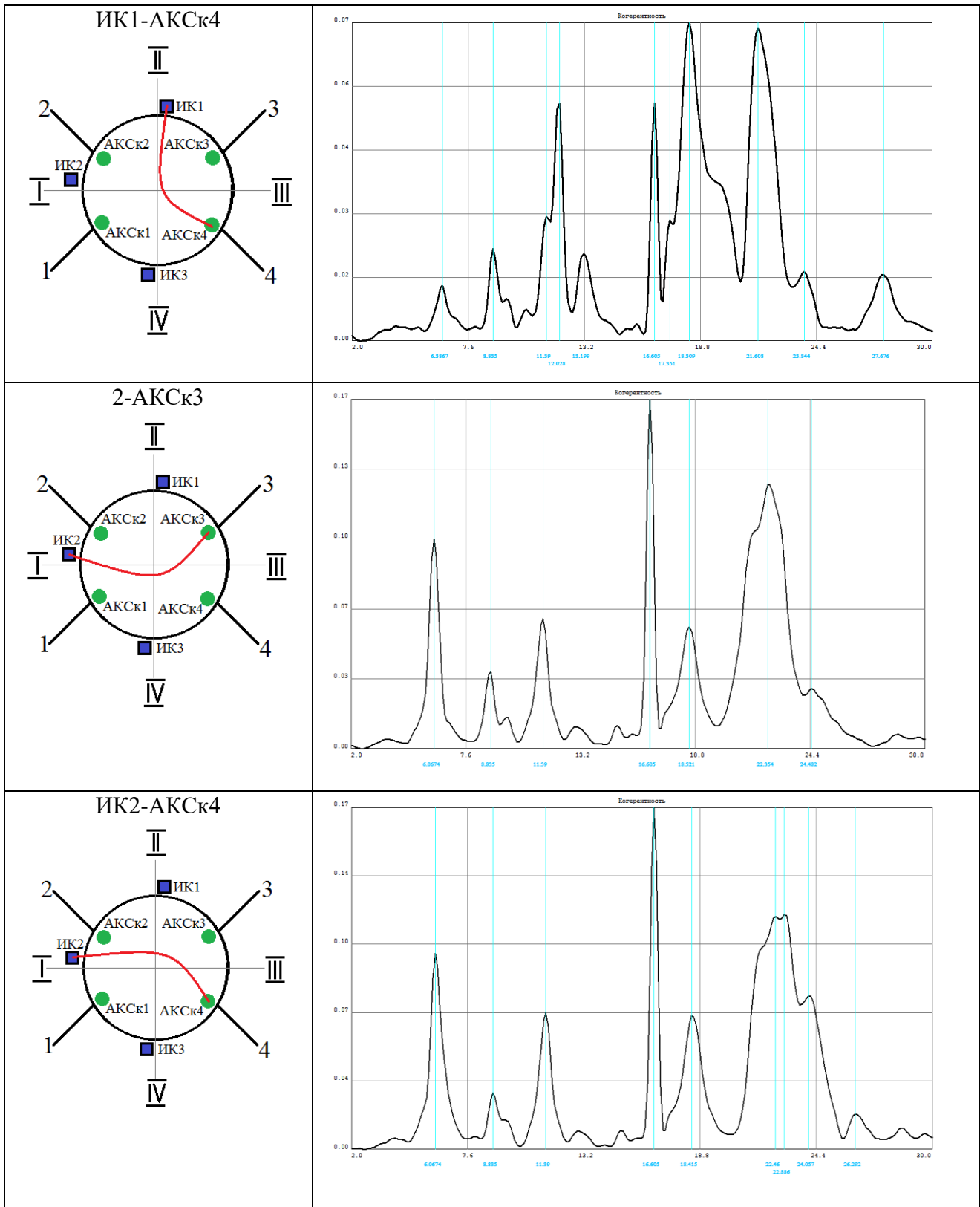


**Рис. 8. Семейство функций когерентности сигнала противоположных ИК (ИК1-ИК3) при многократных измерениях на 100% уровне мощности РУ и их средняя когерентность (нижний график)**

**Fig. 8. Family of signal coherence functions of opposite IC (IC1-IC3) with multiple measurements at 100% power level of RS and their average coherence (lower graph)**

**Таблица 1**  
**Функции когерентности сигналов «ИК-Акс»**

**Table 1**  
**Coherence functions of «IC-Acc» signals**



## Заключение

Обобщены некоторые экспериментальные данные полученные в ходе эксплуатации различных систем технического диагностирования на первом и втором энергоблоках НВОАЭС-2. Экспериментально подтверждено снижение вибрационной нагрузки на корпус РУ ВВЭР1200 благодаря новым конструкторским решения по закреплению корпуса РУ ВВЭР-1200, а также новым узлам крепления ВКУ ВВЭР-1200.

## Библиографический список

1. Государственный Стандарт Союза ССР. Техническая диагностика. Термины и определения. ГОСТ 20911-89. М.: Издательство стандартов, 1989. 13 с.
2. Государственный Стандарт Союза ССР. Приборы виброизмерительные. Термины и определения. ГОСТ 16819-71. М.: Стандартиформ, 2010. 8 с.
3. Государственный Стандарт Союза ССР. Акселерометры низкочастотные линейные. ГОСТ 18955-73. М.: Издательство стандартов, 1973. 14 с.
4. Государственный Стандарт Союза ССР. Вибрация. Термины и определения. ГОСТ 24346-80. М.: Стандартиформ, 2010. 26 с.
5. Государственный Стандарт Союза ССР. Вибрация. Обозначения и единицы величин. ГОСТ 24347-80. М.: Изд-во стандартов, 1986. 6 с.
6. Государственный Стандарт Союза ССР. Система стандартов по вибрации. Приборы для измерения вибрации вращающихся машин. Общие технические условия. ГОСТ 25275-82 М.: Издательство стандартов, 1993. 11 с.
7. Государственный Стандарт Союза ССР. Вибрация. Динамические характеристики стационарных машин. Основные положения. ГОСТ 26043-83. М.: Издательство стандартов, 1984. 16с.
8. **Аркадов, Г.В.** Виброшумовая диагностика ВВЭР / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, А.И. Усанов. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 344 с.
9. **Аркадов, Г.В.** Системы диагностирования ВВЭР / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, Б.М. Финкель. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 391 с.
10. **Аникин, Г.Г.** Опыт внедрения систем виброконтроля на АЭС с реакторными установками типа ВВЭР-440 / Г.Г. Аникин, В.И. Павелко // Теплотехника. 1999. № 6. С.12-17.
11. **Федоров, А.И.** Комплексные измерения диагностических параметров оборудования на блоке 1 НВАЭС-2 в процессе опытно-промышленной эксплуатации / А.И. Федоров, М.Т. Слепов // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2017-№ 3. – с. 77-87.
12. **Аркадов, Г.В.** Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200 / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов. – М.: Наука, 2018. – 469 с.
13. **Аркадов, Г.В.** Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200 / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов. – М.: Наука, 2021. – 221 с.
14. **Павелко, В.И.** Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200 / В.И. Павелко, М.Т. Слепов, В.У. Хайретдинов // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. 2016. №4. С.44-54.
15. **Аркадов, Г.В.** Виброакустика ВВЭР-1200 / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сборник трудов 11 международной научно-технической конференция 21-24 мая 2019 года ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия.
16. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. «Основные требования к обоснованию прочности внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР» (НП-102-17). Введены приказом №409 от 05.10.2017.
17. **Митенков, Ф.М.** Главные циркуляционные насосы АЭС / Ф.М. Митенков, Э.Г. Новинский, В.М. Будов – М., Энергоатомиздат, 1990. – 376 с.
18. **Arkadov, G.V.** Vibration Acoustics Applied to VVER-1200 Reactor Plant / G.V. Arkadov, V.I. Pavelko, M.T. Slepov // Singapore: World Scientific, 2021. – 586 p.

*Дата поступления*

*в редакцию: 29.10.2021*

УДК 621.039.513

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_68

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСЧЕТНОГО БЕНЧМАРКА ПО ОБЛУЧЕНИЮ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВТГР

**А.В. Салаяев**ORCID: 0000-0003-0511-0412 e-mail: [salyaev@okbm.nnov.ru](mailto:salyaev@okbm.nnov.ru)Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова  
*Нижний Новгород, Россия***С.Г. Усынина**ORCID: 0000-0002-0561-594X e-mail: [usynina@okbm.nnov.ru](mailto:usynina@okbm.nnov.ru)Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова  
*Нижний Новгород, Россия*

Проведено моделирование выгорания топливных элементов высокотемпературных газовых реакторов (ВТГР) на основе данных расчетного бенчмарка, выполненного под эгидой рабочей группы Агентства по ядерной энергии по научным проблемам реакторных систем (WPRS). При расчете выгорания использовался программный комплекс SCALE 6.2.4 с многогрупповой библиотекой сечений на базе файлов оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.1, входящей в состав данного комплекса. Сравнение результатов расчета исследуемых характеристик – коэффициента размножения, концентрации нуклидов и спектральных индексов – показало хорошее согласие с данными участников бенчмарка, а также позволило выполнить верификацию комплекса SCALE 6.2.4 совместно с библиотеками нейтронных микросечений.

**Ключевые слова:** высокотемпературный газовый реактор, выгорание, бенчмарк, Монте-Карло, микротвэл, SCALE 6.2.4.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Салаяев, А.В. Моделирование расчетного бенчмарка по облучению топливных элементов ВТГР / А.В. Салаяев, С.Г. Усынина // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 1. С. 68-76.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_68

## SIMULATION OF CALCULATED BENCHMARK FOR RADIATION EXPOSURE OF HTGR FUEL CELLS

**A.V. Salyaev**ORCID: 0000-0003-0511-0412 e-mail: [salyaev@okbm.nnov.ru](mailto:salyaev@okbm.nnov.ru)Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering  
*Nizhny Novgorod, Russia***S.G. Usynina**ORCID: 0000-0002-0561-594X e-mail: [usynina@okbm.nnov.ru](mailto:usynina@okbm.nnov.ru)Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Simulation of high-temperature gas reactors (HTGR) fuel cells burnout has been simulated based on calculated benchmark data carried out under the auspices of the Nuclear Energy Agency's working group on scientific problems of reactor systems (WPRS). When calculating the burnout, the SCALE 6.2.4 software package was used with a multigroup cross-section library based on ENDF/B-VII.1 estimated nuclear data files, which is part of this complex. Comparison of results of the studied characteristics calculation – the multiplication coefficient, concentration of nuclides and spectral indices – showed good agreement with the data of benchmark participants, and also allowed the verification of SCALE 6.2.4 complex together with libraries of neutron microsections.

**Key words:** high temperature gas reactor, burnout, benchmark, Monte-Carlo, coated particle, SCALE 6.2.4.

**FOR CITATION:** A.V. Salyaev, S.G. Usynina. Simulation of calculated benchmark for radiation exposure of HTGR fuel cells. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 1. Pp. 68-76.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_68

## Введение

Неослабевающий мировой интерес к высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам обусловлен уникальными особенностями данных установок как в плане безопасности, так и в плане практического применения для выработки высокопотенциальной теплоты и/или производства электроэнергии с высоким КПД. Основные особенности и преимущества ВТГР определяются применением в них топливных элементов на основе микротвэлов – топливных частиц (кernels) с многослойным защитным керамическим покрытием TRISO. Микротвэлы размещаются в шаровых твэлах или в цилиндрических топливных компактах и графитовых блоках. Таким образом, возникает необходимость учета двойной гетерогенности, т.е. эффектов в области резонансных энергий (резонансной экранировки) как на микротвэлах, так и на шаровых твэлах или топливных компактах. Для учета данной особенности топлива ВТГР разрабатываются специальные расчетные методики и программы, учитывающие сложную структуру топливных сборок. В связи с трудностью получения экспериментальных данных такие программы требуют, в том числе, проведение кросс-верификации, свидетельствующей о правильности заложенных в программу методов и алгоритмов, а также адекватности используемых библиотек констант. Таким образом, проведение независимых расчетных бенчмарков является актуальной задачей.

Наиболее точными программами для моделирования и расчета сложных систем являются программы, реализующие метод Монте-Карло. Точность расчета по таким программам обусловлена, в основном, имеющимися неопределенностями в микросечениях ядерных реакций взаимодействия излучений с веществом. Программы, входящие в комплекс SCALE 6.2.4, в том числе, модуль KENO-VI, реализующий метод Монте-Карло, а также модуль расчета выгорания ORIGEN, позволяют практически точно моделировать выгорание топливных сборок ВТГР, предоставляя при этом пользователю достаточно простые и удобные средства для описания моделей.

Первоочередная задача заключалась в моделировании геометрии топливных элементов и выборе необходимых управляющих последовательностей и модулей для расчета. Далее проведено сравнение полученных результатов с данными участников бенчмарка и выполнен краткий анализ расчетных данных.

## Описание бенчмарка

Бенчмарк состоял из расчета выгорания трех различных конфигураций среды: микротвэлов (топливных частиц с покрытием TRISO), шарового топливного элемента (топливные частицы, распределенные в графитовой матрице) и призматического топливного блока (графитовый блок, содержащий топливные компакты и цилиндрические каналы для прохода гелиевого теплоносителя). Во всех случаях рассматривалась бесконечная решетка из соответствующих элементов. В табл. 1 приведены характеристики топлива и топливных сборок, в табл. 2 – исходные составы материалов. Доля примесей в графите топливных элементов (борный эквивалент) принималась равной 0,5 ppm.

Рассчитывались следующие характеристики:

- коэффициент размножения в бесконечной среде  $K_{inf}$ ,
- спектральные индексы:
  - 1)  $\rho^{238} = {}^{238}\text{U}_c(\text{быстр}) / {}^{238}\text{U}_c(\text{тепл})$ ;
  - 2)  $\delta^{235} = {}^{235}\text{U}_f(\text{быстр}) / {}^{235}\text{U}_f(\text{тепл})$ ;



$$3) \delta^{238} = {}^{238}\text{U}_f / {}^{235}\text{U}_f;$$

$$4) c/f^{235} = {}^{238}\text{U}_c / {}^{235}\text{U}_f;$$

где  ${}^{238}\text{U}_c$  – скорость реакции радиационного захвата на  ${}^{238}\text{U}$ ;

${}^{235}\text{U}_c$  – скорость реакции радиационного захвата на  ${}^{235}\text{U}$ ;

${}^{235}\text{U}_f$  – скорость реакции деления на  ${}^{235}\text{U}$ .

Таблица 1

## Характеристики топлива и топливных сборок

Table 1

## Characteristics of fuel and fuel assemblies

Характеристика	Значение
Параметры топлива: – материал топливной композиции – плотность, г/см <sup>3</sup> – обогащение по ${}^{235}\text{U}$ , % вес – доля примесей в керне (борный эквивалент), ppm	UO <sub>2</sub> 10,4 8,2 1
Параметры топливных частиц: – радиус керна, мм – толщина/плотность буферного слоя PuC, мкм / г/см <sup>3</sup> – толщина/плотность внутреннего слоя PuC, мкм / г/см <sup>3</sup> – толщина/плотность слоя SiC, мкм / г/см <sup>3</sup> – толщина/плотность наружного слоя PuC, мкм / г/см <sup>3</sup>	0,25 0,09/1,05 0,04/1,9 0,035/3,18 0,04/1,9
Параметры ячейки микротвэла: – радиус ячейки, см	0,10137
Параметры шарового топливного элемента: – наружный радиус, см – радиус зоны с микротвэлами, см – число топливных частиц – загрузка UO <sub>2</sub> , г – объемная доля топливных частиц, %	3 2,5 15000 10,21 9,043
Параметры топливных компактов: – диаметр, см – высота, см – загрузка UO <sub>2</sub> , г – число топливных частиц на компакт – объемная доля топливных частиц в компакте, %	1,245 4,93 2,042 3000 19,723
Параметры топливного блока: – шаг треугольной решетки расположения каналов, см – диаметр отверстий под топливные компакты, см – диаметр отверстий под теплоноситель, см	1,88 1,27 1,588

Граница между тепловой (тепл) и быстрой (быстр) областями энергий условно принималась равной 0,625 эВ.

Масса нуклидов (г/т U):

1) актиниды:  ${}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{239}\text{Pu}$ ,  ${}^{240}\text{Pu}$ ,  ${}^{241}\text{Pu}$ ,  ${}^{242}\text{Pu}$ ,  ${}^{241}\text{Am}$ ,  ${}^{244}\text{Cm}$ ,  ${}^{245}\text{Cm}$ ;

2) продукты деления:  ${}^{85}\text{Kr}$ ,  ${}^{90}\text{Sr}$ ,  ${}^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  ${}^{137}\text{Cs}$ ,  ${}^{135}\text{Xe}$ ,  ${}^{149}\text{Sm}$ ,  ${}^{151}\text{Sm}$ .

Результаты, предоставленные участниками бенчмарка, включают 21 набор данных, предоставленных 12 участниками десяти организаций из шести стран. В расчетах использовались 11 разных расчетных программ. Участниками проводились полностью независимые расчеты по предоставленным исходным данным с использованием как детерминистских методов, так и метода Монте-Карло соответственно в многогрупповом приближении или в SE с поточечным представлением микросечений.

Таблица 2

## Составы материалов

Table 2

## Compositions of materials

Элемент	Нуклид или элемент	Атомная концентрация, $10^{24} \text{ см}^{-3}$
Керн	$^{235}\text{U}$	$2,12877 \cdot 10^{-2}$
	$^{238}\text{U}$	$1,92585 \cdot 10^{-3}$
	O	$4,64272 \cdot 10^{-2}$
	$^{10}\text{B}$	$1,14694 \cdot 10^{-7}$
	$^{11}\text{B}$	$4,64570 \cdot 10^{-7}$
Буферный слой PuC	C	$5,26449 \cdot 10^{-2}$
Внутренний и наружный слой PuC	C	$9,52621 \cdot 10^{-2}$
Слой SiC	C	$4,77240 \cdot 10^{-2}$
	Si	$4,77240 \cdot 10^{-2}$
Матричный графит	C	$8,77414 \cdot 10^{-2}$
	$^{10}\text{B}$	$9,64977 \cdot 10^{-9}$
	$^{11}\text{B}$	$3,90864 \cdot 10^{-8}$
Графит топливного блока	C	$8,77414 \cdot 10^{-2}$
	$^{10}\text{B}$	$9,64977 \cdot 10^{-9}$
	$^{11}\text{B}$	$3,90864 \cdot 10^{-8}$
Гелиевый теплоноситель	$^3\text{He}$	$3,71220 \cdot 10^{-11}$
	$^4\text{He}$	$2,65156 \cdot 10^{-5}$

Таблица 3

## Составы материалов

Table 3

## Compositions of materials

Конфигурация	Управляющий модуль / последовательность	Библиотека констант/ источник данных	Количество групп
Топливная ячейка	TRITON/T-DEPL-1D (XSDRN)	scale.rev04.xn252 v7.1/ ENDF/B-VII.1	252
Шаровой топливный элемент	TRITON/T6-DEPL (KENO-VI)	scale.rev04.xn252 v7.1/ ENDF/B-VII.1	252
Призматический топливный блок	TRITON/ T6-DEPL (KENO VI), CSAS6 (KENO-VI)	scale.rev04.xn252 v7.1/ ENDF/B-VII.1	252

## Моделирование бенчмарка

Расчет выгорания всех трех конфигураций среды выполнен с использованием программного комплекса SCALE 6.2.4, разрабатываемого и поддерживаемого отделом RNSD (Reactor and Nuclear Systems Division) ORNL, Oak Ridge, Tennessee, США. Сводная информация о методах и данных, используемых в расчетах, приведена в табл. 3. Методология расчета в общем виде заключалась в следующем.

1. Подготовка библиотеки констант, в том числе, одnogрупповых микросечений для расчета выгорания, проводилась с использованием управляющего модуля TRITON [4] в последовательностях T-DEPL-1D (простая многозонная ячейка – микротвэл) и T6-DEPL (шаровой топливный элемент или призматический топливный блок). Последовательности позволяют получить библиотеку констант для каждого материала на каждом шаге выгорания.

2. Спектр нейтронов в процессе выгорания рассчитывался с использованием 252-групповой библиотеки, включающей нейтронные данные, основанные на файлах оцененных ядерных данных ENDF/B-VII.1. Отметим, что для ячеек с двойной гетерогенностью не может быть задана библиотека с поточечным (CE) представлением сечений.

3. Расчет блокировки микросечений проводился с использованием транспортного модуля CENTRM, рассчитывающего непрерывный по энергии (CE) спектр нейтронов, использующийся в качестве весовой функции. При этом на правой границе ячейки микротвэла и ячейки твэл использовалось белое граничное условие.

4. Транспортная задача на каждом шаге выгорания решалась с помощью детерминистского модуля XSDRN или KENO-VI, реализующего метод Монте-Карло. Последовательность CSAS6, решающая задачу расчета на критичность, использовалась для получения спектральных индексов. При этом задавались составы материалов, полученные в процессе выгорания в последовательности T6-DEPL.

5. Расчет выгорания проводился по модулю ORIGEN [5], предназначенному для расчета изменения во времени концентраций, активности, мощности источников и спектров излучений смеси изотопов, находящейся под воздействием нейтронного облучения и (или) вследствие радиоактивного распада. Модуль использует одnogрупповые микросечения, полученные на основе решения транспортной задачи с материалами, полученными на предыдущем шаге выгорания.

Расчет шарового топливного элемента и призматического топливного блока проводился с учетом двойной блокировки микросечений в топливных компактах. Геометрия задавалась в явном виде с описанием микротвэл с покрытиями. Предполагается, что распределение микротвэл в топливной зоне шарового твэл или в топливном компакте равномерное.

## Результаты расчетов

Сравнительные результаты расчетов представлены в табл. 4-6. В них приведено относительное отклонение результатов расчетов от средних значений характеристик по данным различных участников. Из представленной информации можно отметить следующее.

1. Результаты расчетов  $K_{inf}$  достаточно хорошо согласуются между собой, учитывая разнообразие используемых расчетных методов и данных. Стандартное отклонение составляет менее 1 % для всех конфигураций и в целом возрастает с увеличением выгорания. Относительное отклонение находится в пределах 1 % за исключением глубины выгорания 120 ГВт·сут/т для шарового топливного элемента.

2. Максимальное относительное отклонение от среднего значения спектральных индексов для всех трех конфигураций находится в диапазоне  $\pm 5\%$  (за исключением значений индекса  $\delta^{238}$  для шарового топливного элемента для глубин выгорания 80 и 120 ГВт·сут/т). При этом выраженного тренда в относительном отклонении в зависимости от выгорания не наблюдается.

3. Результаты расчета выгорания основных топливных изотопов находятся в удовлетворительном согласии с остальными результатами: относительное отклонение находится в основном в пределах  $\pm 6\%$ . Характерно уменьшение относительного отклонения результатов для изотопов с их накоплением. Как и следовало ожидать, разброс данных с увеличением выгорания более выражен для минорных актинидов Am и Cm, содержание которых в топливе невелико. Для Cm отличия достигают 30 % (при его содержании в облученной композиции на уровне микрограмм).

4. Результаты расчета накопления ключевых изотопов продуктов деления хорошо согласуются между собой: относительное отклонение находится в основном в пределах от -2 до 7 %. Наибольшие отличия наблюдаются для  $^{110m}\text{Ag}$ : от -22 до 32 %, что может быть следствием как очень малого его накопления в топливе, так и неопределенности в коэффициентах ветвления библиотек распадов.

Таблица 4

Относительное отклонение результатов расчета для выгорания ячейки микровэла, %

Table 4

Relative deviation of calculation results for coated particle cell burnout, %

Характеристика	Глубина выгорания, ГВт·сут/т							
	0	0,5	5	10	20	40	80	120
$K_{inf}$	-0,40	-0,44	-0,45	-0,45	-0,50	-0,35	-0,45	-0,57
Масса актинидов, г/т U								
$^{235}\text{U}$	—	0,08	-0,02	-0,04	-0,15	-0,19	0,29	1,47
$^{238}\text{U}$	—	-0,03	-0,02	-0,03	-0,02	-0,05	-0,07	-0,04
$^{239}\text{Pu}$	—	3,00	3,06	2,69	2,29	1,47	1,69	1,52
$^{240}\text{Pu}$	—	7,91	4,68	3,30	2,65	2,20	1,50	1,50
$^{241}\text{Pu}$	—	10,15	6,25	4,43	3,50	2,77	1,38	1,11
$^{242}\text{Pu}$	—	48,40	9,29	6,12	5,02	4,30	3,29	3,64
$^{241}\text{Am}$	—	35,24	8,14	4,34	2,83	2,50	0,84	0,78
$^{244}\text{Cm}$	—	55,06	24,23	4,39	0,61	-1,64	-1,82	-2,40
$^{245}\text{Cm}$	—	-96,64	33,02	28,29	3,53	0,54	0,56	1,25
Масса продуктов деления, г/т U								
$^{85}\text{Kr}$	—	6,32	6,51	6,50	6,27	6,00	5,89	5,84
$^{90}\text{Sr}$	—	0,94	0,86	0,79	0,62	0,35	0,79	0,05
$^{110m}\text{Ag}$	—	13,89	23,10	31,79	32,14	27,47	16,49	6,88
$^{137}\text{Cs}$	—	1,18	1,20	1,12	1,24	1,21	1,28	1,25
$^{135}\text{Xe}$	—	-0,14	0,38	0,63	1,02	1,07	3,08	4,50
$^{149}\text{Sm}$	—	2,06	4,39	4,05	7,03	3,96	7,48	11,04
$^{151}\text{Sm}$	—	-1,46	1,31	0,94	1,55	1,19	2,67	4,13
Спектральные индексы								
$\rho^{238}$	1,09	1,26	1,51	1,73	1,71	1,49	2,68	3,21
$\delta^{235}$	-0,86	-0,98	-0,54	-0,01	0,34	0,36	2,58	3,86
$\delta^{238}$	-0,65	-0,60	-0,38	0,01	-0,02	-0,26	0,30	-2,15
$c/f^{235}$	0,94	1,06	1,36	1,70	1,92	1,96	2,86	1,37

Таблица 5

Относительное отклонение результатов расчета для выгорания шарового топливного элемента, %

Table 5

Relative deviation of calculation results for ball fuel cell burnout, %

Характеристика	Глубина выгорания, ГВт·сут/т							
	0	0,5	5	10	20	40	80	120
$K_{inf}$	0,07	0,12	0,08	0,14	0,14	0,18	0,42	1,54
Масса актинидов, г/т U								
$^{235}\text{U}$	–	-0,03	-0,12	-0,22	-0,53	-1,43	-4,65	-8,32
$^{238}\text{U}$	–	0,05	0,06	0,05	0,07	0,04	0,01	0,00
$^{239}\text{Pu}$	–	1,22	0,78	0,37	0,06	-0,04	0,44	1,72
$^{240}\text{Pu}$	–	5,32	2,78	1,89	1,31	0,39	-0,96	-0,90
$^{241}\text{Pu}$	–	12,02	4,97	3,64	3,07	3,37	2,03	1,82
$^{242}\text{Pu}$	–	39,56	7,41	5,67	4,91	4,49	3,99	2,71
$^{241}\text{Am}$	–	40,66	6,70	4,00	1,86	-0,60	-5,74	-8,37
$^{244}\text{Cm}$	–	77,88	33,56	10,41	1,67	1,62	2,39	0,50
$^{245}\text{Cm}$	–	136,62	30,06	28,23	28,54	2,30	4,68	5,01
Масса продуктов деления, г/т U								
$^{85}\text{Kr}$	–	2,19	4,72	4,88	4,80	4,77	4,65	4,64
$^{90}\text{Sr}$	–	1,59	1,57	1,42	1,31	1,14	0,63	0,35
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	–	28,07	-1,76	-0,83	0,69	-0,63	-5,99	-15,57
$^{137}\text{Cs}$	–	1,42	1,22	1,23	1,15	0,94	0,80	0,51
$^{135}\text{Xe}$	–	0,06	0,06	-0,07	-0,08	-0,22	0,51	2,74
$^{149}\text{Sm}$	–	0,90	0,78	0,94	2,37	1,84	2,84	4,81
$^{151}\text{Sm}$	–	-0,20	1,03	0,59	0,42	1,28	2,03	2,14
Спектральные индексы								
$\rho^{238}$	-1,96	-1,47	-1,92	-2,06	-2,41	-2,52	-2,09	-0,94
$\delta^{235}$	-0,22	-0,03	-0,42	-0,69	-1,00	-1,26	-0,63	0,79
$\delta^{238}$	4,55	4,80	4,64	4,98	4,56	4,97	7,49	11,41
$c/f^{235}$	-1,81	-1,62	-1,69	-1,66	-1,70	-1,22	1,17	4,56

Таблица 6

Относительное отклонение результатов расчета для выгорания  
призматического топливного блока, %

Table 6

Relative deviation of calculation results for of prismatic fuel block, %

Характеристика	Глубина выгорания, ГВт·сут/т							
	0	0,5	5	10	20	40	80	120
$K_{inf}$	-0,08	-0,07	-0,05	-0,04	0,03	0,18	0,52	0,89
Масса актинидов, г/т U								
$^{235}\text{U}$	–	0,02	-0,12	-0,25	-0,51	-1,20	-3,10	-5,21
$^{238}\text{U}$	–	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	-0,03	-0,03
$^{239}\text{Pu}$	–	-1,50	0,75	0,91	0,42	-0,07	-0,26	0,07
$^{240}\text{Pu}$	–	-0,81	1,84	1,72	1,13	0,31	-1,03	-1,50
$^{241}\text{Pu}$	–	12,45	2,37	2,34	1,76	1,86	0,48	-0,22
$^{242}\text{Pu}$	–	18,25	8,67	4,60	3,49	3,22	3,43	3,18
$^{241}\text{Am}$	–	17,37	14,04	1,61	0,01	-1,96	-6,11	-9,94
$^{244}\text{Cm}$	–	-19,78	3,77	7,18	-1,79	-1,21	-0,88	-1,21
$^{245}\text{Cm}$	–	-99,45	25,34	29,70	11,55	4,99	0,11	1,70
Масса продуктов деления, г/т U								
$^{85}\text{Kr}$	–	1,91	4,58	4,61	4,65	4,55	4,36	4,22
$^{90}\text{Sr}$	–	1,58	1,52	1,44	1,31	1,14	0,69	0,33
$^{110m}\text{Ag}$	–	-11,55	-4,97	-2,03	-2,54	-5,89	-13,99	-22,51
$^{137}\text{Cs}$	–	1,52	1,59	1,46	1,43	1,25	1,12	0,87
$^{135}\text{Xe}$	–	0,10	0,21	0,27	0,40	0,70	2,00	3,43
$^{149}\text{Sm}$	–	–	3,29	3,30	3,88	3,29	4,40	4,40
$^{151}\text{Sm}$	–	-2,08	0,60	0,08	-0,31	-0,05	0,71	0,76
Спектральные индексы								
$\rho^{238}$	0,32	-1,63	-1,57	-1,45	-1,93	-2,69	-2,73	-2,61
$\delta^{235}$	-3,30	-1,80	-2,01	-2,08	-2,44	-3,13	-3,23	-3,22
$\delta^{238}$	-3,39	-3,39	-3,14	-3,36	-3,27	-3,33	-2,06	-0,78
$c/f^{235}$	-2,18	-1,90	-1,69	-1,45	-1,57	-1,59	0,03	1,36

### Заключение

Выполнено моделирование расчетного бенчмарка по выгоранию топливных элементов ВТГР. Расчеты проведены для трех конфигураций: элементарной ячейки микротвэла, шарового топливного элемента и призматического топливного блока. Сравнение полученных данных с результатами участников бенчмарка показало хорошую согласованность основных исследуемых характеристик.

Полученные данные могут быть полезны как кросс-верификация расчетных модулей и библиотек нейтронных микросечений программного комплекса SCALE 6.2.4.

**Библиографический список**

1. A Code-to-Code Benchmark for High-Temperature Gas-Cooled Reactor Fuel Element Depletion, NEA/NSC/R (2019)1, February 2019.
2. **Wieselquist, W.A.** Editors, SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39 / W.A. Wieselquist, R.A. Lefebvre, M.A. Jessee, Version 6.2.4, April 2020.
3. **Chadwick, M.B.** ENDF/B-VII.1: Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data / M.B. Chadwick et al., Nucl. Data Sheets 112(2011)2887.
4. **Jessee, M.A.** TRITON, A Multipurpose Transport, Depletion, and Sensitivity and Uncertainty Analysis Module / M.A. Jessee, D. Wiarda, K. T. Clarno et al, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, April 2020.
5. **Wieselquist, W.** ORIGEN: Neutron Activation, Actinide Transmutation, Fission Product Generation, and Radiation Source Term Calculation / W. Wieselquist, S. Hart, A. Isotalo et al, SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, April 2020.

*Дата поступления  
в редакцию: 29.11.2021*

УДК 681.84/.85

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_77

## РАЗРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ ДЛЯ ПЕРЕХОДА ОТ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ К АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ «ВИРТУАЛЬНЫЙ ОПЕРАТОР»

**А.И. Тихонов**ORCID: 0000-0002-6402-2036 e-mail: [TihonovAI@nvnp1.rosenergoatom.ru](mailto:TihonovAI@nvnp1.rosenergoatom.ru)

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС

*Нововоронеж, Россия***М.Ю. Тучков**ORCID: 0000-0002-5752-7757 e-mail: [TuchkovMU@nvnp1.rosenergoatom.ru](mailto:TuchkovMU@nvnp1.rosenergoatom.ru)

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС

*Нововоронеж, Россия***П.В. Поваров**ORCID: 0000-0002-6370-545X e-mail: [povarovvp@nvnp1.rosenergoatom.ru](mailto:povarovvp@nvnp1.rosenergoatom.ru)

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС

*Нововоронеж, Россия***М.М. Литвак**ORCID: 0000-0002-2293-5734 e-mail: [litvak\\_mm@sniip-atom.ru](mailto:litvak_mm@sniip-atom.ru)

ООО «Инновационная фирма СНИИП АТОМ»

*Москва, Россия*

Рассматриваются требования к разработке цифровой системы «Виртуальный оператор» как следующего этапа развития информационных систем поддержки оператора. Обоснованы выводы о необходимости создания условий для поэтапного повышения уровня автоматизации управления энергоблоком, а также ускорения сложных технологических процессов путем внедрения системы «Виртуальный оператор», позволяющей снизить вероятность ошибочного решения оператора блочного пульта управления (БПУ) при выборе альтернативных вариантов для несогласованностей при проведении параллельных процессов.

**Ключевые слова:** система информационной поддержки оператора, функционально-групповое управление, информация, параллельное исполнение операций, виртуальный оператор, автоматизированное устранение несогласованностей, автоматический анализ).

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Тихонов, А.И. Разработка требований для перехода от автоматизированного функционально-группового управления к автоматической цифровой системе «Виртуальный оператор» / А.И. Тихонов, М.Ю. Тучков, В.П. Поваров, М.М. Литвак // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 1. С. 77-85.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_77

## DEVELOPMENT OF REQUIREMENTS FOR TRANSITION FROM AUTOMATED FUNCTIONAL GROUP MANAGEMENT TO «VIRTUAL OPERATOR» AUTOMATIC DIGITAL SYSTEM

**A.I. Tikhonov**ORCID: 0000-0002-6402-2036 e-mail: [TihonovAI@nvnp1.rosenergoatom.ru](mailto:TihonovAI@nvnp1.rosenergoatom.ru)

Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» Novovoronezh NPP

*Novovoronezh, Russia*



**M.Yu. Tuchkov**

ORCID: **0000-0002-5752-7757** e-mail: **TuchkovMU@nvnpp1.rosenergoatom.ru**  
Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» Novovoronezh NPP  
*Novovoronezh, Russia*

**P.V. Povarov**

ORCID: **0000-0002-6370-545X** e-mail: **povarovvp@nvnpp1.rosenergoatom.ru**  
Branch of JSC «Concern Rosenergoatom» Novovoronezh NPP  
*Novovoronezh, Russia*

**M.M. Litvak**

ORCID: **0000-0002-2293-5734** e-mail: **litvak\_mm@sniip-atom.ru**  
JSC «SNIIP»  
*Moscow, Russia*

**Abstract.** Requirements for development of a «Virtual operator» digital system as the next stage in operator support information systems development, are considered. Conclusions are substantiated about the need to create conditions for a step-by-step increase in power unit control automation level, as well as speedup of complex technological processes by way of implementation of «Virtual Operator» system, which reduces the likelihood of an erroneous decision by the control panel module (CPM) operator when choosing alternative options for inconsistencies during parallel processes.

**Key words:** operator information support system, functional group management, information, parallel execution of operations, virtual operator, automated elimination of inconsistencies, automatic analysis).

**FOR CITATION:** A.I. Tikhonov, M.Yu. Tuchkov, V.P. Povarov, M.M. Litvak. Development of requirements for transition from automated functional group management to «virtual operator» automatic digital system. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 1. Pp. 77-85. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_77

**Введение**

В настоящей статье рассматриваются подходы дальнейшего развития функционально-группового управления (ФГУ) в сторону интеллектуального параллельного исполнения операций и вводится термин «Виртуальный оператор» (ВО). В соответствии с требованиями ПБЯ РУ АС (НП-082-07) [1], в составе управляющих систем нормальной эксплуатации и управляющих систем безопасности должна быть реализована системы информационной поддержки оператора. Аналогичное требование приведено в п. 3.4.1.1. НП-001-15 [2]. Согласно п. 3.4.5.1. НП-001-15, система информационной поддержки оператора должна представлять персоналу БПУ обобщенную информацию о параметрах АЭС, характеризующих состояние функций безопасности. В рамках плана реализации НИОКР АО «Концерн Росэнергоатом» ведется формирование требований и основных решений по созданию системы информационной поддержки оператора (СИПО). Определение системы поддержки оператора, приведенное в ГОСТ Р МЭК 60964-2012 [3] представляет явную отсылку работы данной системы с получаемой информацией и интерпретаций ее персоналу БПУ в наиболее удобном, для оператора, виде.

Принятая в настоящий момент концепция предусматривает управление с автоматических рабочих мест (далее – АРМ). Как правило, она представляет собой два дисплея и манипулятор-мышь, которым и производятся управляющие воздействия на арматуру и агрегаты. Опыт эксплуатации показал, что для качественного контроля технологического процесса и прогнозирования дальнейших действий оператору необходимо иметь перед глазами ряд графиков, трендов, гистограмм, объем которых нигде не регламентирован и определяется лишь текущей необходимостью. Отслеживание проходящей сигнализации также осуществляется в отдельном окне. Таким образом, один дисплей оператора занят графиками и сигнализацией. Кроме того, часть информации дублируется на панелях и пультах. При этом база данных си-

стемы верхнего блочного уровня (далее СВБУ) содержит порядка 170 000 сигналов, которые выводятся оператору на более чем 1 500 видеокадров, а количество сигнализаций на панелях БПУ более 700. Совокупность информационной и психологической перегрузки оператора может привести в конечном итоге к эмоциональному истощению и ошибке при выполнении работ [4]. Ниже представлена схема учета психофизических особенностей оператора (рис. 1) [5].

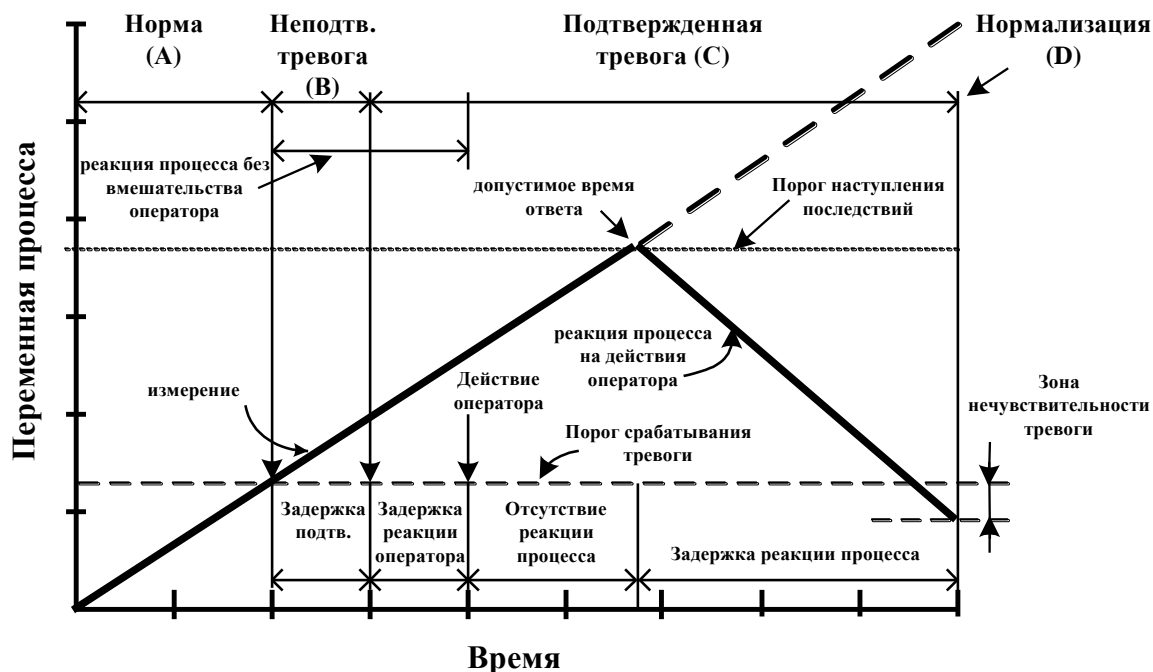


Рис. 1. Схема учета психофизических особенностей оператора

Fig. 1. Operator psychophysical characteristics accounting scheme

В ситуациях с дефицитом времени для принятия решения нужен один достоверный источник информации адаптированный для выполнения конкретной задачи, выдающий отфильтрованную, сжатую информацию в доступном и удобном виде [6]. Указанные проблемы наиболее актуальны для современных проектов АЭС, так как количество параметров, необходимых для анализа работы оборудования, кратно увеличилось с момента перехода от аналого-релейных преобразователей к цифровому формату (рис. 2).

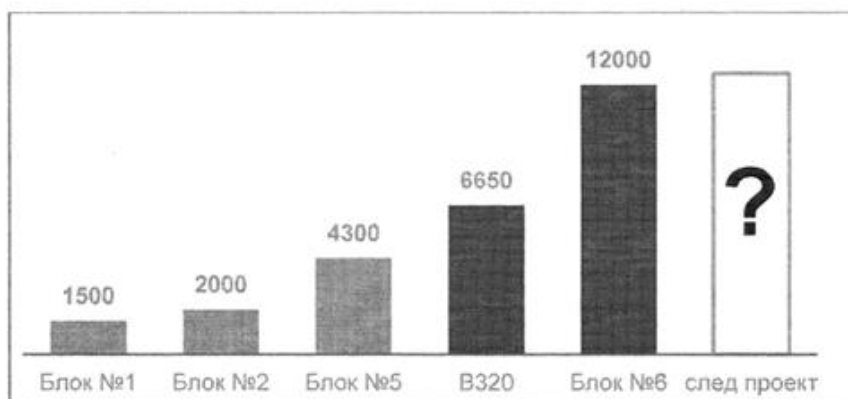


Рис.2 Рост числа измерительных каналов в зависимости от проекта.

Fig. 2. Increase in number of measuring channels depending on the project

ООО «ИФ СНИИП АТОМ» в инициативном порядке при активной поддержке Нововоронежской АЭС разработан макет СИПО (далее – МкСИПО); в составе программного обеспечения которого реализованы, в том числе, программная модель энергоблока и интерактивные процедуры. Первая версия макета с целью накопления архивов эксплуатационных данных для валидации функций СИПО функционирует на блоке № 1 НВАЭС-2 с момента пуска энергоблока. В МкСИПО можно выделить блок интерактивных приложений для контроля безопасного выполнения работ, помощи при принятии решений по управлению и устранению информационной перегрузки оператора. Интерактивные процедуры – приложения, предназначенные для поддержки оператора в пошаговом проведении программ пуска/останова блока и других многоэтапных мероприятий. Исходя из опыта эксплуатации, наибольшее количество переключений выполняется в период проведения операций по пуску/останову энергоблока.

В рамках работы над СИПО, выполнена разработка и валидация ряда интерактивных пошаговых процедур, в том числе, программ пуска/останова энергоблока. По результатам выполненной работы определилась возможность сокращения времени пуска/останова путем уменьшения количества ручных действий за счет дальнейшего развития ФГУ в сторону автоматического исполнения. Реализованные в рамках проекта АЭС-2006 модели ФГУ выполняют локальную автоматизацию, имеют недостаточную диагностику состояния автоматизируемых процессов и оборудования как перед их вводом в работу, так и в ходе их выполнения, не учитывают современный уровень развития технологических возможностей по автоматизации процессов, требуют актуализации для сокращения нагрузки на оперативный персонал БПУ. Согласованных концепции и алгоритмов, позволяющих объединить ФГУ в единую систему, обеспечивающую автоматическое управление энергоблоком в режимах нормальной эксплуатации в российских проектах на данный момент не представлено.

Для создания с учетом требований НП-082-07 (п.2.4.15), НП-001-15 (п.1.2.7, 1.2.21, 3.1.16) на основе прогнозной и аналитической функций СИПО поэтапно – автоматическую систему функционально-группового управления, были разработаны требования к макету цифровой системы «Виртуальный оператор». По мере возможности данная система должна быть интегрирована в общий проект БПУ.

### **Описание существующего состояния и преимуществ ВО**

В существующем проекте АЭС-2006 ФГУ энергоблока имеются существенные (с точки зрения операторов) недостатки:

- автоматизированным управлением охвачены не все технологические процессы, вследствие этого невозможно выполнить полностью автоматизированный пуск/останов энергоблока;
- недостаточный объем диагностирования автоматизируемого процесса, вследствие чего часть аналитической работы по оценке готовности оборудования и процессов к включению в работу функциональных групп (ФГ) и обеспечению (прогнозированию) готовности оборудования в процессе их работы выполняется оператором, что требует значительного времени и высокой квалификации, чем зачастую сводит на нет преимущества автоматического управления.

На рис. 3 схематично представлен текущий процесс действий оператора БПУ при определении оптимальной последовательности выполнения операций, а также поиске решения для несогласованности в технологическом процессе. Отдельно стоит отметить, что оператор может одновременно выполнять ограниченное количество действий по анализу текущих процессов с последовательной реализацией принятых решений.



Рис.3 Текущий процесс, выполняемый оператором БПУ

Fig. 3. Current process performed by CPM operator

При использовании системы ВО (рис. 4), основными преимуществами должна являться способность системы:

- автоматически анализировать и выполнять возможные параллельные технологические процессы, определять и представлять оператору их оптимальную последовательность, заранее выявлять возникновение несогласованностей при проведении параллельных процессов, если они являются взаимоисключающими;
- автоматически (в автоматизированном режиме) устранять несогласованности при ведении параллельных процессов самостоятельно, посредством выбора иного варианта выполнения или, в случае отсутствия таковых, предлагать оператору БПУ оптимальные варианты последовательности выполнения процессов, вызывающих затруднение.

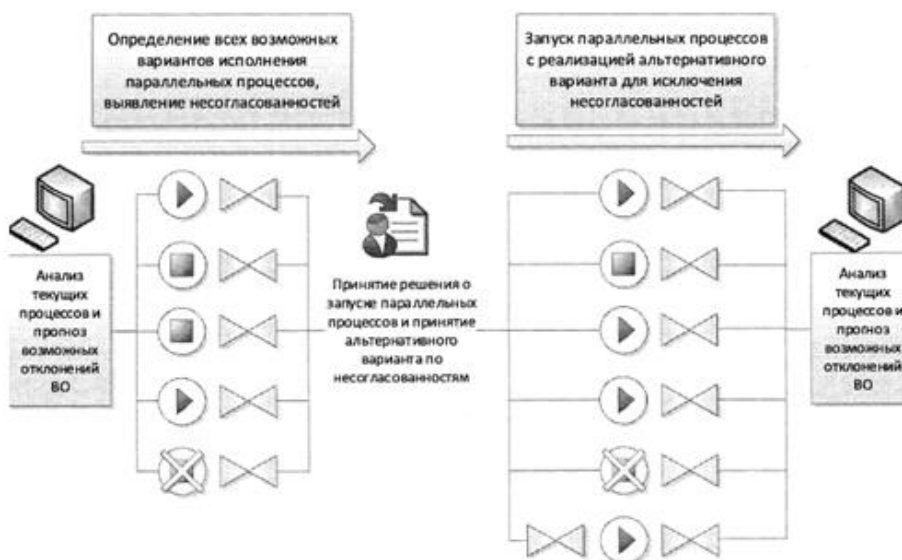


Рис. 4. Процесс, выполняемый с помощью ВО

Fig. 4. Process performed by use of VO

Очевидно, что «оптимальную последовательность» и «оптимальные варианты» будет определять основной критерий – безопасность выполнения совмещенных операций. Еще на стадии их формирования должен автоматически выполняться анализ возможности выполнения этих операций, исключающий нарушение технологических и регламентных ограничений. При выполнении спланированных операций, также должен выполняться непрерывный

автоматический контроль и прогноз состояния процессов, для исключения нарушений технологических и регламентных ограничений, и принятие автоматических действий, не допускающих этих нарушений.

Результаты анализа возможных вариантов исполнения параллельных процессов, а также альтернативные варианты решения выявленных несогласованностей, ВО предоставляет оператору БПУ для принятия решения о начале выполнения данных операций. В дальнейшем, ВО отслеживает выполнение согласованных операций и выполняет анализ с учетом уже изменившегося состояния технологического процесса.

### Взаимодействие СИПО и ВО

СИПО предназначена для предоставления оперативному персоналу информации, необходимой для принятия оптимального решения по управляющим действиям во всех режимах от нормальной эксплуатации до тяжелой аварии (рис. 5).

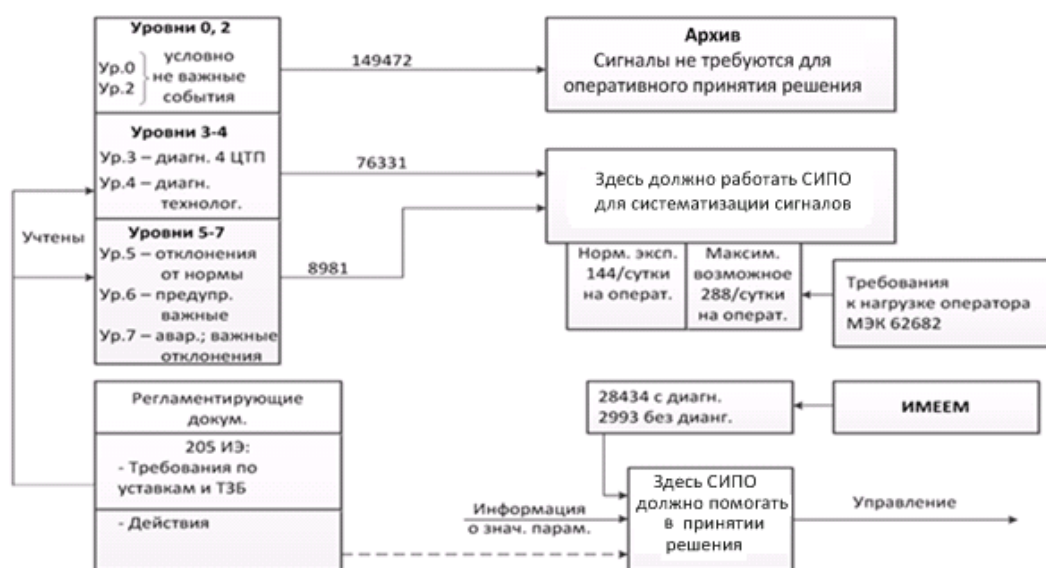


Рис. 5. Распределение потоков информации при участии СИПО

Fig. 5. Distribution of information flows with participation of OISS

Функции СИПО обеспечивают выполнение нереализованных в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУ ТП) энергоблока №1 НВАЭС-2 требований ГОСТ Р МЭК 60964- 2012 [3] к поддержке оператора, включая требование интеллектуальной обработки информации для разгрузки оперативного персонала БПУ во всех режимах работы энергоблока. Основой функционирования интеллектуальной части СИПО в задачах управления технологическим процессом является модель энергоблока, позволяющая проводить моделирование различных режимов эксплуатации.

Для проведения прогнозного расчета необходима инициализация начального состояния модели энергоблока. Для инициализации используются пакеты данных, формируемые системой верхнего блочного уровня (СВБУ). В качестве инициализирующего может использоваться как последний поступивший от СВБУ пакет данных, так и один из пакетов, записанных в архив. Пакеты данных формируются в СВБУ и поступают в МЭ с периодичностью 1 раз в секунду и записываются в архив, поэтому запуск расчета с помощью МЭ может быть произведен с состояния энергоблока на произвольную дату и время с точностью до секунды, на которую имеются архивы эксплуатационных данных.

Быстродействие математической модели зависит от производительности оборудования, на котором реализована модель энергоблока, однако, в любом случае обеспечивается быстродействие на порядок выше реального времени. В настоящее время на энергоблоке №1 НВАЭС-2 функционирует разработанный, в рамках научно-исследовательской работы, макет программно-технического комплекса моделирования энергоблока, в состав которого входит программная модель энергоблока, включающая нейтронно-физическую модель активной зоны, теплогидравлическую модель основного технологического процесса энергоблока, модель АСУ ТП энергоблока (рис. 6).

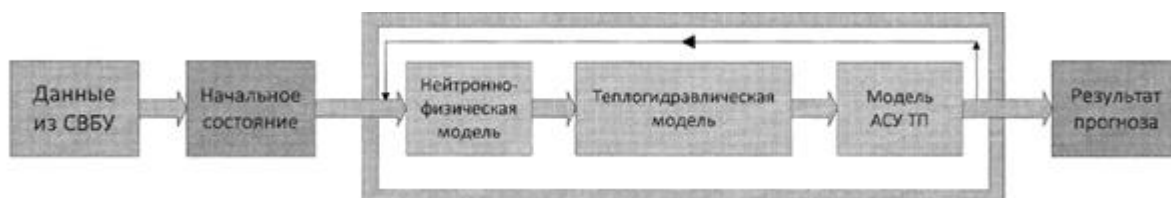


Рис. 6. Блок-схема основного расчетного цикла

Fig. 6. Block diagram of the main calculation cycle

ФГУ в макете программно-технического комплекса модели энергоблока (МкПТК МЭ) реализовано в объеме регулярно используемых в настоящее время при эксплуатации блока алгоритмов [7].

Основными функциями СИПО осуществляющими взаимодействие с ВО, являются:

- функция «Контроль автоматического управления оборудованием» предназначенная для выявления нарушений в работе систем автоматического управления оборудованием; в случае выявления различий между реальным и смоделированным срабатыванием указанных алгоритмов проводится дополнительный анализ на допустимость рассогласования с учетом погрешности изменений и рассинхронизации данных;
- функция «Прогнозирование состояния с помощью модели энергоблока», предназначенная для прогнозирования состояния энергоблока при отсутствии действий оператора и при планируемых оператором управляющих воздействиях на базе динамической модели энергоблока с предоставлением прогноза вперед на 15-30 мин и на порядок быстрее реального времени;
- функции «Мониторинг состояния основного оборудования энергоблока» и «Мониторинг систем безопасности», предназначенные для раннего выявления нарушений в работе основного оборудования энергоблока и систем контроля, которые, в отличие от задач прогнозирования состояния энергоблока, в процессе расчета получают информацию о текущем состоянии объекта контроля в виде пакетов данных от СВБУ;
- функции, осуществляющие контроль эксплуатационных пределов и условий, а также пределов и условий безопасной эксплуатации, осуществляющие непрерывный контроль и предупреждающие оператора о нарушении пределов и условий безопасной эксплуатации.

### Требования, предъявляемые к разрабатываемой цифровой системе ВО

Для достижения целей по автоматическому управлению технологическими процессами обеспечивающий последовательную (до полностью автоматического) автоматизацию пуска / останова и нормальной эксплуатации систем энергоблока цифровая система ВО должна решать следующие задачи:

1) контролировать соблюдение готовности к выполнению функций и определение приоритетов по вводу в работу оборудования к очередному состоянию энергоблока;

2) отслеживать требования, предъявляемые к любому допустимому состоянию энергоблока, из которого можно начинать выполнение операций по пуску / останову энергоблока, с учетом текущего состояния отключенного оборудования;

3) выполнять анализ существующего состояния энергоблока в сравнении с требуемыми условиями для последующего состояния и в автоматическом (автоматизированном) режиме приводить его в требуемое состояние (с выдачей вариантов выполнения оператору БПУ по вводу в работу оборудования в случае невозможности ввода в автоматическом режиме, с учетом общего количества выполняемых работ и способности персонала обрабатывать информацию при выполнении одномоментных действий);

4) автоматически анализировать и выполнять возможные параллельные технологические процессы, определять и представлять оператору их оптимальную последовательность (без учета отсутствующей в системе информации), заранее выявлять возникновение несогласованностей при проведении параллельных процессов, если они являются взаимоисключающими;

5) автоматически (в автоматизированном режиме) устранять несогласованности при ведении параллельных процессов: самостоятельно посредством выбора иного варианта выполнения или, в случае отсутствия таковых, предлагать оператору БПУ оптимальные варианты последовательности выполнения процессов вызывающих затруднение;

6) осуществлять проверку готовности оборудования перед началом выполнения и в процессе работы ФГУ:

7) внешнюю – готовность оборудования АСУ ТП (включая контроль линий связи и наличия имитаций), анализ протекающих технологических процессов и их готовность к выполнению ФГУ;

8) внутреннюю - параметры и состояние готовности технологического оборудования к вводу в работу, с учетом проводившихся ремонтных мероприятий.

9) определять, в случае выявления неготовности оборудования/процесса, к какому времени должно быть устранено замечание, чтобы исключить остановку промежуточного этапа ФГУ и/или процесса пуска / остановки блока, перевода в допустимое состояние, с учетом параллельности выполнения и взаимосвязанности процессов;

10) автоматически (в автоматизированном режиме) отслеживать и приводить в исходное состояние, оборудование/процессы на промежуточных этапах ФГУ, до начала их выполнения;

11) самостоятельно выполнять проверку готовности/неготовности оборудования с предоставлением полученной информации о выполненных действиях оператору БПУ - система должна представить расчет до начала промежуточного этапа, с учетом времени на устранение причины неготовности;

12) выполнять обмен информацией с СИПО в части контроля автоматического управления;

13) обеспечивать возможность управления энергоблоком с разной (по выбору оператора БПУ) степенью автоматизации процессов (от ручного управления с запуском отдельных алгоритмов ФГУ до автоматического выполнения сложных процессов).

### Заключение

Рассмотрены требования, необходимые для последовательного перехода от информационной поддержки к автоматическому управлению переключениями под контролем оператора БПУ. В качестве основы для дальнейшего этапа развития систем поддержки оператора рассматривается система информационной поддержки оператора, реализация функций которой в настоящее время отрабатывается с использованием установленного на энергоблоке №1 Нововоронежской АЭС-2 макета СИПО. Системообразующими компонентами макета СИПО



являются специально разработанная для использования в составе АСУ ТП программная модель энергоблока и пошаговые интерактивные процедуры.

Внедрение ВО на действующих и строящихся энергоблоках нового поколения позволит:

- снизить информационную нагрузку на оперативный персонал БПУ;
- создать условия для поэтапного повышения уровня автоматизации управления энергоблоком;
- ускорить выполнение сложных технологических процессов за счет безопасного параллельного исполнения переключений;
- повысить достоверность контроля и диагностирования основного технологического процесса энергоблока с использованием программной модели энергоблока;
- снизить вероятность ошибочного решения оператора БПУ при выборе альтернативных вариантов для несогласованностей при проведении параллельных процессов;
- осуществлять прогноз развития технологического процесса для раннего предупреждения оператора о возможных нарушениях в работе энергоблока;
- предоставлять оперативному персоналу информацию, необходимую для принятия оптимального решения по управлению технологическим процессом.

### Библиографический список

1. НП-082-07. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. – М.: Ростехнадзор, 2007. – С. 67.
2. НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. – М.: Ростехнадзор, 2015. С. 28, 33.
3. ГОСТ Р МЭК 60964-2012. Атомные станции. Пункты управления. Проектирование. – М.: Стандартинформ, 2014. С. 4, 21.
4. **Куликова, Е.А.** Стрессы в профессиональной деятельности: причины возникновения и пути преодоления / Е.А. Куликова // Научно-методический электронный журнал Концепт. 2019. № 10 (октябрь).
5. IEC 62682:2014. Management of alarms systems for the process industries. IEC, 15 October 2014. 159 p.
6. **Анохин, А.Н.** Адаптивный интерфейс для операторов сложных систем / А.Н. Анохин // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-214. Москва, 16-19 июня 2014 г. С. 6345-6256.
2. **Гусев, И.Н.** Использование результатов пусконаладочных работ для создания, настройки и валидации системы интеллектуальной поддержки оператора на блоке №1 Нооворонежской АЭС-2. / И.Н. Гусев, Б.Л. Соловьев, В.П. Поваров, А.С. Кужиль, С.П. Падун // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2017. № 3. С. 45-54.

*Дата поступления  
в редакцию: 29.11.2021*

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 656.1

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_86

### ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛУПРОСТРАНСТВА «ГРУНТ» В КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧАХ «ШИНА-ГРУНТ»

**Н.С. Вольская**

ORCID: 0000-0003-0655-2677 e-mail: volskayans@bmstu.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
Москва, Россия**И.В. Басманов**

ORCID: 0000-0001-6997-8144 e-mail: basmanov.i.v@bmstu.ru

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

Рассмотрены новые возможности по проведению виртуальных имитационных испытаний в области оценки опорно-тяговой проходимости транспортных машин. Предложен метод, позволяющий в динамической постановке оценивать взаимодействие шины колеса транспортного средства с искусственным грунтом. Приведен пример расчетной визуализированной имитации «ударного взаимодействия» сброшенного штампа с искусственным грунтом. Это первый этап проведения эксперимента, имитирующий динамику вертикального погружения движущегося колеса в грунт. На втором этапе эксперимента активное колесо совершает прямолинейное движение, при этом визуализируется динамика изменения компрессионных сил в полупространстве грунт. Результаты компьютерного эксперимента подтвердили физическую картину взаимодействия штампа с деформируемым опорным основанием в лабораторных условиях.

Новый подход к рассмотрению контактной задачи «шина-грунт» в динамической визуализированной постановке упрощает решение задачи по оценке эффективности взаимодействия колесного движителя с различными типами грунтов.

**Ключевые слова:** динамический процесс, шина-грунт, напряженно-деформированное состояние грунта, искусственный грунт, штамп, пятно контакта шины.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Вольская, Н.С. Динамический метод оценки напряженно-деформированного состояния полупространства «грунт» в контактных задачах «шина – грунт» / Н.С. Вольская, И.В. Басманова // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. №1. С. 86-96. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_86

### DYNAMIC METHOD FOR ESTIMATING THE STRESS-STRAIN STATE OF THE «SOIL» HALF-SPACE IN CONTACT PROBLEMS «TIRE-SOIL»

**N.S. Volskaya**

ORCID: 0000-0003-0655-2677 e-mail: volskayans@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russia

**I.V. Basmanov**

ORCID: 0000-0001-6997-8144 e-mail: [basmanov.i.v@bmstu.ru](mailto:basmanov.i.v@bmstu.ru)

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

**Abstract.** New possibilities for conducting of virtual simulation tests in the field of assessing a support-traction cross-country capability of transport vehicles are considered. Method is proposed that allows to evaluate, in a dynamic formulation, the interaction of a vehicle wheel tire with artificial soil. Example of a calculated visualized simulation of the «impact interaction» of a downthrown die with artificial soil, is given. The first stage of the experiment simulates the dynamics of vertical immersion of a moving wheel into the soil. At the second stage of the experiment, the active wheel performs a rectilinear motion, while the dynamics of changes in compression forces in the soil half-space is visualized. Results of the computational experiment confirmed the physical picture of the die interaction with the deformable support base in the laboratory.

A new approach to consideration of the «tire-soil» contact problem in a dynamic visualized formulation simplifies the solution of the problem for evaluation of effectiveness of interaction of a wheeled running gear with various types of soils.

**Key words:** dynamic process, tire-soil, stress-strain state of the soil, artificial soil, die, tire contact spot.

**FOR CITATION:** N.S. Volskaya, I.V. Basmanov. Dynamic method for estimating the stress-strain state of the «soil» half-space in contact problems «tire-soil». Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №1. С. 86-96.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_86

## Введение

Проблему прогнозирования эффективности движения колесных машин (КМ) в общей постановке принято рассматривать с помощью комплексной системы «водитель – автомобиль – дорога». При оценке опорно-тяговой проходимости и сопротивления качению колес КМ в ней можно выделить отдельную задачу расчета и прогнозирования напряженно-деформированного состояния дороги, а точнее – грунта (в некоторых исследованиях используют понятие «деформируемая опорная поверхность» – ДОП). Целями прогнозирования напряженно-деформированного состояния ДОП являются расчет глубины колеи под каждым колесом машины и ограничение напряжения сдвига в пятне контакта от допустимого по величине крутящего момента. Они решаются с помощью совокупности практических (экспериментальных) и теоретических методов специалистами разных областей знаний. С одной стороны, теоретические основы прогнозирования изменения напряженно-деформированного состояния полупространства грунт в зависимости от его типа и под действием многофакторных нагрузок отражены в технической литературе и исследованиях по механике грунтов [1]. С другой стороны, в большом количестве исследований ученых автомобилистов по результатам полевых и лабораторных испытаний [2-15] в различных дорожно-грунтовых условиях разработаны эмпирические зависимости по расчету параметров колеи (например, глубины колеи  $z$ ). Прогнозирование  $z$  позволяет рассчитывать затраты мощности на сопротивление качению движителя КМ. И в первом и во втором случаях на результаты расчета и натурального эксперимента влияют деформационные параметры грунта: физико-механические и консистенция.

Эмпирические зависимости по расчету параметров колеи (второй подход) часто содержат в себе неясные по физическому смыслу коэффициенты. Использовать и систематизировать результаты огромного количества грунтовых экспериментов и исследований практически невозможно. Положение усугубляется тем, что в качестве опорной поверхности для КМ выступают различные типы грунтов (в том числе разные виды почв), на деформирующееся состояние которых влияют климатические условия, географическое положение и время года. К ДОП также относят снежный покров. Как уже отмечалось [16], помочь упростить вышеперечисленные исследования может применение методов имитационного моделирования. Их главным преимуществом может стать возможность визуализации самого процесса

деформирования конкретного типа грунта колесом или имитатором его пятна контакта с грунтом – штампом. Рассмотрим возможности применения таких методов.

Остановимся на самом методе имитации внешней механики пневматического колеса – визуализации напряженно-деформированного состояния ДОП. В нашей работе [16] предложен принцип визуального имитирования динамического взаимодействия прямолинейно движущегося колеса с грунтовым полупространством. Целью исследования в этой задаче является визуальный анализ картины изменения в первую очередь поля напряжений, характера смещения пятна контакта колеса (при его качении по ДОП) в полупространстве грунт и характера послойного разрушения искусственного грунта «в» и «под» пятном контакта шины с ДОП. Этот расчетный визуализированный имитационный эксперимент начат с попытки рассмотрения с помощью динамического воздействия на поверхность искусственно созданного грунта штампом, площадь и форма которого, пропорционально связаны с площадью пятна контакта шины с грунтом. Отметим, что такого рода натурные испытания проводились ранее, результаты их проведения изложены в работе [17]. Целью этих экспериментов были оценка демпфирующих и жесткостных свойств грунта. В качестве результата определялись: затраты мощности на качение колеса; по отдельности – влияния сопротивлений грунта и колеса на эффективное качение в рассматриваемых дорожно-грунтовых условиях.

### Выбор режима нагружения деформирующейся опорной поверхности

В механике деформируемых сред (к которым относятся грунты и почвы земной поверхности, в нашем случае ДОП) приняты следующие основные виды испытаний с учетом временного режима [1]:

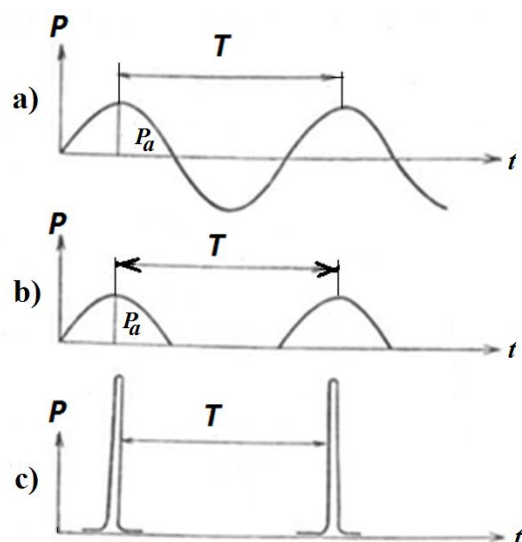
- при постоянной нагрузке;
- при постоянной деформации;
- при ступенчатой нагрузке;
- с постоянной скоростью нагружения;
- с постоянной скоростью деформации;
- циклическая нагрузка;
- ударная нагрузка;
- вибрация.

Все вышеперечисленные виды нагружения ДОП от колес ТС характерны и могут быть рассмотрены для случаев установившегося и неустановившегося движения КМ на местности. Необходимо отметить, что практически во всех современных методиках [2,4,10,11], рассматриваются процессы взаимодействия в контактной задаче «шина-грунт» в статической постановке. Отличие предлагаемых методик заключается в проведении виртуальных экспериментов в динамической постановке, расчетное время компьютерной симуляции процесса не превышает 10 секунд.

Первым основным вопросом нашего исследования является имитация силового взаимодействия колеса с грунтом с учетом скорости движения колеса. Поэтому сначала рассматриваем вертикальное сжатие грунта под движущимся вертикально вниз штампом, а затем колесом. Имитация заключается в вертикальном сбросе штампов различной: массы, конфигурации, высоты сброса. Высота сброса штампа  $h$ , как правило варьируется в интервале от 0, 2...1,0 м. В зависимости от конкретно взятого числового значения высоты  $h$  имитируются разные значения скорости при контакте штампа, а затем шины с грунтом - от 0 до 10 км/ч.

В дальнейшем предполагается сравнение результатов аналогичных полевых или лабораторных испытаний на конкретном оригинальном грунте с результатами испытаний его искусственного аналога в компьютерном эксперименте в программном комплексе на базе DEM элементов. В качестве общих измерителей рассматриваем напряженно-деформированное состояние полупространства грунт в момент контакта с ним падающего штампа.

Эту динамическую («ударную») нагрузку можно охарактеризовать малым временем воздействия значительных сил, в результате которых телу, на которое оказывается воздействие (полупространству – грунт) сообщается конечное приращение количества движения. «Удар можно рассматривать как циклическую нагрузку с большой амплитудой и малым временем нагружения». Графически разновидности циклических нагрузок можно представить на рисунке 1 [17], к выбранному виду имитации взаимодействия штампа (пятна контакта шины) с грунтом можно отнести случай, представленный на рис. 1, с).



**Рис. 1. Циклические нагрузки:**

a) синусоидальная нагрузка; b) пульсирующая синусоидальная нагрузка; c) ударная нагрузка

**Fig. 1. Cyclic loads:**

a) sinusoidal load; b) pulsating sinusoidal load; c) shock load

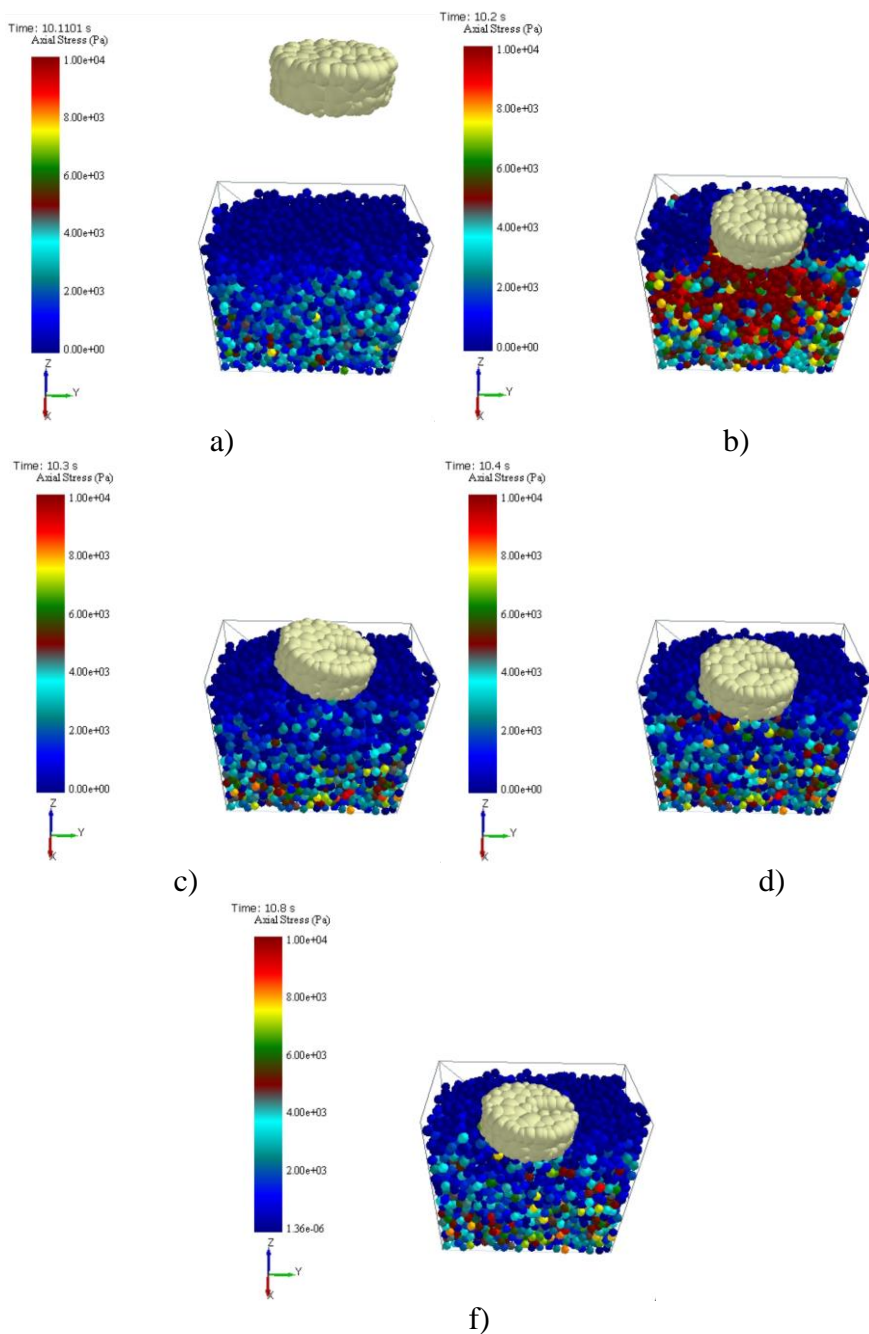
Сила, действующая при ударе, может быть определена по теореме импульсов для системы материальных точек [18] (1):

$$\Delta(mv) = F \cdot \Delta t = I, \tag{1}$$

где  $m$  – масса колеса (штампа),  $v$  – скорость колеса (штампа),  $mv$  - количество движения,  $I = F \cdot \Delta t$  – импульс силы, [Н·с].

Таким образом, чтобы упростить процесс имитационного моделирования, в первую очередь, деформационных свойств реальных грунтов, посредством физико-механических характеристик механики грунтов  $E$ ,  $\varphi_0$ ,  $c_0$  применяется вышеуказанный способ сбрасывания с высоты  $h$  круглых штампов, площадь и вес которых соответствуют инициализации реакции заданного внешнего давления на грунт, эквивалентного давлению в пятне контакта «шина-грунт». Поэтому, с помощью зависимости (2), задавшись площадью штампа, равновеликой пятну контакта реальной шины, варьируя весом и высотой сброса  $h$ , можно с помощью компьютерного эксперимента провести валидацию известного искусственного грунта по характеру возникшего поля напряжений в грунте в результате удара штампа о его поверхность (2).

$$I = m(v - v_0) = mv = P \sqrt{\frac{2h}{g}} = m\sqrt{2gh}. \tag{2}$$



**Рис. 2. Кинограмма расчетного эксперимента по оценке ударного воздействия штампа (аналога колеса КМ) на поверхность искусственного грунта (песок):**

- a) штамп поднят над грунтом на заданную высоту  $h$ ; б) зафиксированный момент динамического соприкосновения штампа с поверхностью неуплотненного грунта ( $\Delta t = 0,2$  с); в) зафиксировано упругое взаимодействие грунта и штампа (с момента падения штампа прошло  $\Delta t = 0,4$  с);  
 д) штамп второй раз входит в контакт с грунтом ( $\Delta t = 0,6$  с);  
 ф) статика– штамп лежит на искусственном грунте ( $\Delta t = 0,8$  с)

**Fig. 2. Record of the computational experiment to assess the die impact (analogous to KM wheel) on the surface of artificial soil (sand):**

- a) the die is raised above the ground to a given height  $h$ ; б) the fixed moment of dynamic contact of the die with the surface of the uncompacted soil ( $\Delta t = 0.2s$ ); в) elastic interaction of the soil and the die (It has passed the moment of the die fall  $\Delta t = 0.4s$ ) is fixed;  
 д) the die comes into contact with the soil for the second time ( $\Delta t = 0.6s$ );  
 ф) statics– the stamp is put on artificial soil ( $\Delta t = 0.8s$ )

### Цель и алгоритмы проведения расчетного и грунтового экспериментов

Рассмотрим реализацию компьютерного варианта эксперимента с помощью среды искусственного грунта, сгенерированного на базе DEM элементов. Кинограмма расчетного эксперимента представлена на рис. 2. Алгоритм эксперимента следующий:

- штамп поднят над грунтом на заданную высоту  $h$  (рис. 2а), прошло 10 с реального времени – штамп падает вертикально вниз, начальная скорость равна нулю;
- штамп движется в свободном падении, фиксируется момент динамического соприкосновения штампа с поверхностью грунта ( $\Delta t = 0,2$  с, рис. 2б).

В грунтовом объеме фиксируется напряженно-деформированное состояние от динамического воздействия штампа. Анализ распределения напряжений в подштамповой фигуре показывает неоднородное уплотнение искусственного грунта перед сбросом штампа. Картина напряжений визуализирует естественный динамический процесс во времени, происходящий в грунте. Таким образом, по результатам компьютерного эксперимента можно сделать выводы по зонам распределения напряжений и их численных значений:

- зафиксировано упругое взаимодействие грунта и штампа – штамп приподнялся над грунтом (с момента падения штампа прошло  $\Delta t = 0,4$  сек рис. 2с) – динамический процесс;
- штамп второй раз входит в контакт с грунтом ( $\Delta t = 0,6$  сек рис. 2д) – динамический процесс;
- статическое взаимовлияние невелико – штамп лежит на искусственном грунте ( $\Delta t = 0,8$  сек рис. 2ф).

Целью такого компьютерного расчетного эксперимента, прежде всего, является верификация ранее проведенных полевых и лабораторных исследований с возможностью расчетной имитации тех же грунтовых условий при расчете опорно-тяговой проходимости КМ с визуализацией напряженно-деформированного состояния ДОП. В связи с задачами, поставленными в исследовании, была проведена серия пробных установочных опытов в лаборатории кафедры по сбросу штампов на грунт типа песок. На глубине 50 мм закладывался датчик для оценки компрессионных сил и давлений. Результаты экспериментов представлены в табл. 1. На рис. 3 представлен график ударного взаимодействия штампа диаметром 220 мм, сброшенного с высоты 0,6 м. Зафиксированные значения давлений в грунте соответствуют ожидаемым численным значениям.

Таблица 1.

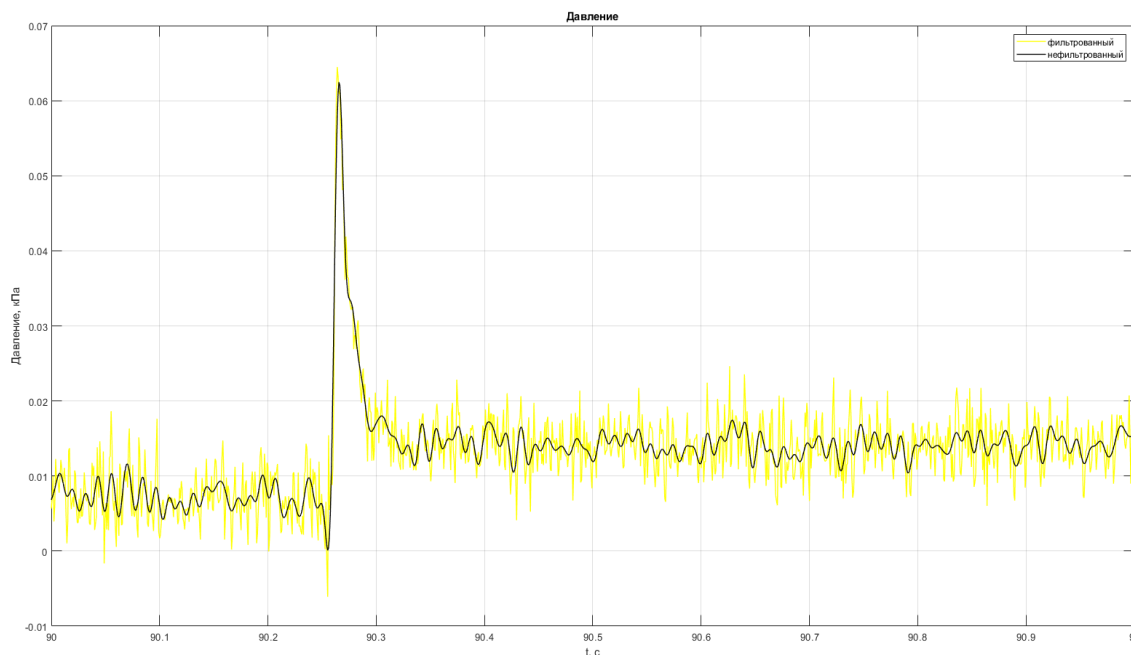
#### Результаты расчетного эксперимента

Table 1.

#### Results of the computational experiment

Масса штампа, кг	Диаметр штампа, мм	Высота сброса, мм	Зафиксированные значения давления на глубине 50 мм, кПа
16,85	395	0	0,029
16,85	395	250	0,4325
4,53	220	0	0,0588
4,53	220	400	1,176
4,53	220	600	5,88





**Рис. 3. График определения ударного взаимодействия штампа с грунтом типа «песок»**

**Fig. 3. Graph for determining of impact interaction of the stamp with the soil of «sand» type**

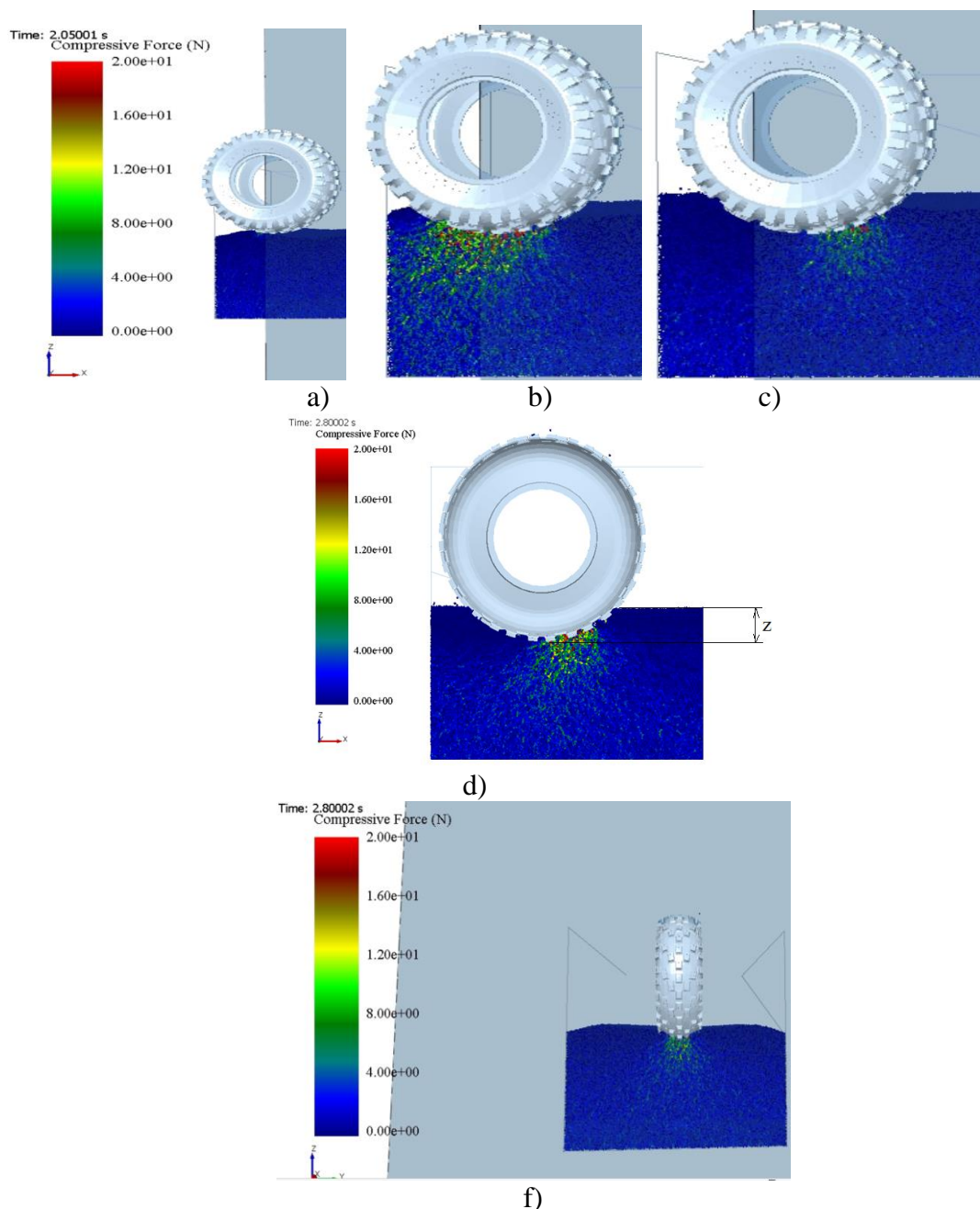
Выводы по результатам пробной серии экспериментов:

- цель проведения испытаний достигнута, динамический метод сброса штампа и выбранная чувствительность манометра позволяют оценить изменения импульса силы при ударном контакте штампа с горизонтальной поверхностью грунта во всем диапазоне изменения высоты сброса от  $h$  0,6 м до 1 м и выше;
- необходимо провести более тонкого эксперимента с четкой фиксацией высоты сброса штампа и возможности варьирования типа грунта в небольших объемах. Для этого разрабатывается специальная стендовая установка.

#### **Пример применения метода визуализации динамического процесса взаимодействия шины с грунтом типа «песок»**

В качестве примера рассмотрим принцип решения задачи «визуализация процесса динамического взаимодействия шины с искусственным грунтом сухой песок». Кинограмма процесса представлена на рис. 4. Целью этого расчетного эксперимента являлась визуализация процесса взаимодействия протектора конкретного жесткого колеса с ДОП. На рис. 4б,с, д можно наблюдать как трансформируется распределение компрессионных сил в полупространстве грунт под колесом. По рис. 4д можно определить глубину погружения колеса в грунт (высоту колеи), т.е. найти  $z$  ( $\sim 0,12$  м) для грунта типа песок при качении жесткого колеса массой 52 кг, нагруженного вертикальной осевой нагрузкой 1000 Н и крутящим моментом 200 Н·м. При симуляции этого процесса были заданы численные значения параметров грунта типа песок.

На рис. 5 представлено динамическое взаимодействие того же жесткого колеса (реализован протектор колеса для квадроцикла Kenda Bear Claw 25x8-12) с искусственным грунтом (сухой песок, элемент  $d = 5$  мм), с теми же силовыми характеристиками режима качения. Отличие в симуляциях заключается в попытке сокращения времени, необходимым для расчета задачи.

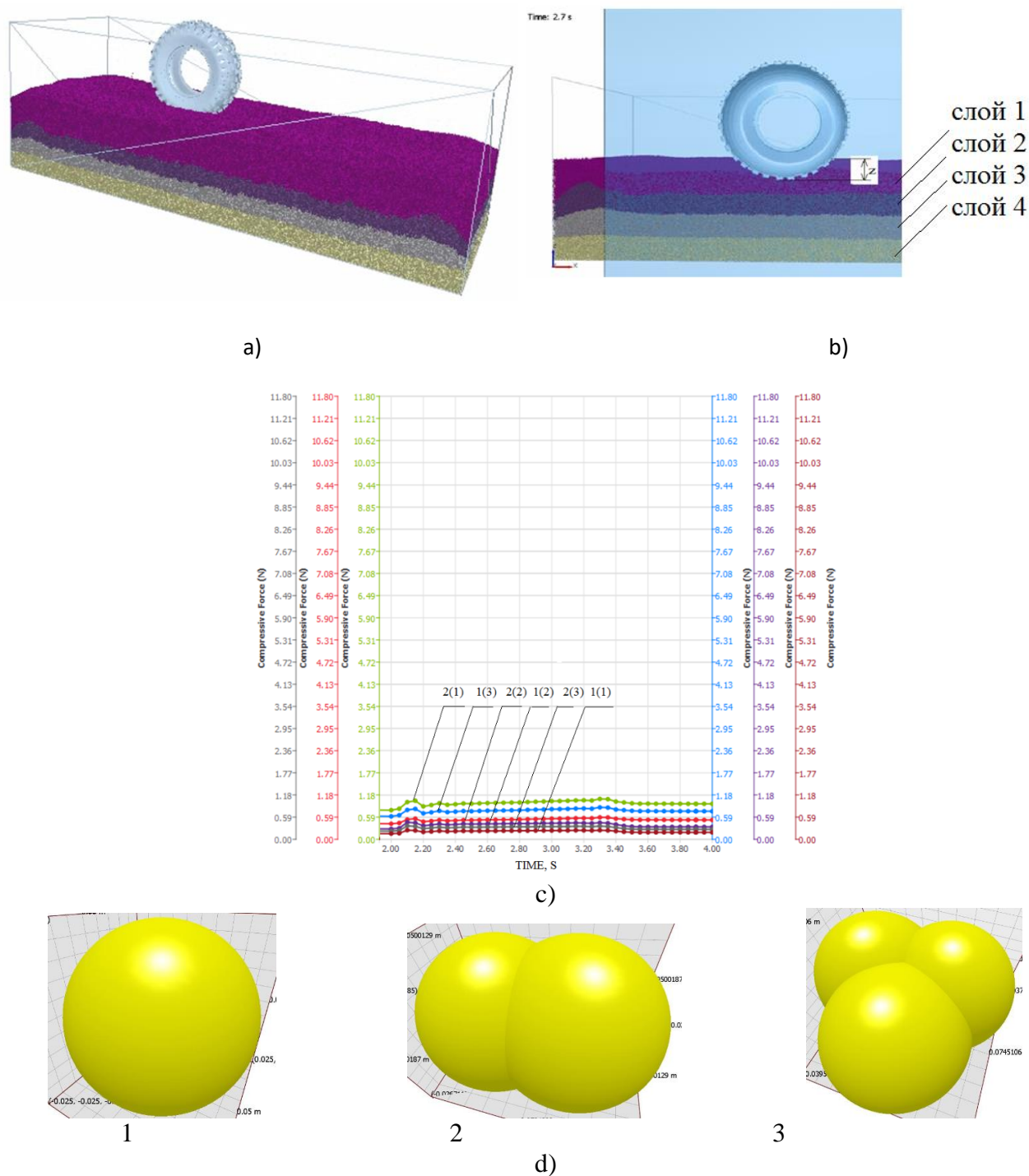


**Рис. 4. Кинограмма визуализации процесса взаимодействия шины с деформируемым опорным основанием:**

- a) момент вертикального сброса колеса с заданной высоты; б) динамический вертикальный контакт шины с грунтом – начальный этап образования геометрической характеристики пятна контакта «шина – грунт»; в) начало прямолинейного движения колеса и определение глубины колеи в рассматриваемых грунтовых условиях; д) динамическая визуализация процесса напряженно-деформированного состояния полупространства грунт, визуализация глубины колеи  $z$ ;
- е) поперечный разрез контакта взаимодействия шины с грунтом

**Fig. 4. Record of visualization of the process of interaction of tire with deformable support base:**

- a) moment of vertical throwdown of wheel from a pre-determined height; б) dynamic vertical contact of the tire with soil – the initial stage of formation of geometric characteristic of «tire-soil» contact spot; в) beginning of rectilinear movement of wheel and determination of track depth in the soil conditions under consideration; д) dynamic visualization of soil half-space stress-strain state process, visualization of depth of track  $z$ ;
- е) a cross section of contact of interaction of the tire with soil



**Рис. 5. Использование возможностей структуризации искусственного грунта в процессе компьютерного моделирования:**

a) 3D модель активного колеса 25x8-12; б) цветное разделение грунта на слои, визуализация определения глубины колеи; с) динамика послойного изменения осредненного значения компрессионных сил в полупространстве грунт; обозначения – «номер слоя» (форма DEM элемента), например, 2(1); д) три формы частиц, образующих искусственный грунт – 1, 2, 3

**Fig. 5. Use of possibilities of structuring of artificial soil in the computer modeling process:**  
 a) 3D model of the active wheel 25x8-12; b) color division of the soil into layers, visualization of the track depth determination; c) dynamics of layer-by-layer changes in the average value of compression forces in the soil half-space; designations – «layer number» (shape of DEM element), for example, 2(1); d) three forms of particles which form the artificial soil – 1, 2, 3

Отличие второго примера того же расчетного варианта заключается в следующем. Известно, что чем крупнее DEM элемент, тем меньше расчетное время симуляции. Часто в исследованиях фактор сокращения расчетного времени крайне важен. Нами была использована возможность послойной генерации частиц с разными значениями параметров DEM элементов (например, их размеров, в данном примере реализованы 3 варианта используемых форм каждой дискретной частицы грунта). За основу принят диаметр сферической частицы  $D = 5$  мм (рис. 5d). Все полупространство грунт разделено на четыре цветных слоя (рис. 5b). Цветовое выделение зон связано с последовательно изменяющимся напряженно-деформированным состоянием грунта под колесом. Расчетные значения компрессионных сил в рассматриваемый момент времени для каждого вида с характерным размером частицы в четырех слоях искусственного грунта разные (рис. 5c). Приведены результаты расчета компрессионных сил во времени для двух верхних слоев грунта ( $t = 0 \dots 2,0$  с - время формирования грунтовой массы и ее уплотнения (условно не показаны);  $t = 2,0 \dots 4,0$  с – время движения колеса).

На рис. 6 представлен график изменения линейной скорости качения колеса. Средняя скорость качения в заданных условиях около 3,6 м/с.

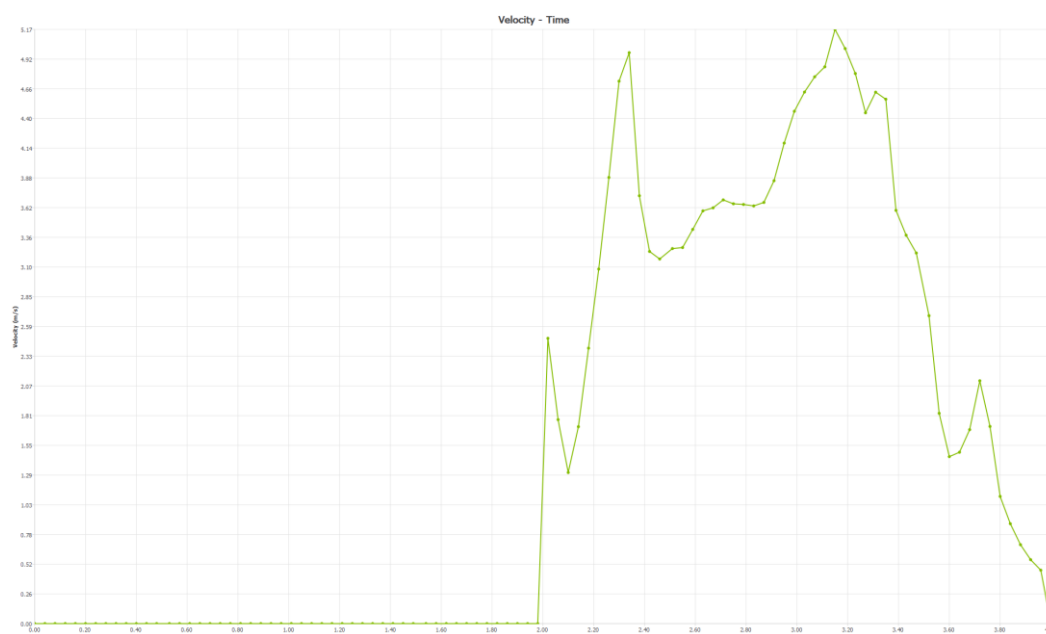


Рис. 6. График изменения линейной скорости качения колеса

Рис. 6. Graph of changes in the wheel linear rolling speed

### Выводы

1. Программные пакеты, в основе которых заложена возможность визуализации физического силового контакта механических систем (шина и грунт), с помощью DEM элементов позволяют оценивать этот процесс в динамической постановке с новыми возможностями в исследовании и уточнении характеристик его протекания.
2. Разработанные алгоритмы компьютерных экспериментов могут помочь уточнить физико-механические параметры искусственных грунтов, предлагаемых разработчиками программных пакетов.
3. Представлена методика визуализации динамики «колееобразования» в полупространстве грунт под воздействием катящегося колеса.

**Библиографический список**

1. **Цытович, Н.А.** Механика грунтов Московский ун-т им. М.В. Ломоносова / Н.А. Цытович. – Москва, 1961. – 304 с.
2. **Агейкин, Я.С.** Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
3. **Smith, W.C.** Modeling of Wheel-Soil Interaction for Small Ground Vehicles Operating on Granular Soil / W.C. Smith // A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in The University of Michigan, 2014. p. 148.
4. Полотно пути транспортно-технологических машин (справочные материалы к теории «машина-местность»): учебник под ред. В.В. Белякова, А.А. Куркина; Нижегород. гос. техн. ун-т им. П.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. – 447 с.
5. **Вольская, Н.С.** Разработка методов расчета опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям в районах эксплуатации: дис. ...д-ра техн. наук 05.05.03 / Н.С. Вольская. – М., 2008. – 370 с.
6. **Беляков, В.В.** Подвижные комплексы мониторинга прибрежной зоны: монография / В.В. Беляков, У.Ш. Вахидов, Д.В. Зезюлин и др.; Нижегород. гос. техн. ун-т им. П.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2017. 326 с.
7. **Макаров, В.С.** Разработка научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон: дис. ...д-ра техн. наук 05.05.03 / В.С. Макаров. – М., 2017. С. 311.
8. **Тисленко, Д.С.** Метод выбора рациональной формы погруженных в снег элементов колесной машины с целью снижения сопротивления движению / Д.С. Тисленко, В.Ф. Лянг, В.В. Беляков, В.С. Макаров, С.С. Дралкин, Д.А. Мартынов, К.И. Зайцев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2019. №3. С. 162.
9. **Wong, J.** Prediction of Rigid Wheel Performance Based on the Analysis of Soil-Wheel Stresses, Part I and Part II. / J. Wong, A. Reece // Journal of Terramechanics, 1967, vol. 4(1): pp. 81-98, vol. 4(2): pp. 7-25.
10. **Жилейкин, М.М.** Экспериментальное определение характеристик деформируемого опорного основания в полевых условиях / М.М. Жилейкин, А.Ю. Захаров, М.В. Паньшин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2019. №1. С. 175-186.
11. **Ларин, В.В.** Теория движения полноприводных колёсных машин: учебник / В.В. Ларин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 391.
12. **Volskaya, N.S.** Mathematical model of rolling an elastic wheel over deformable support base / N.S. Volskaya, M.M. Zhileykin and A.Y. Zakharov // IASF-2017. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 315 (2018) 012028 doi: 10.1088/1757-899X/315/1/012028.
13. **Барахтанов, Л.В.** Моделирование взаимодействия колесной машины с грунтом / Л.В. Барахтанов, В.И. Котляренко, С.Е. Манянин, И.А. Соколов // Журнал автомобильных инженеров № 2(67), 2011. С. 26-28.
14. **Алипов, А.А.** Распределений давлений в контакте шины с дорогой / А.А. Алипов, В.В. Беляков, А.Н. Блохин, Д.В. Зезюлин // Вестник ИжГТУ, 2011, №1(49), с. 15-18.
15. **Ojeda, L.** Terrain Trafficability Characterization with a Mobile Robot / L. Ojeda, J. Borenstein, G. Witus // Proc. of the SPIE Defense and Security Conference, Unmanned Ground Vehicle Technology VII, Orlando, FL, March 28th to April 1st, 2005.
16. **Вольская, Н.С.** Элементы методики прогнозирования эффективности движения колеса с помощью имитационного моделирования его внешней механики / Н.С. Вольская, И.В. Басманов, Я.Ю. Левенков, Г.Ю. Ястребов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2021. №4. С.
17. **Вольский, С.Г.** Исследование развития конструкций, сопротивления и сцепления колесного движителя автомобилей высокой проходимости: дис. ...канд. техн. наук 05.05.03 / С.Г. Вольский. – М., 1971. – 165 с.
18. **Яблонский, А.А.** Курс теоретической механики. Часть II / А.А. Яблонский. – М.: Динамика изд. «Высшая школа», 1964. – 375 с.

**Дата поступления  
в редакцию: 28.12.2021**

УДК 629.36

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_97

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНОГО ПОЕЗДА. ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

**К.Б. Евсеев**

ORCID: 0000-0001-7193-487X e-mail: kb\_evseev@bmstu.ru

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

Верифицирована математическая модель двухзвенного гусеничного поезда с пассивным прицепом. Описаны основные технические характеристики и особенности конструктивно-компоновочных решений, состав используемого контрольно-измерительного оборудования и программно-аппаратного комплекса, предназначенных для записи и обработки данных. Программа экспериментальных исследований включает два этапа. Первый этап экспериментальных исследований представляет собой комплекс испытаний, направленных на определение параметров взаимодействия объектов исследования с опорным основанием. Рассматриваются два объекта испытаний: макетный образец гусеничной машины и трелевочный трактор ТБ-1. Второй этап представляет собой проведение испытаний гусеничного поезда при движении по траектории типа «змейка». При проведении экспериментальных исследований были получены осциллограммы записи данных с используемого контрольно-измерительного оборудования, которые сравнивались с зависимостями изменения параметров, полученными по результатам математического моделирования.

**Ключевые слова:** гусеничный поезд, экспериментальные исследования, математическая модель, испытания, имитационное математическое моделирование, взаимодействие с опорным основанием.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Евсеев, К.Б. Экспериментальное исследование движения гусеничного поезда. Верификация математической модели // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. №1. 97-113.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_97

## EXPERIMENTAL STUDY OF A TRACKED TRAIN MOTION. MATHEMATICAL MODEL VERIFICATION

**K.B. Evseev**

ORCID: 0000-0001-7193-487X e-mail: kb\_evseev@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russia

**Abstract.** Mathematical model of a two-link tracked train with a passive trailer, is verified. Main technical characteristics and features of design-layout solutions, composition of the control and measuring equipment used, and the hardware-software complex designed for data recording and processing, are described. Experimental research program includes two stages. The first stage of experimental research is a set of tests aimed at determining of parameters of interaction of research objects with the support base. Two test objects are considered: a breadboard model of a tracked vehicle and a TB-1 skidding tractor. The second stage is the testing of a tracked train when moving along a trajectory of the «snake» type. During the experimental studies, oscillograms of data recordings from the used control and measuring equipment were obtained, which were compared with the dependences of parameter changes obtained as per mathematical modeling results.

**Key words:** tracked train, experimental studies, mathematical model, test operations, simulation mathematical modeling, interaction with a support base.

**FOR CITATION:** K.B. Evseev. Experimental study of a tracked train motion. mathematical model verification. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №1. C. 97-113. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_97

## Введение

При проведении имитационного математического моделирования движения гусеничных машин необходимо в качестве исходных данных задавать параметры дорожно-грунтовых условий. Доступные исходные данные, приведенные в различных специализированных источниках, подходят для проведения теоретических исследований на этапах выполнения научно-исследовательских работ, когда используется верифицированная математическая модель транспортного средства. Когда разрабатывается новая математическая модель движения транспортного средства, новые законы управления движением или уточняются существующие подходы к математическому моделированию рабочих процессов, требуется верификация математической модели по результатам натурного эксперимента. В этом случае целесообразно перед проведением испытаний по верификации математической модели движения транспортного средства уточнить условия движения, а именно – определить параметры взаимодействия с опорным основанием, уточнив тем самым исходные данные. Распространенным подходом к учету взаимодействия движителя с опорным основанием является использование модели, основанной на понятии об «эллипсе трения», согласно которому сила взаимодействия с опорной поверхностью направлена противоположно скорости скольжения в плоскости опорного основания в точках контакта [1-3] (рис. 1).

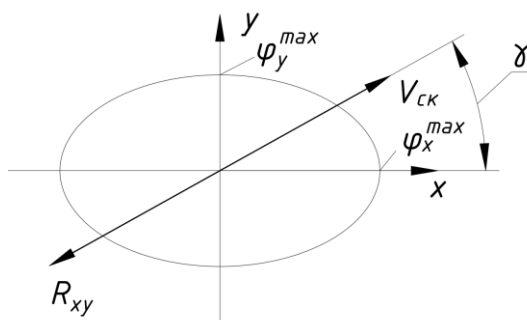


Рис. 1. «Эллипс трения»

Fig. 1. «Friction ellipse»

В таком случае коэффициент взаимодействия будет определяться по следующей зависимости (1):

$$\varphi^{max}(\gamma) = \frac{\varphi_x^{max} \varphi_y^{max}}{\sqrt{\varphi_x^{max^2} \sin^2(\gamma) + \varphi_y^{max^2} \cos^2(\gamma)}}, \quad (1)$$

где  $\varphi_x^{max}$  – коэффициент сцепления в продольном направлении;

$\varphi_y^{max}$  – коэффициент сцепления в поперечном направлении;

$\gamma$  – угол между вектором скорости скольжения  $V_{СК}$  и осью  $x$ .

Будем считать, что для опорного основания типа «дернистый грунт» применима зависимость коэффициента взаимодействия от коэффициента скольжения, которая представлена на рис. 2 и описывается выражением [1, 4] (2):

$$\varphi(S) = \varphi^{max}(\gamma) \left(1 - e^{-\frac{S}{S_0}}\right), \quad (2)$$

где  $S$  – коэффициент скольжения активного участка гусеницы;

$S_0$  – константа, определяющая форму кривой  $\varphi(S)$  (рис. 2).

Подобная модель взаимодействия движителя с опорным основанием широко используется и при моделировании движения гусеничных машин на плотном грунте [5-7]. Таким образом, для использования такого подхода необходимо в качестве исходных данных задавать коэффициенты сцепления в продольном  $\varphi_x^{max}$  и поперечном направлениях  $\varphi_y^{max}$ . Кроме того, в дифференциальные уравнения движения гусеничной машины входит коэффициент



сопротивления прямолинейному движению по горизонтальному основанию  $f$ , который тоже необходимо задавать в качестве исходных данных при проведении имитационного математического моделирования. Для «дернистого грунта»  $S_0 = 0,1$  [5, 8].

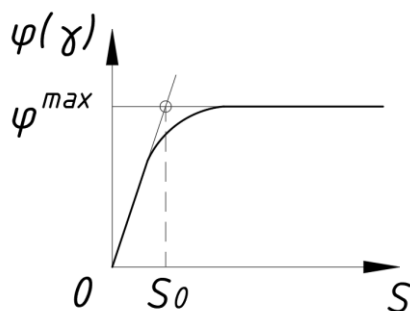


Рис. 2. Зависимость коэффициента взаимодействия от коэффициента скольжения

Fig. 2. Dependence of the interaction coefficient on the slip coefficient

В данной работе представлены результаты экспериментального определения коэффициента сопротивления движению гусеничной машины, коэффициента сцепления в продольном и поперечном направлениях. С учетом полученных коэффициентов, определенных в результате ряда экспериментов, были проведены экспериментальные исследования движения объекта испытаний для верификации разработанной математической модели движения гусеничного поезда [9]. Целью испытаний является верификация разработанной математической модели движения гусеничного поезда с учетом предварительного экспериментального определения параметров взаимодействия с опорным основанием (коэффициентов сопротивления движению, коэффициентов сцепления в продольном и поперечном направлениях).

### Объекты испытаний

В качестве одного из объектов испытаний использовался макетный образец гусеничной машины (ГМ), разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана и ООО «ЗВМ» (г. Заволжье, Нижегородская обл.), внешний вид которой представлен на рис. 3.



Рис. 3. Макетный образец гусеничной машины, разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана

Fig. 3. Breadboard model of a tracked vehicle developed at the Bauman Moscow State Technical University



Макетный образец ГМ оснащен механической трансмиссией, бензиновым двигателем ВАЗ 21126 и механизмом поворота типа «бортовой фрикцион». Особенностью конструкции является диагональное расположение ведущих колес (у правого борта заднее расположение ведущего колеса, а у левого – переднее) для обеспечения возможности использования различных вариантов трансмиссий: механической, электромеханической, гидрообъемной и т.д. Технические характеристики макетного образца ГМ представлены в табл. 1.

Таблица 1.

## Технические характеристики макетного образца ГМ

Table 1.

## Technical characteristics of breadboard model of the TV

Параметр	Значение
Масса, кг	2905
База, м	2,98
Колея, м	1,67
Радиус ведущего колеса, м	0,22
Передаточное отношение бортового редуктора	3,012
Передаточное число главной передачи	1,9
Передаточное число главной передачи в коробке передач от ВАЗ 2181	3,7
Передаточные числа коробки передач	3,636; 1,95; 1,357; 0,941; 0,784
Максимальный крутящий момент двигателя, Нм	145 (при 4000 об/мин)
Максимальная мощность двигателя, кВт	72 (при 5600 об/мин)

Схема трансмиссии макетного образца ГМ представлена на рис. 4.

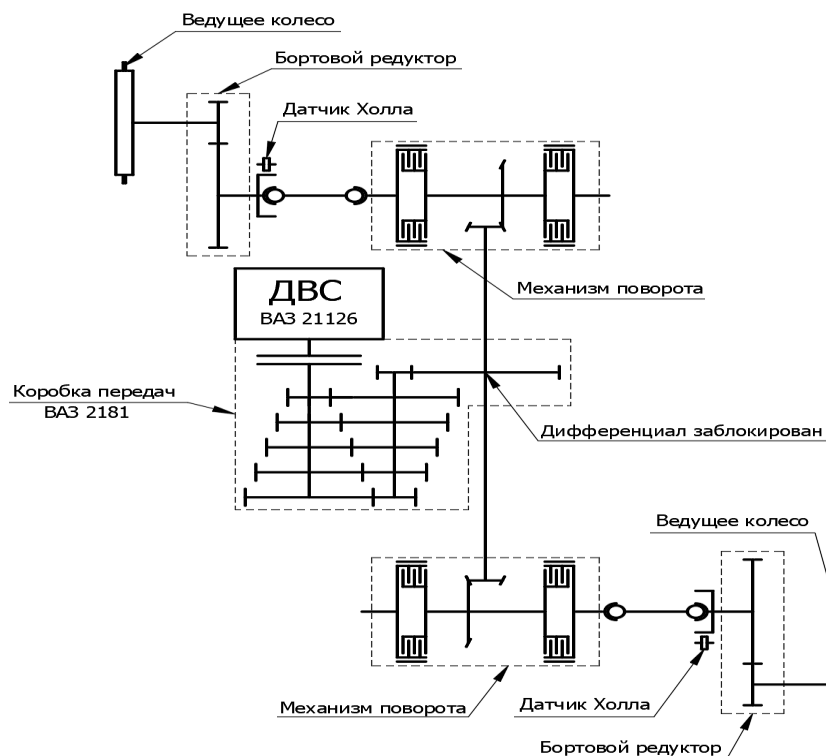


Рис. 4. Схема трансмиссии макетного образца гусеничной машины

Fig. 4. Transmission layout of a breadboard model of the TV

Другим объектом исследования является трелевочный трактор ТБ-1, используемый в качестве тягача при проведении испытаний для верификации математической модели гусеничного поезда. Внешний вид трелевочного трактора ТБ-1 представлен на рис. 5.



Рис. 5. Внешний вид трелевочного трактора ТБ-1

Fig. 5. Appearance of TB-1 skidding tractor

Технические характеристики трелевочного трактора ТБ-1М представлены в табл. 2.

**Технические характеристики трелевочного трактора ТБ-1М**

*Таблица 2.*

**Technical characteristics of TB-1M skidding tractor**

*Table 2.*

Параметр	Значение
Снаряженная масса, кг	10800
База, м	2,31
Колея, м	1,69
Радиус ведущего колеса, м	0,2
Ширина гусеницы, м	0,44
Дорожный просвет, мм	555
Максимальный крутящий момент двигателя, Нм	360 (при 1300 об/мин)
Максимальная мощность двигателя, кВт	58,8 (при 1800 об/мин)
Габаритная высота, мм	2560
Габаритная ширина, мм	2357
Габаритная длина, мм	5850

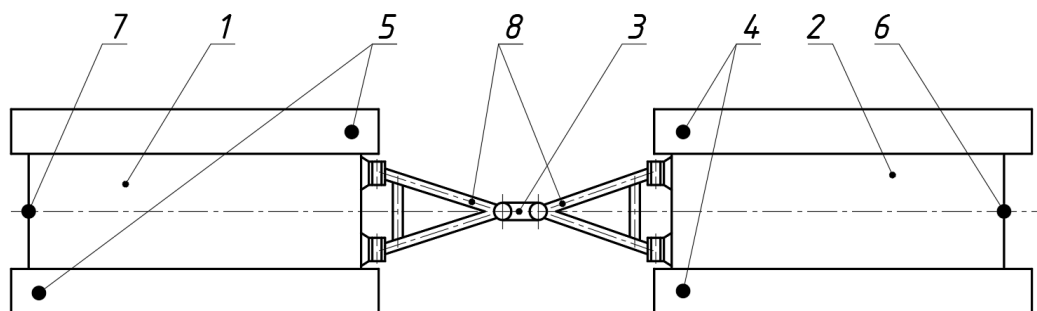
Целью испытаний является верификация разработанной математической модели движения гусеничного поезда с учетом предварительного экспериментального определения параметров взаимодействия с опорным основанием (коэффициентов сопротивления движению, коэффициентов сцепления в продольном и поперечном направлениях). Для этого при проведении испытаний использовался двухзвенный гусеничный поезд, который представляет собой тягач (трелевочный трактор ТБ-1) и прицеп (макетный образец ГМ), связанные между собой шарнирно с помощью двух рычагов жесткой сцепки. В сцепном устройстве между машинами установлен s-образный тензодатчик для регистрации усилия в сцепке. Внешний вид объекта испытаний представлен на рис. 6.



**Рис. 6. Внешний вид объекта испытаний**

**Fig. 6. Appearance of the test object**

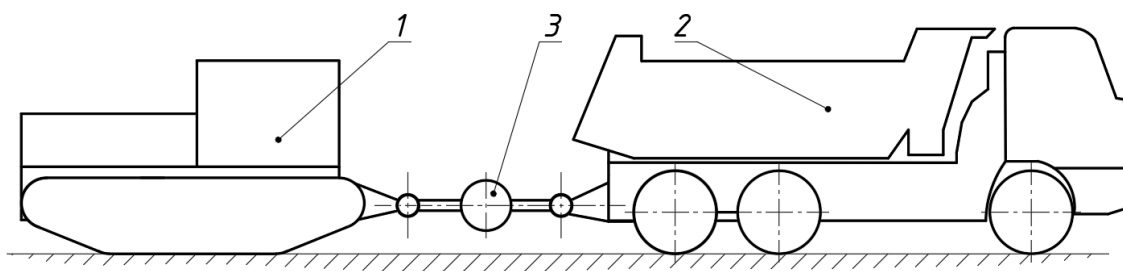
На рис. 7 представлена схема объекта испытаний с расположением контрольно-измерительной аппаратуры. Тягач (2) и прицеп (1) шарнирно соединены с помощью двух рычагов жесткой сцепки (8). Между двумя рычагами жесткой сцепки установлен s-образный тензодатчик (3) для регистрации усилия, возникающего в плоскости сцепки в процессе проведения эксперимента. S-образный тензодатчик имеет шарнирную связь с каждым из рычагов (по три вращательные степени свободы в каждом шарнире). С корпусом ГМ каждый из рычагов сцепки соединен с помощью шарниров, имеющих только одну вращательную степень свободы вокруг поперечной оси, таким образом, обеспечивается измерение усилия s-образным тензодатчиком непосредственно в плоскости сцепки. На тягаче установлены индуктивные датчики (4), которые измеряют частоту вращения ведущих колес левого и правого борта. На прицепе установлены такие же датчики (5), которые измеряют частоту вращения входного вала бортового редуктора левого и правого бортов. Регистрация траекторий и линейных скоростей движения тягача и прицепа осуществляется с использованием двух регистраторов данных Racelogic Vbox, соединенных с GPS-приемниками (6), которые расположены на корпусе тягача и прицепа, на максимально возможном расстоянии друг от друга для обеспечения максимальной разницы координат записываемых траекторий.



**Рис. 7. Схема проведения испытаний**

**Fig. 7. Testing scheme**

Испытания по определению параметров взаимодействия проводились на двух типах опорного основания: ровной асфальтобетонной площадке и ровном грунтовом основании типа «дернистый грунт» [10]. Параметры взаимодействия для трелевочного трактора ТБ-1 определялись только на ровном грунтовом основании типа «дернистый грунт», поскольку этот объект испытаний имеет развитые грунтозацепы, для этого в качестве тягача использовалось колесное трехосное шасси полной массой 25 т. Схема проведения испытаний представлена на рис. 8.



**Рис. 8. Схема проведения испытаний для определения параметров взаимодействия для трелевочного трактора ТБ-1**

**Fig. 8. Testing scheme for determination of interaction parameters for TB-1 skidding tractor**

**Контрольно-измерительное оборудование**

При проведении испытаний по определению параметров взаимодействия с опорным основанием и верификации математической модели использовалось контрольно-измерительное оборудование, представленное в табл. 3.

*Таблица 3.*

**Контрольно-измерительное оборудование**

*Table 3.*

**Control and measuring equipment**

Аппаратно-измерительный комплекс	Назначение
S-образный тензодатчик С2Н с максимальным измеряемым усилием 50кН	Регистрация усилия в сцепке
Датчики Omron e2a-m30ln30-wp-b1	Для регистрации частот вращения ведущих колес
Регистратор данных Racelogic Vbox	Для измерения скорости и положения движущегося транспортного средства на основе данных, получаемых GPS-приемником
Видеокамеры Racelogic	Для визуальной регистрации и записи (видеорегистрации) событий
Преобразователь ZET 7176	Преобразователь интерфейса CAN 2.0 – USB
Блок питания 24В	Для питания комплекта оборудования
Соединитель ZET 7001	Соединитель измерительной линии
Цифровой модуль ZET 7111	Для подключения S-образного тензодатчика и регистрации усилия в сцепке
Цифровой модуль ZET 7180-V	Для подключения датчиков вращения ведущих колес и регистрации частот вращения
USB ключ ZETKey	Для расширения функционала программного обеспечения ZETLAB
ЭВМ (ноутбук) с кабелем USB 2.0	Для обработки результатов эксперимента и соединения с контрольно-измерительным оборудованием
Программное обеспечение ZETLAB	Для контроля, обработки и записи результатов эксперимента

Комплект оборудования для контроля, обработки и записи данных эксперимента, предназначенный для определения параметров взаимодействия с опорным основанием и верификации математической модели движения гусеничного поезда, установленный на объекте испытаний, представлен на рис. 9.



## Программа экспериментальных исследований

Определение коэффициента сопротивления прямолинейному движению  $f$  осуществлялось буксировкой тягачом испытуемой машины в продольном направлении. Схема испытаний по определению коэффициента  $f$  представлена на рис. 10 а). Коэффициент сопротивления движению был определен для ГМ с подключенной трансмиссией и с включенной нейтральной передачей в коробке передач и выключенными механизмами управления. Буксировка испытуемой машины происходит с постоянной скоростью около 5 км/ч в течение периода времени от 10 до 15 с. Перед проведением испытаний в сцепку между тягачом (2) и испытуемой ГМ (1) был установлен S-образный тензодатчик (3), с помощью которого будет фиксироваться значение усилия  $P_{кр}$ , требуемого для буксировки испытуемой машины. Непосредственно перед проведением испытаний тензодатчик был откалиброван.



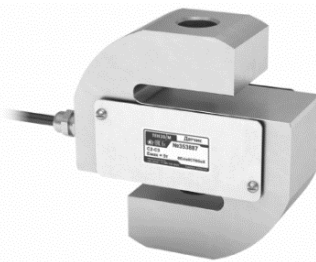
а)



б)



в)



г)



д)

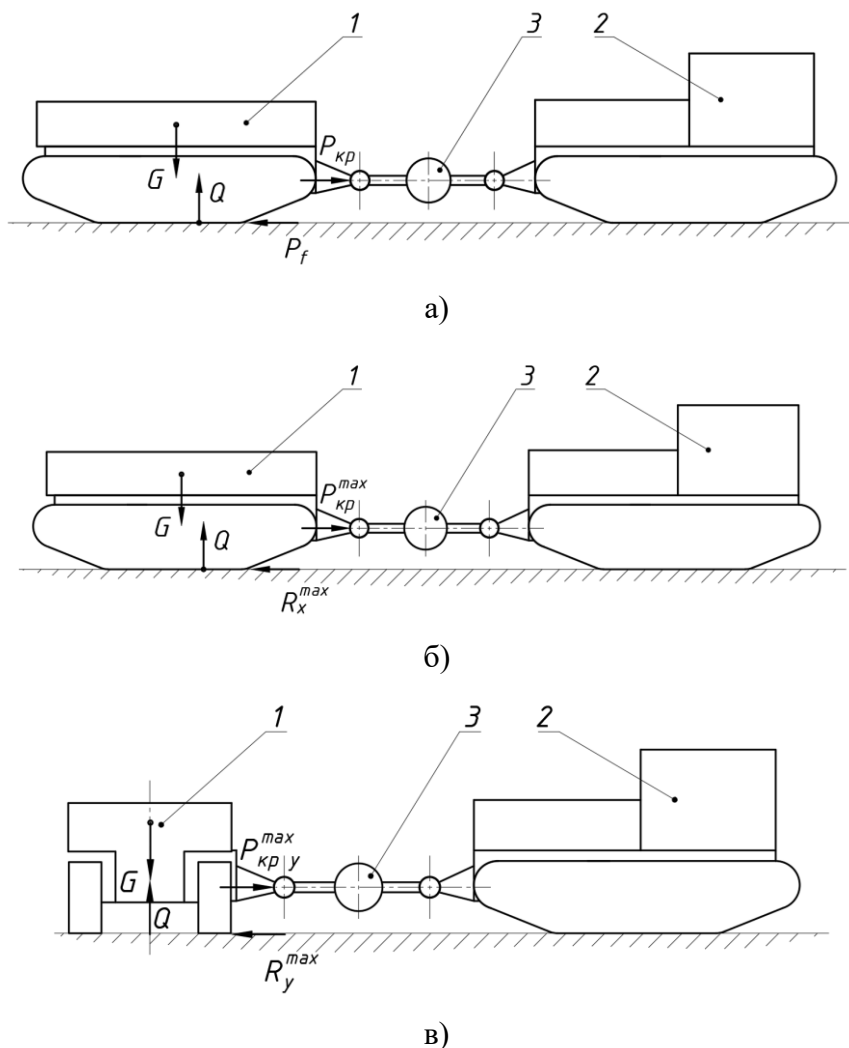
**Рис. 9. Оборудование для контроля, обработки и записи данных эксперимента:**

- а) комплект оборудования ZETLAB; б) ноутбук с установленным программным обеспечением ZETLAB и VBOXTools и с подключенным к нему контрольно-измерительным оборудованием ZETLAB, установленный на объекте испытаний; в) индуктивный датчик Omron e2a-m30ln30-wp-b1; г) S-образный тензодатчик C2H; д) регистратор данных Racelogic Vbox с комплектом видеокамер Racelogic и GPS-приемником

**Fig. 9. Equipment for monitoring, processing and recording of experimental data:**

- a) set of ZETLAB equipment; b) laptop with ZETLAB and VBOXTools software installed, and with ZETLAB control and measuring equipment connected to it, installed at the test object; c) Omron e2a-m30ln30-wp-b1 inductive sensor; d) S-shaped C2H strain sensor; e) RacelogicVbox data logger with a set of Racelogic video cameras and a GPS receiver

Определение коэффициента сцепления в продольном и поперечном направлениях  $\varphi_x^{max}$  и  $\varphi_y^{max}$  осуществлялось буксировкой тягачом испытуемой ГМ в продольном и поперечном направлениях с заторможенными бортовыми фрикционами. Схема испытаний по определению коэффициента сцепления в продольном и поперечном направлениях  $\varphi_x^{max}$  и  $\varphi_y^{max}$  представлена на рис. 10 б) и 10 в) соответственно. В сцепку между тягачом (2) и испытуемой ГМ (1) установлен тензодатчик (3), с помощью которого будет фиксироваться значение усилия  $P_{кр\ x}^{max}$ , требуемого для буксировки испытуемой машины в продольном направлении и  $P_{кр\ y}^{max}$ , требуемого для буксировки испытуемой машины в поперечном направлении.



**Рис. 10. Расчетные схемы для определения параметров взаимодействия с опорным основанием:**  
 а) – для определения коэффициента сопротивления движению, б) и в) – для определения коэффициентов сцепления в продольном и поперечном направлениях соответственно

**Fig. 10. Calculation schemes for determination of parameters of interaction with the support base:**  
 а) – to determine the coefficient of resistance to movement, б) and c) – to determine the coefficients of adhesion in the longitudinal and transverse directions, respectively

На рис. 11 представлен макетный образец ГМ в процессе проведения испытаний по определению параметров взаимодействия на грунтовом опорном основании типа «дернистый грунт». После обработки экспериментальных данных должны быть получены значения параметров взаимодействия с опорным основанием, которые будут использоваться в качестве исходных данных при верификации разработанной математической модели движения гусеничного поезда.



а)

б)

**Рис. 11. Макетный образец в процессе проведения различных испытаний:**

- а) для определения коэффициента сопротивления движению и коэффициента сцепления в продольном направлении на «дернистом грунте»;
- б) для определения коэффициентов сцепления в поперечном направлении на «дернистом грунте»

**Fig. 11. Breadboard model in the process of conducting of various tests:**

- a) to determine the coefficient of resistance to movement and the coefficient of adhesion in the longitudinal direction on the «turfy soil»;
- b) to determine the coefficients of adhesion in the transverse direction on the «turfy soil»

Рассмотрим порядок проведения экспериментальных исследований для верификации математической модели движения гусеничного поезда. Движение гусеничного поезда вне дорог может осуществляться по траектории, которая может быть представлена в виде комбинации прямых участков и участков в виде дуг окружности различного радиуса, кроме этого, при объезде различных препятствий движение может осуществляться по более сложной траектории типа «змейка» или «синусоида» с переменной кривизной и постоянной сменой знака кривизны. Кроме этого, при движении гусеничных машин по траектории с постоянной сменой знака кривизны значительно меняется момент инерции машины, а, следовательно, значительно изменяются показатели нагруженности элементов трансмиссии [11]. Таким образом, движение по траектории типа «змейка» будем считать наиболее характерным для учета всех особенностей движения гусеничного поезда при проведении эксперимента для верификации разработанной математической модели.

По данным, приведенным в работах [12-14] при эксплуатации гусеничных машин наиболее часто встречаются повороты с кривизной  $k = 0 \dots 0,1$  1/м. С учетом этого для проведения испытаний предварительно была размечена траектория типа «змейка», были выбраны радиусы сопрягаемых дуг 10м. Траектория для выполнения маневра типа «змейка» представлена на рис. 12. При выполнении указанного маневра тягач (трелевочный трактор ТБ-1) двигался с включенной первой передачей в коробке передач с максимальной степенью нажатия на педаль подачи топлива. Для следования размеченной траектории тягач поворачивал за счет механизма поворота типа борт-фрикцион, при этом степень нажатия на педаль подачи топлива не менялась. В коробке передач прицепа (макетного образца ГМ) была включена нейтральная передача, таким образом, связь двигателя с коробкой передач отсутствовала и прицеп являлся пассивным, отдельно отметим, что с учетом особенностей конструкции трансмиссии макетного образца ГМ угловые скорости ведущих колес бортов были одинаковыми. По результатам эксперимента по определению параметров взаимодействия с опорным основанием были получены осциллограммы записи изменения напряжения s-образного тензодатчика. С использованием заранее определенных тарировочных коэффициентов были получены осциллограммы усилий, возникающих в процессе проведения испытаний, далее на осциллограммах были выбраны участки записи с установившимися значениями измеряемых параметров, для каждого из которых было определено математическое ожидание. Пример осциллограммы полученного усилия в процессе выполнения эксперимента по определению коэффициента сцепления в поперечном направлении приведен на рис. 14.

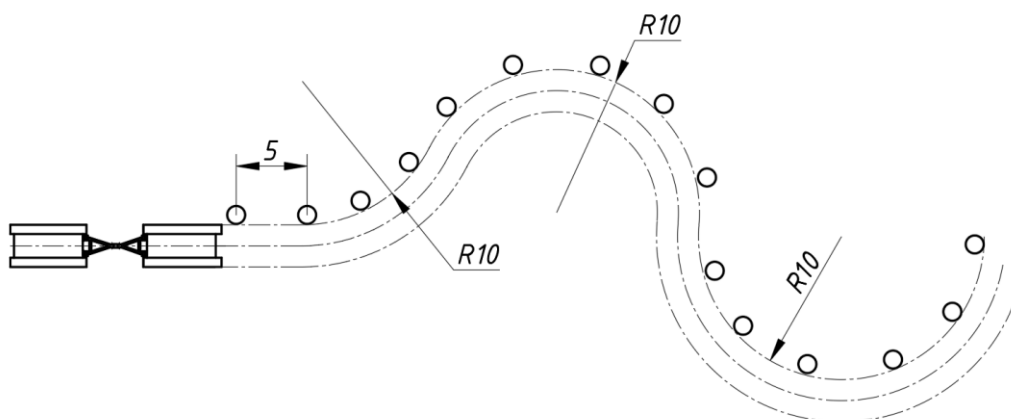


Рис. 12. Траектория для выполнения маневра типа «змейка»

Fig. 12. Trajectory for performing a «snake» type maneuver



Рис. 13. Гусеничный поезд в процессе выполнения маневра «змейка»

Fig. 13. Trajectory for performing a «snake» type maneuver

На рис. 13 изображен гусеничный поезд в процессе выполнения маневра «змейка» при проведении испытаний.

### Определение параметров взаимодействия гусеничной машины с опорным основанием

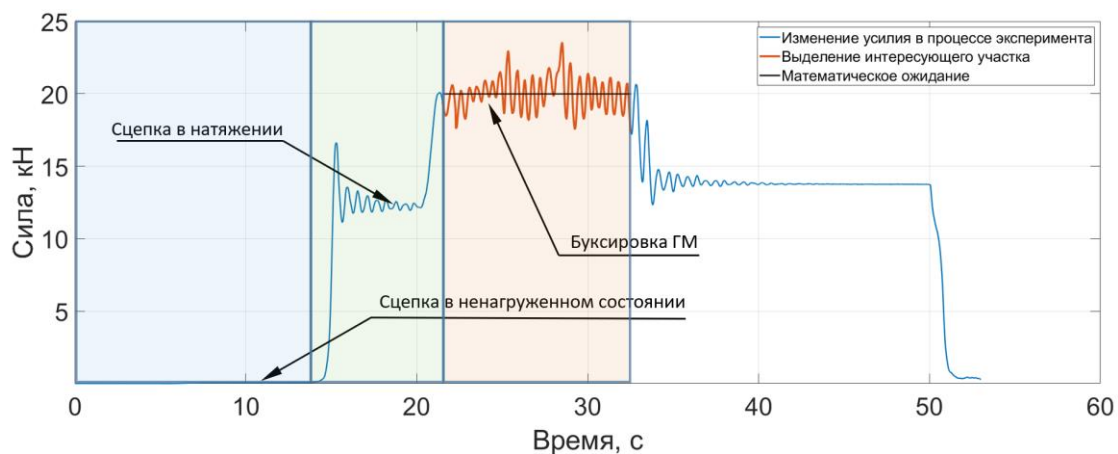


Рис. 14. Осциллограмма полученного усилия в процессе эксперимента

Fig. 14. Oscillogram of the received force during the experiment



Коэффициенты сцепления  $\varphi_x^{max}$  в продольном направлении и  $\varphi_y^{max}$  в поперечном направлении были определены по формулам соответственно:

$$\varphi_x^{max} = \frac{P_{крx}^{max}}{G}; \quad \varphi_y^{max} = \frac{P_{кpy}^{max}}{G}.$$

Коэффициент сопротивления движению определялся по следующей формуле:

$$f = \frac{P_{кр}}{G},$$

где  $G$  – вес испытуемого ТС;  $P_{кр}$  – усилие, требуемое для буксировки испытуемой машины, полученное после обработки результатов эксперимента.

Для экспериментального определения каждого параметра взаимодействия с опорным основанием было проведено по 10 измерений (по 5 измерений при буксировке в прямом и обратном направлениях для учета влияния возможного уклона опорного основания). На основе полученной выборки необходимо определить величину доверительного интервала. При проведении испытаний были приняты величина доверительной вероятности – 95% и допустимая ширина доверительного интервала, равная  $2S_x$ , где  $S_x$  – выборочное среднеквадратичное отклонение.

Для определения достаточного числа экспериментов и, учитывая принятую допустимую ширину доверительного интервала, определим необходимое число измерений  $n$ , которое можно определить из следующего выражения [15]:

$$n \geq \frac{t_{\alpha,m}^2 \cdot S_x^2}{\delta^2},$$

где  $S_x$  – выборочное среднеквадратичное отклонение;  $t_{\alpha,m}$  – коэффициент Стьюдента порядка  $P_t = 1 - \alpha/2$ ;  $P = 1 - \alpha$  – величина доверительной вероятности;  $m = 1 - n$  – число степеней свободы;  $\delta$  – половина ширины доверительного интервала, которая определяется выражением [15]:

$$\delta = \frac{t_{\alpha,m} \cdot S_x}{\sqrt{n}}.$$

На основе предварительной выборки проверяется выполняется ли необходимое число измерений для каждого параметра взаимодействия с опорным основанием. С учетом полученных результатов и с учетом принятых значений ширины доверительного интервала  $\delta = 0,016$  и доверительной вероятности  $P = 95\%$  необходимое число измерений будет равно  $n \geq 7$ , таким образом требование по необходимому числу измерений выполняется. Окончательно, коэффициент сцепления в продольном направлении на опорном основании типа «дернистый грунт» с учетом доверительного интервала будет равен  $\varphi_x^{max} = 0,75 \pm 0,016$ .

Аналогичным образом вычисляются остальные коэффициенты сопротивления движению и коэффициенты сцепления в продольном и поперечном направлении для ровной асфальтобетонной площадке и ровного грунтового основания типа «дернистый грунт» с учетом ширины доверительного интервала при заданной величине доверительной вероятности. Для трелевочного трактора ТБ-1 параметры взаимодействия на грунте были определены аналогичным образом, но при его буксировке использовался колесное трехосное шасси. Результаты определения параметров взаимодействия с опорным основанием приведены в табл. 4. Для каждой группы измерений было выполнено необходимое число измерений для доверительной вероятности  $P = 95\%$ . Допустимая ширина доверительного интервала не превышает значения  $2S_x$ .

### Верификация математической модели движения гусеничного поезда

Параметры взаимодействия с опорным основанием, которые были получены при проведении экспериментов на «дернистом грунте», использовались в имитационной математической модели гусеничного поезда при ее верификации. Исходные данные разработанной

математической модели движения гусеничного поезда [9] были уточнены с учетом геометрии и расположения шарнирных точек сцепки, полученных параметров взаимодействия с опорным основанием и технических характеристик тягача и прицепа.

Таблица 4.

## Результаты определения параметров взаимодействия с опорным основанием

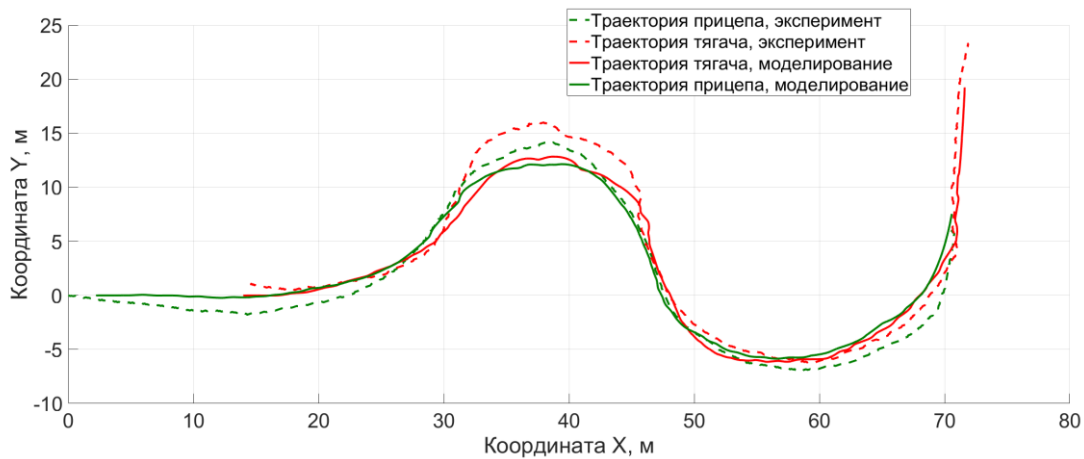
Table 4.

## Results of determination of parameters of interaction with the support base

	Асфальтобетонная площадка	«Дернистый грунт»
Коэффициент сопротивления движению (с подключенной трансмиссией) (макетный образец ГМ)	$f = 0,1 \pm 0,001$	$f = 0,124 \pm 0,028$
Коэффициент сцепления в продольном направлении (макетный образец ГМ)	$\varphi_x^{max} = 0,699 \pm 0,019$	$\varphi_x^{max} = 0,75 \pm 0,016$
Коэффициент сцепления в поперечном направлении (макетный образец ГМ)	$\varphi_y^{max} = 0,711 \pm 0,008$	$\varphi_y^{max} = 0,823 \pm 0,007$
Коэффициент сопротивления движению (с подключенной трансмиссией) (трелевочный трактор ТБ-1)	не проводилось	$f = 0,11 \pm 0,019$
Коэффициент сцепления в продольном направлении (трелевочный трактор ТБ-1)	не проводилось	$\varphi_x^{max} = 0,77 \pm 0,018$
Коэффициент сцепления в поперечном направлении (трелевочный трактор ТБ-1)	не проводилось	$\varphi_y^{max} = 0,79 \pm 0,021$

В результате выполнения маневра типа «змейка» при проведении экспериментальных исследований были получены осциллограммы записи частот вращения ведущих колес левого и правого бортов тягача, которые являлись входными (заданными) параметрами для проведения имитационного математического моделирования. При известных параметрах взаимодействия с опорным основанием модели взаимодействия активных участков гусеничного движителя с опорным основанием типа «дернистый грунт» и при известных (входных) частотах вращения ведущих колес были определены силовые факторы в сцепке по результатам математического моделирования движения гусеничного поезда. Кроме этого, в результате имитационного математического моделирования были определены зависимости следующих параметров от времени: частоты вращения входных валов бортовых редукторов левого и правого бортов прицепа, линейные скорости движения тягача и прицепа и траектории движения корпуса тягача и прицепа в местах, соответствующих расположению GPS-приемников. Для верификации математической модели движения гусеничного поезда сравним результаты, полученные при проведении эксперимента и моделировании. На рис. 15 представлены траектории движения тягача и прицепа при проведении эксперимента и по результатам математического моделирования. Максимальная величина отклонения траекторий, полученных при проведении эксперимента и по результатам математического моделирования, не превышает 1,82 м (для соответствующих моментов времени), что находится в рамках максимальной погрешности 1-2 м [16] при определении координат точек корпуса тягача и прицепа с помощью регистратора данных Racelogic Vbox и GPS-приемника.

Рассмотрим зависимости изменения частоты вращения ведущих колес прицепа, усилия в сцепке и линейной скорости движения тягача, полученные по результатам моделирования, и сравним эти зависимости с осциллограммами регистрации соответствующих параметров в процессе проведения эксперимента. На рис. 16 представлены результаты, полученные при проведении эксперимента и при проведении математического моделирования для следующих параметров: частота вращения ведущих колес прицепа (а), усилие в сцепке (б), линейная скорость движения тягача (в).



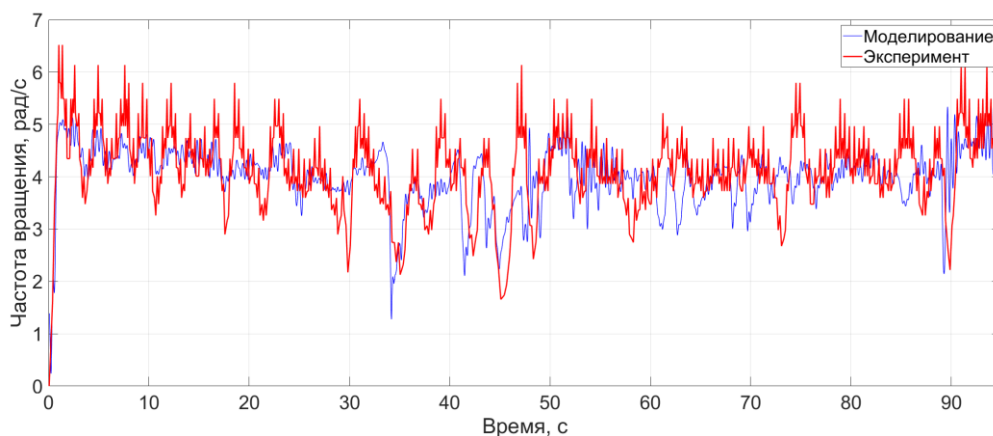
**Рис. 15. Сравнение траекторий движения, полученных при проведении эксперимента и по результатам математического моделирования**

**Fig. 15. Comparison of motion trajectories obtained during the experiment and as per the results of mathematical modeling**

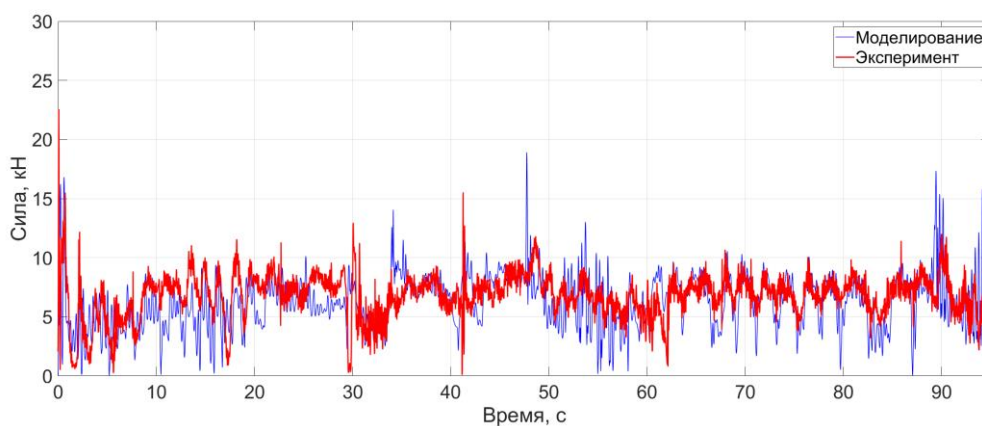
На рис. 16(а) представлен график изменения частоты вращения ведущих колес прицепа, полученный в результате эксперимента с учетом передаточного отношения бортового редуктора. График изменения частоты вращения ведущих колес прицепа носит ярко выраженный высокочастотный характер, что связано с малым количеством меток на один оборот входного вала бортового редуктора, используемых при измерении индукционным датчиком. Кроме этого, с учетом того, что движение гусеничного поезда происходит по криволинейной траектории типа «змейка», полученные результаты носят характер нестационарного процесса. Анализировать такой процесс путем вычисления средних по времени характеристик, как это делается в случае стационарных (эргодических) процессов приводит к сильно искаженным оценкам. Поэтому для оценки нестационарного среднего требуется проведение преобразования, эквивалентного фильтрации низких частот [17]. Такую операцию можно осуществить путем применения вейвлет-анализа [18]. Для вейвлет-фильтрации полученных значений воспользуемся вейвлет-преобразованием с использованием вейвлета Добеши 5-го порядка [19] (рис. 17). В результате максимальное (пиковое) значение относительного отклонения данных эксперимента и моделирования составляет 1,54 рад/с, а среднеквадратическое отклонение не превышает 0,11 рад/с на протяжении всего времени эксперимента, что не превышает погрешности 3 % относительно среднего значения угловой скорости ведущего колеса прицепа за время проведения эксперимента.

Аналогичным образом проанализируем результаты, приведенные на рис. 16(б). Максимальное (пиковое) значение относительного отклонения усилия в сцепке составляет 6 кН, а среднеквадратическое отклонение не превышает 0,65 кН на протяжении всего времени эксперимента, что не превышает погрешности 11% относительно среднего значения усилия в сцепке за время проведения эксперимента. Для линейной скорости (рис. 16(в)) максимальное (пиковое) относительного отклонения составляет 1,58 км/ч, а среднеквадратическое отклонение не превышает 0,24 км/ч, что не превышает погрешности 7 % относительно среднего значения линейной скорости движения тягача за время проведения эксперимента.

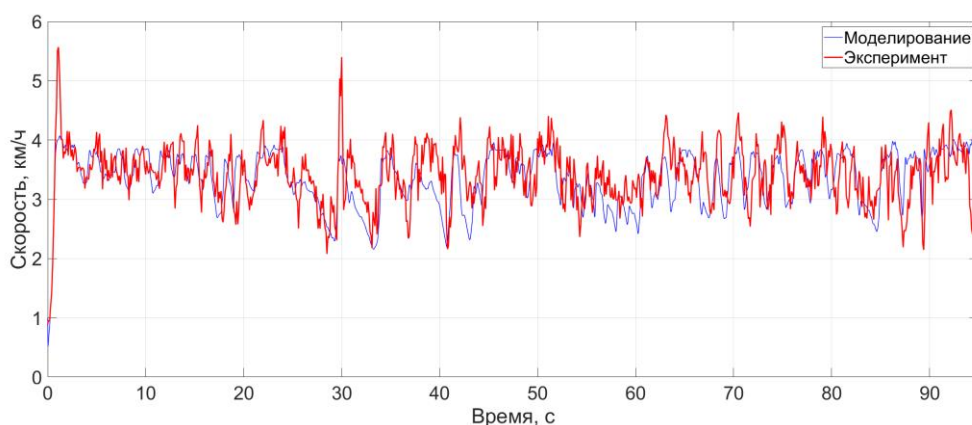
Таким образом, в результате сравнения полученных результатов и в силу небольших отклонений параметров, измеряемых в ходе эксперимента, и параметров, полученных по результатам имитационного математического моделирования, можно считать разработанную модель движения гусеничного поезда [9] верифицированной.



а)



б)



в)

**Рис. 16. Сравнение результатов, полученных при проведении эксперимента и при проведении математического моделирования:** а) – частота вращения ведущих колес прицепа; б) – усилие в сцепке; в) – линейная скорость движения тягача

**Fig. 16. Comparison of results obtained during the experiment and during mathematical modeling:** а) – revolutions per minute of the trailer driving wheels; б) – force in coupling; в) – linear speed of the tractor motion

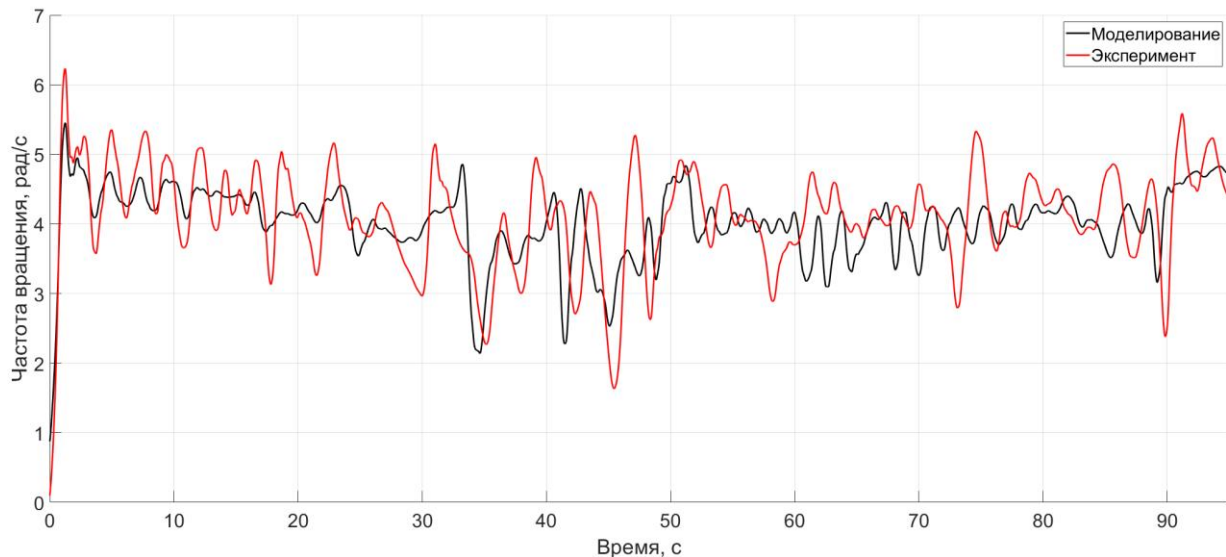


Рис. 17. Частота вращения ведущего колеса левого борта прицепа

Fig. 17. Revolutions per minute of the trailer left side drive wheel

### Заключение

Проведены экспериментальные исследования на двух опорных основаниях: на асфальтобетонном основании и на грунтовом опорном основании типа «дернистый грунт». Получены значения коэффициента сцепления  $\varphi_x^{max}$  в продольном направлении, значения коэффициента сцепления  $\varphi_y^{max}$  в поперечном направлении и коэффициента сопротивления движению ГМ  $f$  при движении на асфальтобетонном основании и на «дернистом грунте» с учетом принятого значения доверительной вероятности  $P = 95\%$  и допустимого значения ширины доверительного интервала, которая не превышает значения  $2S_x$ . Полученные параметры взаимодействия с опорным основанием были использованы в качестве исходных данных при проведении имитационного математического моделирования движения гусеничного поезда.

В результате сравнения данных, полученных при имитационном математическом моделировании движения гусеничного поезда, с результатами, полученными в ходе проведения экспериментальных исследований, была верифицирована математическая модель двухзвенного гусеничного поезда с пассивным прицепом.

### Библиографический список

1. **Рождественский, Ю.Л.** О формировании реакций при качении упругого колеса по недеформируемому основанию / Ю.Л. Рождественский, К.Ю. Машков // Труды МВТУ. 1982. № 390. С. 56-64.
2. **Эллис, Д.Р.** Управляемость автомобиля / Д.Р. Эллис. – М.: Машиностроение, 1975. – 216 с.
3. **Дик, А.Б.** Расчет стационарных и нестационарных характеристик тормозящего колеса при движении с уводом. Диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.03 / САДИ. Омск, 1988. – 224 с.
4. **Наумов, В.Н.** Оценка конструкций и компоновок военных гусеничных машин с помощью метода анализа иерархий: Учебное пособие / В.Н. Наумов, Ю.Л. Рождественский, В.Г. Брекалов. – М.: Изд-во НГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 64 с.
5. **Стадухин, А.А.** Научные методы определения рациональных параметров электромеханических трансмиссий высокоподвижных гусеничных машин. Диссертация ... доктора технических наук: 05.05.03. Москва, 2021. 317 с.
6. **Горелов, В.А.** Метод определения характеристик индивидуального тягового электропривода двухзвенной гусеничной машины на этапе проектирования / В.А. Горелов, Б.Б. Косицын, А.В. Мирошниченков и др. // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2019. № 3(126). С. 120-134.

7. **Котиев, Г.О.** Теоретические исследования подвижности быстроходных гусеничных машин с электротрансмиссиями Г.О. Котиев, Б.В. Падалкин, А.В. Мирошниченко [и др.] // Материалы международной научно-практической конференции: под редакцией И.А. Каляева, Ф.Л. Черноусько, В.М. Приходько. – 2018. С. 27-36.
8. **Марохин, С.М.** Прогнозирование характеристик подвижности спецавтомобиля, оснащенного системами активной безопасности. Диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.03. Москва, 2005. 147 с.
9. **Евсеев, К.Б.** Математическая модель движения гусеничного поезда для внедорожных контейнерных перевозок / К.Б. Евсеев // Тракторы и сельхозмашины. 2001. № 5.
10. **Исаков, П.П.** Теория и конструкция танка. Трансмиссии военных гусеничных машин / П.П. Исаков. Т. 5. М.: Машиностроение, 1985. – 367 с.
11. **Бекетов, С.А.** Теория управляемого движения гусеничных машин / С.А. Бекетов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 125 с.
12. **Фаробин, Я.Е.** Теория поворота транспортных машин / Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1970. – 176 с.
13. **Волков, А.А.** Изменение скорости движения в повороте быстроходной гусеничной маны на основе совершенствования алгоритмов управления движением. Диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.03. Круган, 2018. – 180 с.
14. **Шапкин, А.Н.** Методика оценки управляемости гусеничных машин / А.Н. Шапкин // Материалы 77-й международной научно-технической конференции ААИ «автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров». – 2012. С. 243-252.
15. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учебное пособие / Спирин Н. А., Лавров В. В., Зайнуллин Л. А. [и др.]; под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: ООО «УИНЦ», 2015. – 290 с.
16. RACELOGIC – Experts in positioning, data logging and video. – URL: <https://www.racelogic.co.uk/index.php/en/> (дата обращения: 15.11.2021).
17. **Бендат, Д.** Прикладной анализ случайных данных / Д. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
18. **Абдель, Р.** Исследование нестационарных динамических процессов при помощи вейвлет-анализа / Р. Абдель, А.В. Урожаев // Строительство: наука и образование. – 2012. № 4.
19. **Дремин, И.М.** Вейвлеты и их использование / И.М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. № 5. С. 465-501.

*Дата поступления*

*в редакцию: 24.11.2021*

УДК 629.33

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_114

## МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ СНЕГОХОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ

**Я.Ю. Левенков**ORCID: 0000-0001-6556-3232 e-mail: [lique87@mail.ru](mailto:lique87@mail.ru)Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
*Москва, Россия***И.В. Чичекин**ORCID: 0000-0001-7632-7657 e-mail: [hiv2@mail.ru](mailto:hiv2@mail.ru)Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
*Москва, Россия***Д.Р. Лебедев**ORCID: 0000-0002-7558-611X e-mail: [denis26788@mail.ru](mailto:denis26788@mail.ru)Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
*Москва, Россия*

Представлена методика создания несущей системы с использованием твердотельной динамической модели снегохода и с учетом условий эксплуатации, а также существующие технологии ее изготовления. Объектом исследования является снегоходная мототехника, предметом выступают методы оптимального проектирования силовых конструкций транспортных средств и их использование с учетом условий эксплуатации и технологии изготовления на предприятии. На примере утилитарного снегохода представлены основные этапы разработки силовой схемы и выбора параметров конструкции его несущей системы. Определены основные исходные данные, необходимые для разработки ее концепции, описан подход по выбору типа сечения труб. Для подтверждения предложенного подхода проведены проверочные расчеты. Методика позволяет разработать концепцию несущей системы снегохода на ранних стадиях проектирования, удовлетворяющую требованиям производства на предприятии.

**Ключевые слова:** расчет на прочность, оптимизация, снегоход, нагрузочные режимы, метод конечных элементов, нагрузки, несущая система, динамика твердых тел, виртуальный прототип, топологическая оптимизация.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Левенков, Я.Ю. Методика разработки несущей системы снегохода с использованием методов оптимизации конструкции / Я.Ю. Левенков, И.В. Чичекин, Д.Р. Лебедев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. №1. 114-124. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_114

## METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF A SNOWMOBILE UNDERCARRIAGE SYSTEM USING DESIGN OPTIMIZATION METHODS

**Y.Y. Levenkov**ORCID: 0000-0001-6556-3232 e-mail: [lique87@mail.ru](mailto:lique87@mail.ru)Bauman Moscow State Technical University  
*Moscow, Russia***I.V. Chichekin**ORCID: 0000-0001-7632-7657 e-mail: [hiv2@mail.ru](mailto:hiv2@mail.ru)Bauman Moscow State Technical University  
*Moscow, Russia*

**D.R. Lebedev**

ORCID: **0000-0002-7558-611X** e-mail: **denis26788@mail.ru**

Bauman Moscow State Technical University

*Moscow, Russia*

**Abstract.** Methodology of creating an undercarriage (load-bearing) system using a solid-state dynamic model of a snowmobile, taking into account the operation conditions and existing technologies for manufacture thereof, is presented. The object of study are snowmobile motor vehicles, the subject are the methods of optimal design of power structures of vehicles and their use, taking into account the operation conditions and manufacturing technology at the enterprise. Using the example of utilitarian snowmobile, main stages of power circuit development and the choice of structure parameters of its undercarriage, are presented. Basic initial data necessary for development of its concept are determined, an approach to choosing the type of pipe section is described. Verification calculations were carried out to confirm the proposed approach. Methodology makes it possible to develop a concept of a snowmobile undercarriage system at early stages of design that meets the requirements of production at the enterprise.

**Key words:** strength calculation, optimization, snowmobile, load conditions, finite element method, loads, undercarriage, dynamics of solids, virtual prototype, topological optimization.

**FOR CITATION:** Y.Y. Levenkov, I.V. Chichekin, D.R. Lebedev. Methodology for the development of a snowmobile undercarriage system using design optimization methods. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №1. Pp. 114-124. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_114

## Введение

Снегоходная мототехника является основным транспортным средством в заснеженных регионах: на северо-западе России, в Сибири, странах Северной Европы, Канаде и т. д. Она разработана для эксплуатации на снегу и льду и не требует специально подготовленных дорог. Для некоторых регионов снегоход является основным транспортным средством для перевозки людей и грузов. Известно, что уменьшение массы деталей снегохода значительно улучшает такие эксплуатационные характеристики, как плавность хода, средняя скорость движения, топливная экономичность, грузоподъемность и т.д. Высокий уровень конкуренции среди производителей снегоходной мототехники требует широкого использования современных методов проектирования, в том числе, при разработке силовых элементов конструкции. Среди них можно особо выделить несущие системы, поскольку устранение их неисправностей, возникших при эксплуатации, сопряжены с высокими материальными и временными затратами. Применение методов оптимизации конструкций позволяет создавать прочные, жесткие и легкие несущие системы транспортных средств. Но часто результаты, например, топологической оптимизации сложно интерпретировать в условиях конкретного производства. В итоге это может привести к изменению технологического процесса, что повысит стоимость конечного продукта и снизит его конкурентоспособности на рынке. Также в нашей стране необходимо иметь высокую ремонтпригодность конструкции. Максимальное использование стандартных изделий из классических материалов позволяет существенно снизить стоимость изделия. При применении метода топологической оптимизации конструкции необходимо четко представлять условия ее эксплуатации, т.к. величина и направление действия усилий в узлах модели существенно влияют на ее силовую схему [1-5]. Поэтому создание методики разработки концепции несущей системы с учетом условий эксплуатации и технологических возможностей предприятия является актуальной задачей.

В статье рассмотрено создание концепции передней части несущей системы на примере снегохода Тайга Патруль 551 с использованием стандартных профилей. Разработка конструкции тоннельной части не рассматривается в данной статье и взята с серийной модели. Для нее проведена параметрическая оптимизация для определения потребных толщин в различных зонах тоннеля. Предложенный метод позволяет проводить разработку концепции несущей системы в целом.



### Краткое описание методики

Разработанная методика включает в себя следующие основные этапы.

1. *Этап 1.* Формирование портрета эксплуатационных условий снегоходной мототехники. На этом этапе выполняется сбор данных об условиях эксплуатации, анализ этих данных, выделение типовых режимов и формирование списка нагрузочных режимов.

2. *Этап 2.* Разработка массовой сводки снегоходной мототехники с указанием массово-инерционных свойств, координат центра масс, габаритных размеров основных узлов и агрегатов. Для разрабатываемых элементов на ранних стадиях проектирования допускается использование этих параметров с прототипа. Далее необходимо определить основные точки передачи нагрузок. Также в качестве исходных данных может быть использована разработанная cad модель, которая экспортируется в программу расчета динамики твердых тел.

3. *Этап 3.* Разработка твердотельной динамической модели снегохода для определения нагрузок, действующих в узлах несущей системы. Разрабатываются модели основных системы снегохода, задаются характеристики двигателя и трансмиссии, рулевого управления, систем подрессоривания, определяются основные параметры контакта лыж и траков с опорной поверхностью. Параллельно идет разработка пространства проектирования для несущей системы и создание КЭМ для проведения топологической оптимизации. Формируются основные допущения, принимаемые при создании моделей.

4. *Этап 4.* Проведение расчетов и получение нагрузок, действующих в узлах несущей системы для выбранных расчетных режимов.

5. *Этап 5.* На этом этапе проводится обработка нагрузок, загрузка их в КЭМ пространства проектирования, проверка их адекватности [6, 7]. Например, наиболее общим критерием адекватности нагрузок для установившегося режима движения служит условие равенства нулю сумм сил и моментов относительно центра масс рассматриваемого тела. Также полученные нагрузки в каком-либо шарнире должны соответствовать его степеням свободы. Например, если в сферическом шарнире есть моменты, модель обрабатывает с ошибкой. Если полученные нагрузки не отвечают критериям адекватности, необходимо пересмотреть динамическую модель снегохода и проводить расчеты заново. В данной статье выбор критериев для оценки адекватности нагрузок подробно не рассматривается.

6. *Этап 6.* Проведение топологической оптимизации несущей системы транспортного средства и проведение первичной интерпретации результатов с учетом технологии производства несущей системы.

7. *Этап 7.* Проведение параметрической оптимизации.

8. *Этап 8.* Проверочный расчет несущей системы, проведение корректировок параметров элементов несущей системы при необходимости.

Этапы 6 и 7 могут быть выполнены несколько раз для уточнения параметров элементов несущей системы.

### Формирование портрета эксплуатационных условий снегохода

Список нагрузочных режимов для определения максимальных нагрузок, действующих на несущую систему снегоходной мототехники, сформирован, исходя из результатов совместной работы сотрудников кафедры «Колесные машины» и АО «Русская механика». По результатам исследования условий эксплуатации и экспериментальных данных было выделено более 50 расчетных режимов, из которых для проведения расчетов выбрано 12 типовых событий, возможных для представления в виде квазистатического нагружения (табл. 1). Данные расчетные режимы являются критическими для снегохода, за исключением случая «Статика: стоянка на месте с гравитацией  $1g$ ». Описание методики выбора расчетных режимов и определения основных режимов выходит за рамки данной статьи. Полные списки нагрузочных режимов для проектируемого снегохода являются интеллектуальной собственностью авторов и АО «Русская механика».

Таблица 1.

Список нагрузочных режимов для определения максимальных нагрузок, действующих на несущую систему снегоходной мототехники

Table 1.

List of load conditions for determining the maximum loads acting on the undercarriage of snowmobile motor vehicles

№	Режимы для статического расчета
1	Статика: стоянка на месте с гравитацией $1g$
2	Движение с максимальной тягой на гусенице
3	Торможение с максимальным замедлением $9 \text{ м/с}^2$
4	Движение на подъем в горку с углом подъема $45^\circ$
5	Движение на спуск с горы с углом спуска $45^\circ$
6	Буксировка с усилием на заднем крюке $F_{кр} = 5000\text{Н}$ вдоль продольной оси снегохода
7	Движение по косоугру с критическим углом крена по перевороту
8	Движение в повороте с минимальным радиусом $R = 20 \text{ м}$ и максимальной скоростью по условию отсутствия опрокидывания
9	Упор передних лыж в препятствие с одновременной максимальной тягой на гусеницах
10	Равномерная вертикальная перегрузка $3g$
11	Буксировка с усилием на переднем креплении $F_{кр} = 5000\text{Н}$ вдоль продольной оси снегохода
12	Буксировка с усилием на переднем креплении $F_{кр} = 5000\text{Н}$ под углом к продольной оси снегохода

### Краткое описание модели снегохода

Для определения нагрузок, действующих на несущую систему снегохода разработана его математическая модель в программе расчета динамики твердых тел [8-11]. Объектом исследования является снегоход Тайга Патруль 551.

При построении модели снегохода сделаны следующие допущения:

- все звенья механизма являются абсолютно жесткими, недеформируемыми телами;
- трение в шарнирах отсутствует;
- опорная поверхность является абсолютно твердой;
- контактное взаимодействие лыж, гусеничного движителя смоделировано с использованием контакта поверхность-поверхность;
- модель водителя и пассажира абсолютно жесткие, при моделировании не меняют своего положения;
- все жидкости в емкостях не меняют своего положения (эффект плескания жидкостей не учтен);
- груз задан графическим примитивом, имеющими массово инерционные характеристики как реального объекта.

В модели учтены двигатель и бесступенчатая трансмиссия с помощью подключаемого DLL файла. Более подробное описание модели снегохода приведено в статье [12]. Общий вид модели расчета динамики твердых тел с ее основными элементами показан на рис. 1.

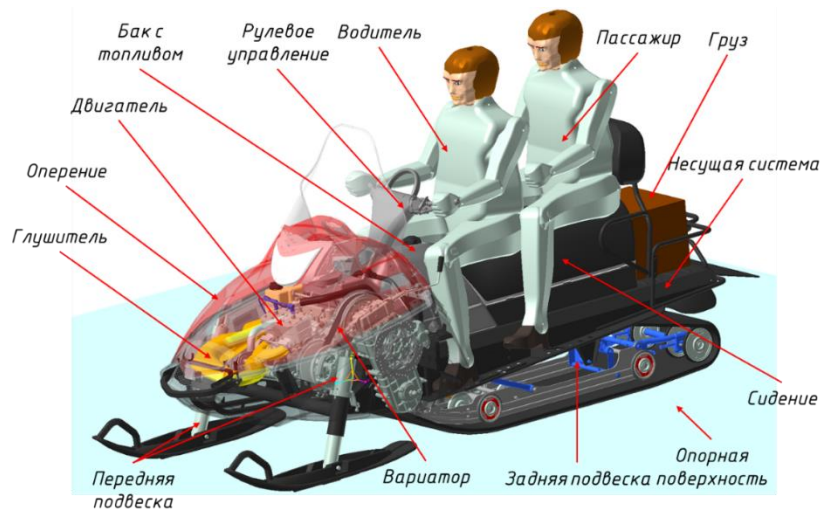


Рис. 1. Общий вид твердотельной динамической модели снегохода

Fig. 1. General view of a snowmobile solid-state dynamic model

### Формирование пространства проектирования

Условно несущая система снегохода разделена на две части: переднюю (до тоннеля) и заднюю (рис. 2). В задней части расположен гусеничный движитель, поэтому, исходя из обзора конструкций несущих систем, она выполнена в виде короба, защищающего водителя, пассажира и груз от грязи и снега, летящих из-за работы гусеницы. Поэтому принято оставлять топологию тоннеля без изменения, проводя лишь параметрическую оптимизацию для определения требуемой толщины в различных его местах.

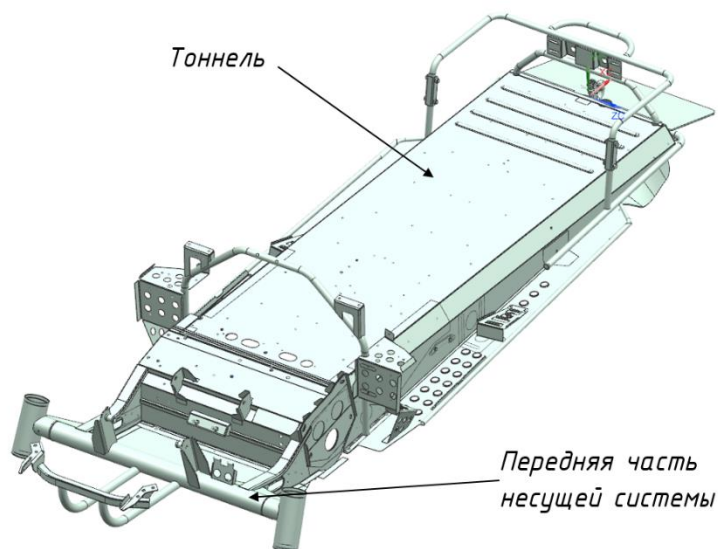


Рис. 2. Несущая система снегохода Тайга Патруль 551

Fig. 2. Undercarriage of Taiga Patrol 551 snowmobile

Для проведения топологической оптимизации конструкции передней части снегохода разработано пространство проектирования с учетом оперения, компоновки основных узлов и агрегатов. Также учтены зоны обметания движущихся частей элементов передней подвески и рулевого управления. Модель пространства проектирования показана на рис. 3.

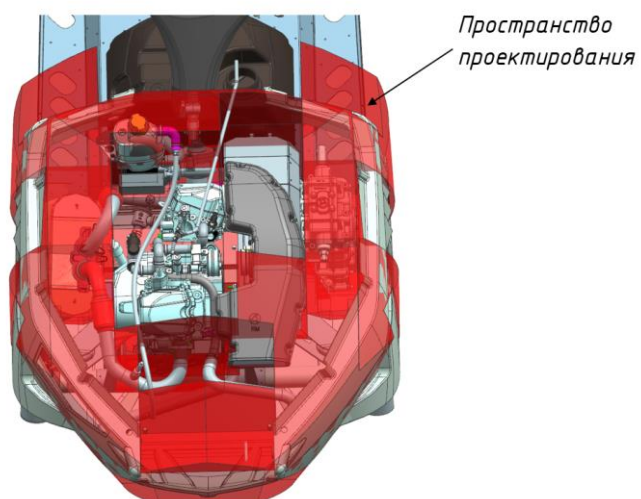


Рис. 3. Модель пространства проектирования

Fig. 3. Projective space model

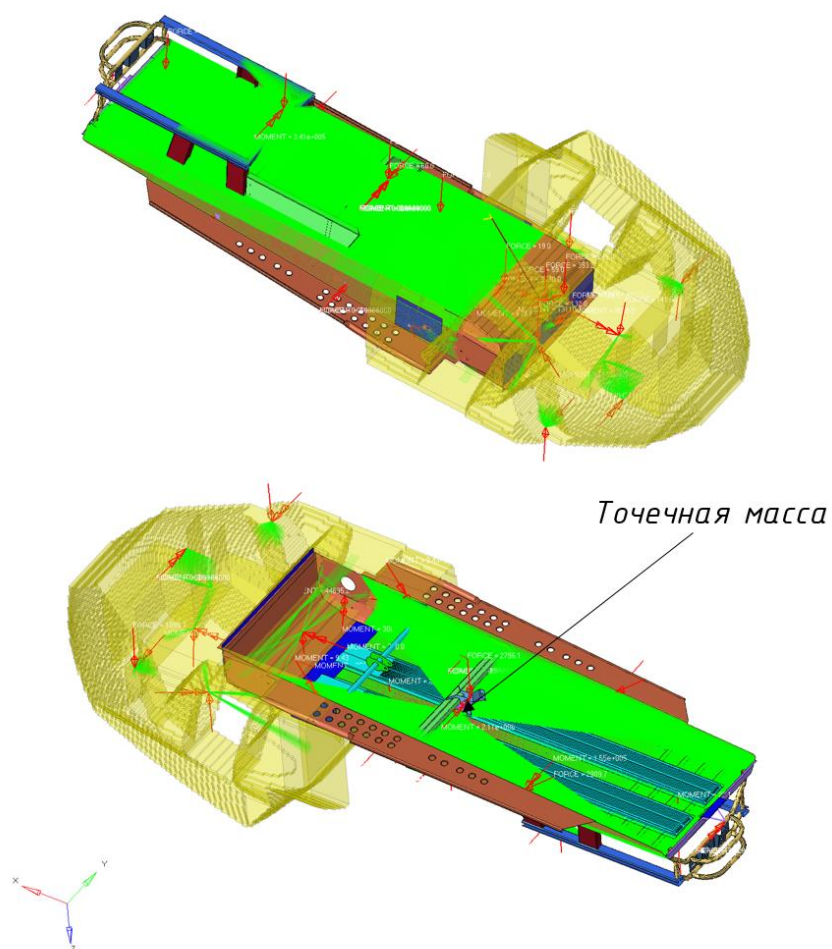


Рис. 4. КЭМ несущей системы снегохода для проведения оптимизации

Fig. 4. FEM of the snowmobile undercarriage system for conducting of optimization

Конечно-элементная модель пространства проектирования выполнена объемными восьмиузловыми конечными элементами. КЭМ тоннеля и его элементов выполнена с использованием оболочечных четырехузловых конечных элементов. Пространство проектирования передней части с КЭМ тоннеля соединено с помощью склеенного контакта. Нагрузки приложены к КЭМ пространства проектирования несущей системы снегохода через элементы типа RBE2 и RBE3. На рис. 4 показана КЭМ с нагрузками для расчетного случая «Статика: стоянка на месте с гравитацией  $1g$ ». Уравновешивание модели осуществляется с использованием метода *inertia relief*. Чтобы изменение массы модели в процессе оптимизации не влияло на ее уравновешивание в процессе расчета, плотность материалов пространства проектирования вместе с элементами тоннеля заданы равными нулю, а массово-инерционные характеристики несущей системы взяты со снегохода «Тайга Патруль 551», и смоделированы в виде точечной массы, приложенной в центре масс снегохода. Инерционная нагрузка от рамы распределена при помощи элемента RBE3 на узловые точки агрегатов, водителя, пассажира и груза.

### Топологическая оптимизация несущей системы и интерпретация результатов

В данном исследовании выполнена топологическая оптимизация передней части. Целевой функцией является минимум потенциальной энергии упругой деформации. В качестве ограничений выбраны: ограничение максимального относительного объема материала 0,15. Также задано условие симметрии для пространства проектирования. Хотя разработанное пространство проектирования не является симметричным, данное условие позволило исключить из рассмотрения несимметричные расчетные случаи. Под несимметричными расчетными случаями подразумеваются те, когда в «зеркальных» шарнирах левого и правого бортов действуют нагрузки различные по направлению и величине. Например, достаточно получить только нагрузки для поворота налево, а поворот направо будет учтен благодаря симметрии конструкции. Такой подход позволяет существенно сократить время на моделирование режимов в программе расчета динамики твердых тел и проведение оптимизационных расчетов.

В результате получена силовая схема, которая представлена в виде изоповерхностей равной плотности на рис. 5.

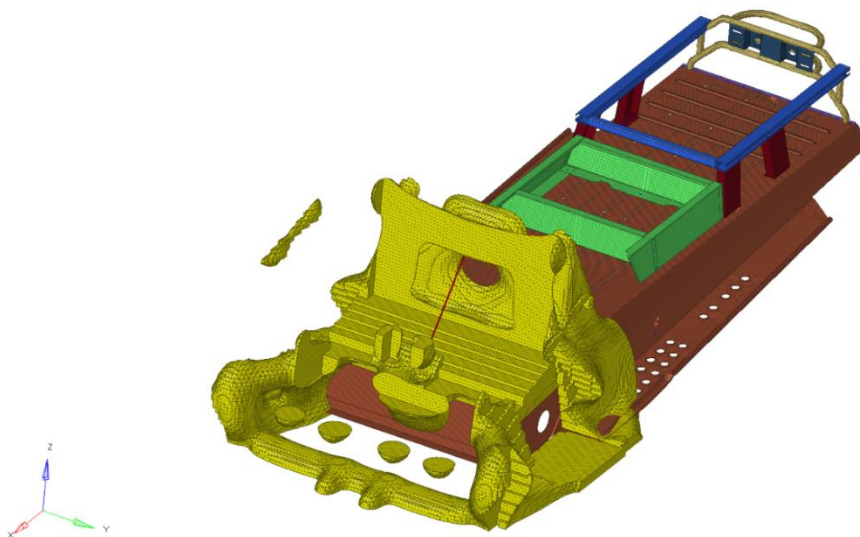


Рис. 5. Изоповерхности равной плотности

Fig. 5. Isosurfaces of equal density

Далее проведена первичная интерпретация результатов, где передняя часть снегохода смоделирована в виде балочных элементов круглого сечения (рис. 6). Было выбрано сечение 25x2 ГОСТ 18482-2018.

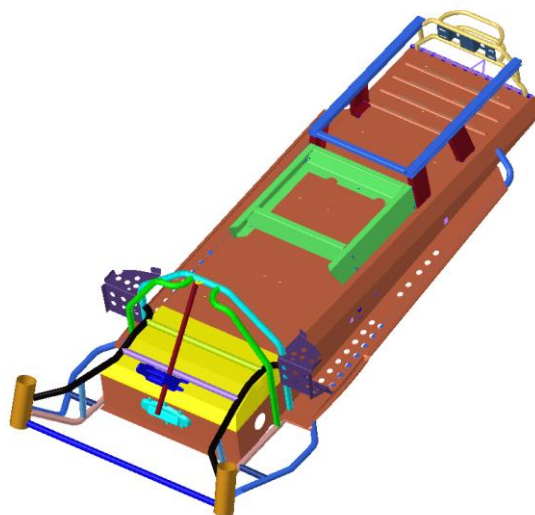


Рис. 6. Интерпретация результатов топологической оптимизации

Fig. 6. Interpretation of topological optimization results

### Параметрическая оптимизация несущей системы и интерпретация результатов

Параметрическая оптимизация выполнена совместно для передней части и тоннеля снегохода. Для передней части в качестве параметров варьирования выступили геометрические характеристики сечения, а для тоннеля – толщина стенок. В качестве целевой функции выбрана минимальный объем материала, в качестве ограничений – максимальные напряжения в конструкции. Для несущей системы снегохода был выбран материал АМг6. Свойства материала представлены в табл. 2.

Таблица 2.

#### Механические свойства материала АМг6

Table 2.

#### Mechanical properties of the AMg6 material

Марка сплава	Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_{02}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %
АМг6	315	145	15

В качестве максимальных допускаемых выбраны напряжения предела текучести  $\sigma_{02}$ . Из оптимизации исключены элементы в зонах переходов, стыковок балочных элементов и соединения оболочечных элементов балочными узел в узел, так как там наблюдаются локальные скачки напряжений. С учетом технологии и возможного снижения себестоимости производства несущей системы выбраны стандартные размеры профилей. Параметрическая оптимизация проведена для двух видов сечений: круглого и прямоугольного. Результаты оптимизации передней части представлены в табл. 3, 4 и 5. Схема расположения труб показана на рис. 7.



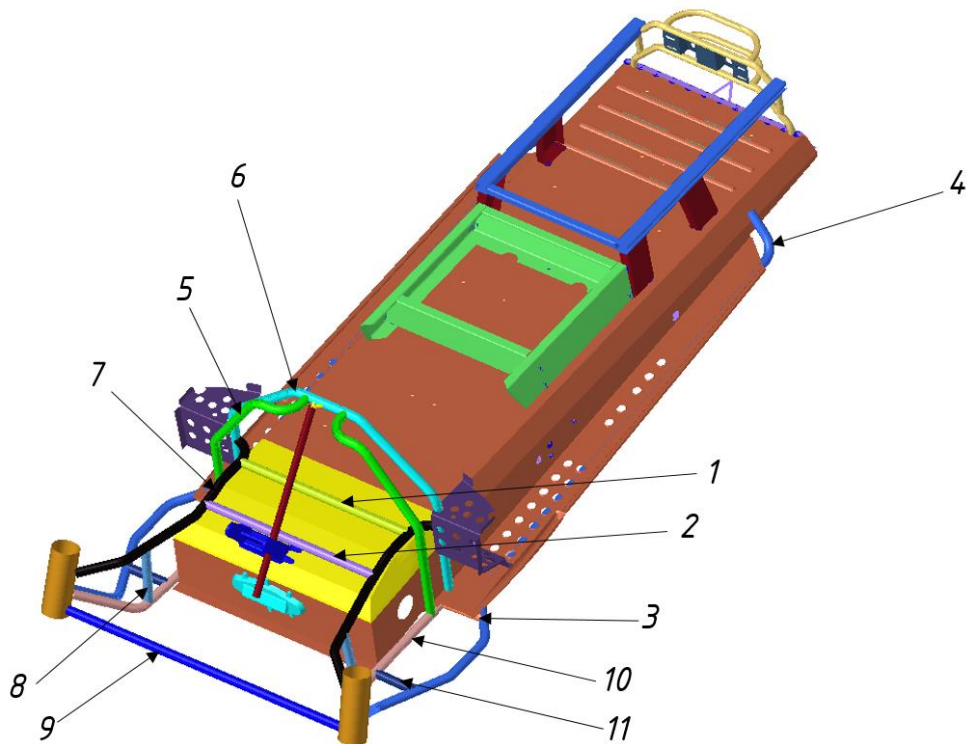


Рис. 7. Схема расположения труб

Fig. 7. Pipes layout

Параметры для труб круглого сечения

Parameters for round section pipes

Таблица 3.

Table 3.

Труба №	Диаметр D, мм	Толщина t, мм	Масса m, кг
1	23	1,5	0,14
2	22	1,5	0,14
3	24	1,5	0,07
4	26	1,5	1,37
5	23	1,5	0,41
6	25	1,5	0,44
7	45	15	5,1
8	38	10	1,0
9	35	10	1,89
10	48	15	7,32
11	29	5	0,27

Таблица 4.

## Параметры для труб прямоугольного сечения

Table 4.

## Parameters for rectangular section pipes

Труба №	Сторона a, мм	Сторона b, мм	Толщина t, мм	Масса m, кг
1	18	18	1	0,10
2	16	12	1	0,08
3	22	22	1,5	0,09
4	60	60	1,5	4,15
5	50	20	1,5	0,81
6	12	25	2	0,53
7	60	40	5	3,27
8	20	50	4	0,56
9	60	30	2,5	1,02
10	60	60	5	5,5
11	36	20	1,5	0,11

Таблица 5.

## Сравнение каркасов труб

Table 5.

## Comparison of pipe frames

Оценочные показатели	Исходное	Интерпретация
Масса трубчатого каркаса из круглой трубы, кг	5,23	18,15
Средние напряжения в силовом каркасе из круглой трубы, МПа	210	65
Максимальные напряжения в силовом каркасе из круглой трубы, МПа	458	100
Масса трубчатого каркаса из профильной трубы, кг	6,62	15,92
Средние напряжения в силовом каркасе из профильной трубы, МПа	190	70
Максимальные напряжения в силовом каркасе из профильной трубы, МПа	458	103
Масса несущей системы с трубчатым каркасом из круглой трубы, кг	35,00	47,92
Масса несущей системы с трубчатым каркасом из профильной трубы, кг	36,49	45,69

## Выводы

1. Предложена методика создания несущей системы снегоходной мототехники с учетом условий эксплуатации на ранних стадиях проектирования.

2. Сформирован и представлен типовой список нагрузочных режимов для расчета максимальных нагрузок действующих на несущую систему снегохода. Список нагрузочных режимов зависит от многих параметров и уточняется для каждого конкретного транспортного средства.

3. По итогам топологической оптимизации предложена силовая схема передней части снегохода.

4. С учетом результатов топологической оптимизации проведена совместная параметрическая оптимизация передней трубчатой части и задней листовой. Рассмотрено два виде се-



чения: круглое и прямоугольное. Наименьшей массой обладает несущая система с каркасом из труб прямоугольного сечения. Выбрав в качестве основного материала несущей системы алюминиевый сплав, удалось снизить массу несущей системы на 29,7 кг, что составляет 40 % от массы несущей системы снегохода-прототипа.

5. Необходимо разработать методику выбора рациональных видов сечений для несущей системы, позволяющей снизить массу и в то же время обеспечивающей требования прочности, жесткости и долговечности.

### Библиографический список

1. **Gebisa1, A.W.** A case study on topology optimized design for additive manufacturing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering / A W Gebisa1 and H G Lemu1 // Volume 276, First Conference of Computational Methods in Offshore Technology (COTech2017) 30 November to 1 December 2017, Stavanger, Norway Citation A W Gebisa and H G Lemu 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 276 012026.
2. **Changizi, Navid** Topology optimization of steel frame structures with constraints on overall and individual member instabilities / Navid Changizi, Mehdi Jalalpour // Finite Elements in Analysis and Design. Volume 141, 2018, P. 119-134.
3. **Wang, Yong** Topology Optimization in the Conceptual Design: Take the Frame of a Bender as Example / Yong Wang [et al.] // Advanced Materials Research, vol. 267, Trans Tech Publications, Ltd., June 2011, pp. 297–301. Crossref, doi:10.4028/www.scientific.net/amr.267.297.
4. Bai, You Dun Optimal Structural Design of Micro-Motion Stage with Stiffness Constraints Using Topology and Sizing Optimization Method / You Dun Bai [et al.] // Key Engineering Materials, vol. 679, Trans Tech Publications, Ltd., Feb. 2016, pp. 55-58.
5. **Song, Meng Meng** Topology Optimization and Analysis of Impact Test Platform Mechanism / Meng Meng Song [et al.] // Applied Mechanics and Materials, vol. 893, Trans Tech Publications, Ltd., July 2019, pp. 78–83. Crossref, doi:10.4028/www.scientific.net/amm.893.78.
6. Нагружение конечно-элементных моделей несущих систем колесных машин с применением метода inertia relief и твердотельной динамической модели автомобиля. Вдовин Д.С., Левенков Я.Ю., Чичекин И.В. // Технологии и компоненты интеллектуальных транспортных систем 2018. С. 620-640
7. **Vdovin, D.S.** Light frame design for quad bike using topology optimization / D.S. Vdovin, Y.Y. Levenkov, I.V. Chichekin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019.- Vol. 589, Issue 1.- Art.no 012026
8. **Ryan, R.R.** ADAMS // In Supplement to Vehicle System Dynamics. 1993. V. 22. P. 144-152.
9. **Dempsey, Mike** High fidelity multibody vehicle dynamics models for driver-in-the-loop simulators / Mike Dempsey, Garron Fish, Juan Gabriel Delgado Beltran // Proceedings of the 11th International Modelica Conference September 21-23, 2015, Versailles, France. P 273-280.
10. **Farid, M.L.** Fundamentals of multibody dynamics: theory and applications / M.L. Farid. Birkhauser, 2006.
11. **Bremer, H.** Elastic Multibody Dynamics / H. Bremer. - Springer Science+Business Media, B.V. 2008. 13. Kong Y.S., Abdullah S., Omar M.Z., Haris S.M. Side force analysis of suspension strut under various load cases/ Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering). 2016. T. 78. № 6. С. 85-90.
12. **Vdovin, D.S.** A multi-body dynamic model of the snowmobile to define acting loads in the its parts / D.S. Vdovin, Y.Y. Levenkov, I.V. Chichekin, A. Fominykh // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020. Vol. 963, Issue 1. Art.no 012011.

**Дата поступления  
в редакцию: 24.11.2021**

УДК 629.36

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_125

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ И ПОДВИЖНОСТИ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ С УЧЕТОМ ВЕСОВОЙ ЗНАЧИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК

**Л.Н. Мазунова**ORCID: 0000-0003-3262-8348 e-mail: [matematixx@mail.ru](mailto:matematixx@mail.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***В.В. Беляков**ORCID: 0000-0003-0203-9403 e-mail: [nauka@nntu.ru](mailto:nauka@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***В.С. Макаров**ORCID: 0000-0002-4423-5042 e-mail: [makvl2010@gmail.com](mailto:makvl2010@gmail.com)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***М.Е. Бушуева**ORCID: 0000-0002-0071-2417 e-mail: [bme@nntu.ru](mailto:bme@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***Л.Н. Ерофеева**ORCID: 0000-0001-6535-1459 e-mail: [erofeevaln@mail.ru](mailto:erofeevaln@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](mailto:anikin.zvm@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 имени Н.Э. Баумана  
*Москва, Россия*

Поставлена задача определения показателя качества транспортных средств, представляющего собой обобщенный критерий, отражающий конструкционные и эксплуатационные характеристики изделия. На основании двух методик проведена комплексная количественная оценка, интегрируемая из определенных эмпирических показателей, совокупность которых в полной мере описывает технический уровень транспортного средства. В основе данных методик лежит метод многокритериальной оптимизации. В качестве эмпирических критериев рассматриваются технические характеристики автомобилей, влияющие на мощность, динамичность, маневренность, проходимость, а также экономические параметры. В первом случае интегральный критерий состоит из равновесных частных критериев. Во втором методе эмпирические критерии агрегируются в пять групп, каждая из которых дает вклад в общую оценку с определенным коэффициентом весомости. При расчете вектора весовых коэффициентов был использован метод анализа иерархий, эффективность которого была неоднократно подтверждена при решении задач оценки объектов в различных отраслях, и широко применяемая

на практике формула Фишберна. Наилучшее приближение расчетных показателей к экспертным оценкам позволяет получить методика оценки, основанная на многокритериальной оптимизации с применением весовых коэффициентов для групп показателей.

**Ключевые слова:** подвижность по мобильности, оценка качества транспортного средства, экспертная оценка, оценка согласованности, показатель подвижности, многокритериальная оптимизация, векторный критерий, весовые коэффициенты, метод анализа иерархий, формула Фишберна.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Мазунова, Л.Н. Сравнительный анализ методов многокритериальной оценки конкурентоспособности и подвижности автотракторной техники с учетом весовой значимости характеристик / Л.Н. Мазунова, В.В. Беляков, В.С. Макаров, М.Е. Бушуева, Л.Н. Ерофеева, А.А. Аникин, В.Н. Наумов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. №1. 125-136. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_125

## COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS OF MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF COMPETITIVENESS AND MOBILITY OF AUTOMOTIVE EQUIPMENT, TAKING INTO ACCOUNT THE WEIGHT SIGNIFICANCE OF CHARACTERISTICS

**L.N. Mazunova**

ORCID: **0000-0003-3262-8348** e-mail: **matematixx@mail.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**V.V. Belyakov**

ORCID: **0000-0003-0203-9403** e-mail: **nauka@nntu.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**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**M.E. Bushueva**

ORCID: **0000-0002-0071-2417** e-mail: **bme@nntu.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**L.N. Erofeeva**

ORCID: **0000-0001-6535-1459** e-mail: **erofeevaln@mail.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**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*

**V.N. Naumov**

ORCID: **0000-0001-5172-0364** e-mail: **vn.naumov1941@yandex.ru**  
Bauman Moscow State Technical University  
*Moscow, Russia*

**Abstract.** The task of determination of the quality indicator of vehicles which is a generalized criterion reflecting the structural and operational characteristics of the product, is set. Based on two methods, a comprehensive quantitative assessment was carried out, integrated from certain empirical indicators, the totality of which fully describes the vehicle technical level. These techniques are based on the multi-criteria optimization method. As empirical criteria, the technical characteristics of vehicles that affect power, dynamism, maneuverability, cross-country ability, as well as economic parameters, are considered. In the first case, the integral criterion consists of equilibrium partial criteria. In the second method, empirical criteria are aggregated into five groups, each of which contributes to the overall assessment with a certain weighting coefficient. When calculating the vector of weighting coefficients, the hierarchy analysis method was used, the effectiveness of which was repeatedly confirmed when solving problems of evaluating objects in various industries, and the Fishburne formula widely used in practice. The best approximation of calculated indicators to expert assessments allows to obtain an evaluation methodology based on multi-criteria optimization using weighting coefficients for groups of indicators.

**Key words:** mobility by mobility, vehicle quality assessment, expert assessment, consistency assessment, mobility indicator, multi-criteria optimization, vector criterion, weighting coefficients, hierarchy analysis method, Fishburne formula.

**FOR CITATION:** L.N. Mazunova, V.V. Belyakov, V.S. Makarov, M.E. Bushueva, L.N. Erofeeva, A.A. Anikin, V.N. Naumov. Comparative analysis of methods of multi-criteria assessment of competitiveness and mobility of automotive equipment, taking into account the weight significance of characteristics. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №1. С. 125-136. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_125

## Введение

Оценка уровня продукции автомобилестроения является одной из главных задач управления конкурентоспособностью в отрасли; мерой ее уровня количественная оценка изделия. В свою очередь, оценка является показателем, отражающим существование и степень проявления того или иного свойства объекта. Благодаря им можно осуществить анализ, определить тенденции, изучить особенности того или иного явления. Чем точнее оценка, тем более вероятно правильное управленческое решение. Наиболее целесообразно рассматривать комплексную оценку, интегрируемую из определенных показателей, которые характеризуют ее относительную определенность, законченность, количественное выражение. Конструктивные особенности современных автомобилей, разнообразие их эксплуатационных свойств, различная степень приспособленности к режимам эксплуатации и разнообразие требований, предъявляемых потребителями, значительно усложняют задачу получения комплексного показателя. В настоящее время существуют и применяются различные методы оценки качества продукции, однако они не охватывают всех проблем данной области знаний. Зачастую не учитывают особенности конструкции и оценивают транспортное средство по показателям ликвидности его производства. Существуют отдельные критерии по некоторым эксплуатационным и нормативно техническим показателям. Очевидна потребность в разработке методики вычисления показателя качества, включающего в себя весь комплекс характеристик объекта, который будет оценивать преимущество рассматриваемого образца в данный момент времени над конкурентами в своем сегменте.

Качество должно оцениваться по некоторому множеству характеристик, сведенному к одному обобщающему показателю. При решении этой задачи возникает ряд трудностей. Во-первых, все характеристики объекта должны быть выражены количественно, вследствие чего при вычислении обобщенного показателя невозможно учесть все свойства объекта. Во-вторых, различные единицы измерения показателей должны быть приведены к безразмерному виду, например, нормировкой каждого показателя. В-третьих, следует учесть, что индивидуальные показатели качества объекта вносят в обобщающий показатель «неравномерный» вклад, т.е. требуется объективно оценить весовую значимость каждой характеристики. Кроме того, далеко не всегда увеличение количества показателей качества повышает объективность оценки, а трудоемкость ее обязательно возрастает. В связи с этим, рекомендуется в состав оценки вводить показатели, имеющие значительный вес с потребительской точки зрения. Затем из выбранного множества характеристик выделить несколько значимых групп та-

ким образом, чтобы внутригрупповые показатели не имели существенных преимуществ друг перед другом, т.е. могли быть признаны равноценными. Комплексные групповые оценки, образующие интегральный показатель, следует вводить с весовыми коэффициентами.

### Математическая постановка задачи оценки конкурентоспособности и подвижности автомобиля

Среди прочих свойств, которые могут описывать техническое состояние транспортного средства, особое место отводится подвижности. Основные теоретические положения, описывающие способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью как к условиям эксплуатации, так и к состоянию самой машины, т.е. подвижность, концептуально изложены в работах [1-7]. В свете этих положений подвижность является обобщающей характеристикой транспортно-технологических машин (ТТМ), описывающей их эксплуатационные свойства. Таким образом, показатель подвижности может служить показателем качества транспортного средства, а методика интегральной оценки эффективности эксплуатации автомобилей фактически можно свести к методике оценки их подвижности. Подвижность ( $\Pi$ ) машины может быть представлена в виде обобщенной функции двух аргументов  $\Pi = f(\text{ЭП}; \text{КП})$  (рис. 1).

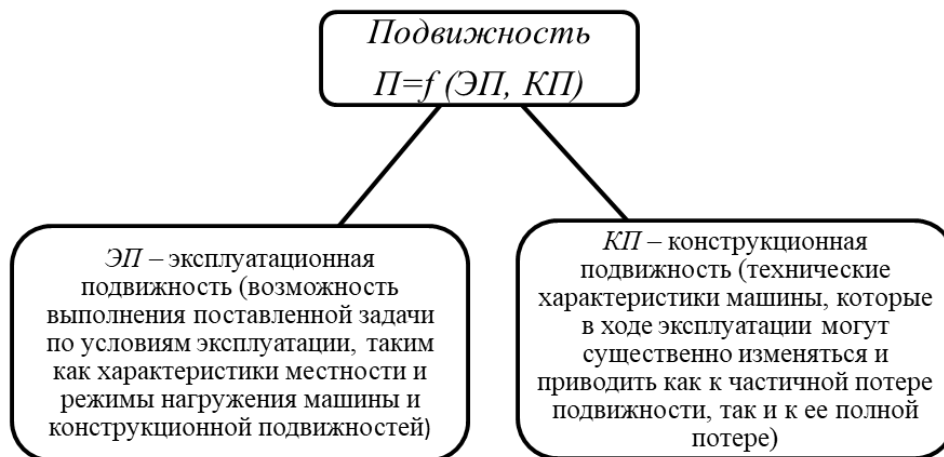


Рис. 1. Обобщенная функция подвижности

Fig. 1. Generalized mobility function

Оценку подвижности по мобильности предлагается выполнить по нескольким критериям, которые обеспечивают поддержание скорости движения и курсовой ориентации, устранение критических ситуаций.

Условие, обеспечивающее запас тягового усилия (1):

$$\Delta P_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } \Delta P_{\varphi} > 0. \quad (1)$$

Условия, отражающие баланс мощности (2):

$$W_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } W_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \lambda) \geq [W_f(\Phi_{\varphi}, \lambda) + \Delta W(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda)]. \quad (2)$$

Поддержание курсовой ориентации (управляемости и маневренности) (3):

$$\Phi_R(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } \lambda \equiv \xi(\lambda_k, \lambda_s, \lambda_p). \quad (3)$$

Подвижность по живучести определяется следующими условиями (4-5):

$$R_{он}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda, t) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } R_{он}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda, t) \geq R_{\eta}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda, t), \quad (4)$$

$$\Phi_{\varphi} \text{ при } R_{\varepsilon_n}(\Phi_{\text{ис}}, \lambda, t) \geq R_{\gamma}(\Phi_{\text{ис}}, \lambda, t), \quad (5)$$

где  $\lambda \equiv \xi(\lambda_k, \lambda_s, \lambda_p)$ ,  $\Delta W = W_{\text{эу}} - W_f$ , остальные параметры описаны в [6].

Полученная совокупность условий (2)-(5) с ограничениями эквивалента системе оптимизационных условий (6):

$$\Phi_{\varphi}(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}, \Phi_f(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}, v(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}, v(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}, \rho(\lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda}, R(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}. \quad (6)$$

### Краткий обзор методов, применяемых нахождения оценки конкурентоспособности автомобильной техники

Логично предположить, что невозможно адекватно сравнить несколько альтернативных вариантов по какому-либо единственному показателю. Кроме того, довольно редко показатели сравниваемых альтернатив можно представить в виде ранжированного ряда и вслед за этим получить рейтинговый список опытных образцов. Таким образом, для сравнения нескольких альтернативных решений требуется решать многокритериальные задачи, такие как (6), которые различными методами можно преобразовать в однокритериальные. От задачи векторной оптимизации по частным критериям переходят к специально сконструированной скалярной функции, где частные критерии уже являются аргументами этой функции. Свертывание или объединение векторного критерия может осуществляться аддитивным и мультипликативным образом, при этом оперируют как самими эмпирическими критериями, так и отношениями их к базовым показателям. Для свертки критериев также применяют графический метод «радара» или «профилей» [8]. Среди перечисленных методик стоит выделить последний подход, поскольку он является достаточно наглядным и простым в применении, позволяет получить оценку посредством объединения большого количества характеристик объекта. Однако и в нем присутствуют недостатки, главный из которых – равная значимость локальных критериев [9]. Возникает следующая задача: разработать метод, который позволил бы учитывать важность тех или иных показателей. Среди таковых к объективным, но не универсальным, можно отнести методы параметрических регрессионных зависимостей, предельных и номинальных значений, метод эквивалентных соотношений, а также субъективный экспертный метод определения значимости.

В работах [10, 11] рассматривается несколько групп методов расчета весовых коэффициентов локальных критериев в составе интегральных, здесь же проводится достаточно глубокий сравнительный анализ каждого подхода. На базе парного сравнения критериев существует несколько групп методов: на основе фиксированного, плавающего и экспоненциального предпочтения показателей друг над другом, а также с использованием формальных способов описания зависимости по принципу арифметической и геометрической прогрессии, метод Черчмена-Акоффа и базового критерия.

В условиях, когда необходимо определить веса анализируемых показателей при осуществлении оценки, широко применяется правило Фишберна. Согласно этому правилу, все эмпирические критерии  $Q_i$ ,  $i = \overline{1, n}$  следует записать в упорядоченный ряд по мере убывания их важности  $Q_1 > Q_2 > \dots > Q_n$  и задать уровень превосходства  $n$ , отражающий, на сколько наиболее важный критерий доминирует над наименее важным. В этом случае расчет весовых коэффициентов можно выполнить по формуле:

$$w_i = \frac{2(n - i + 1)}{n(n + 1)}, \quad i = \overline{1, n} \quad (7)$$

поскольку считается, что коэффициенты веса образуют убывающую арифметическую прогрессию.

Метод Фишберна также применим при частичном порядке ранжирования критериев и наличии информации относительно интервалов возможных значений коэффициентов. В этом случае применяются модифицированные формулы Фишберна. В работе [12] коэффициенты

весомости рассчитываются с использованием научно обоснованного метода анализа иерархий (МАИ) [13]. Данный подход базируется на иерархическом представлении целевой задачи, которая лежит в вершине структуры, а элементы, отражающие суть обобщенного критерия, являются составляющими уровней иерархии. Эта структура отражает понимание проблемы лицом, принимающим решение. Промежуточные звенья цепи – это критерии, выражающиеся как количественными, так и качественными характеристиками. Каждый элемент иерархии может представлять всевозможные аспекты решаемой задачи, причем во внимание могут быть приняты факторы различной природы (материальные и нематериальные).

Эффективность применения МАИ имеет доказанную практическую значимость, т.к. широко применяется в экономике при оценке качества различной продукции. Методика, основанная на попарном сопоставлении критериев, была также применена для оценки технического уровня полноприводных автомобилей многоцелевого назначения [14]. МАИ обеспечивает перевод качественной информации в количественную, для чего была разработана вербально-числовая шкала, в которой представлено соответствие степени предпочтения показателей друг над другом различным числовым характеристикам. Ценность метода заключается также в том, что подобной обработке могут подвергаться и комплексные групповые показатели. К недостаткам классического подхода можно отнести наличие субъективного экспертного сравнения при составлении матрицы попарных сравнений, посредством которой дальнейшем вычисляют сами весовые коэффициенты.

Далее производится проверка согласованности рассуждений, проводимых для полученных весовых коэффициентов. Под согласованностью подразумевается то, что при наличии основного массива необработанных данных все другие данные логически могут быть получены из них. Проверка основана на вычислении так называемого *отношения согласованности (ОС)* (8):

$$ОС = \frac{ИС}{СИ}, \quad (8)$$

где ИС – индекса согласованности, СИ – случайный индекс для матрицы того же порядка. Значение ОС, меньшее или равное 0,10, считают приемлемым.

### Вычисление обобщенного показателя конкурентоспособности

Данная работа является продолжением исследований, приведенных в [15], поэтому в краткой форме следует изложить основные полученные результаты.

Для решения задачи многокритериальной оптимизации (6) была построена скалярная функция  $F$ , которая является обобщенным критерием качества (9):

$$F(w, \tilde{Q}) = \sum_{i=1}^n w_i \tilde{Q}_i, \quad (9)$$

где  $\tilde{Q} = \{\tilde{Q}_1, \tilde{Q}_2, \dots, \tilde{Q}_n\}$  – вектор частных критериев,  $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  – весовые коэффициенты относительной важности частных критериев  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ .

Для оценки подвижности метод подробно описан в работах [16-19].

Предварительно значения частных критериев при помощи положительных линейных преобразований приводятся к единому безразмерному виду – шкале [0, 1].

Таблица 1.

Нормированные равновесные критерии и обобщенный векторный критерий  $F_1$  без учета весовых характеристик [15]

Table 1.

Normalized equilibrium criteria and generalized vector criteria  $F_1$  without taking into weighting characteristics [15]

Модель а/м	$\bar{Q}_1$	$\bar{Q}_2$	$\bar{Q}_3$	$\bar{Q}_4$	$\bar{Q}_5$	$\bar{Q}_6$	$\bar{Q}_7$	$\bar{Q}_8$	$\bar{Q}_9$	$F_1$	Ранжирование
Volkswagen Polo 1.6 MPI AT Exclusive 2020	0,03	0,10	0,08	0,76	0,14	0,25	1,00	0,37	0,39	0,377	<b>9</b>
Lada Vesta 1.6 CVT Exclusive 2019	0,03	0,10	0,09	0,63	0,09	0,00	1,00	0,45	0,31	0,315	<b>14</b>
Hyundai Solaris 1.6 AT Elegance 2020	0,03	0,10	0,13	0,74	0,23	0,28	1,00	0,28	0,31	0,370	<b>10</b>
Mitsubishi Eclipse Cross 1.5T CVT 4WD Ultimate 2020	0,19	0,07	0,24	0,60	0,20	0,31	0,92	0,50	0,03	0,343	<b>11</b>
Nissan Qashqai 2.0 CVT 4WD LE+ 2019	0,11	0,23	0,22	0,63	0,33	0,15	0,75	0,65	0,23	0,376	<b>8</b>
Toyota RAV4 Престиж 2,0 CVT 4WD M20A-FKS 2020	0,12	0,23	0,24	0,84	0,26	0,25	0,75	0,61	0,48	0,422	<b>6</b>
Kia Sportage Luxe+ 2,0 6AT 4WD, G4NA-5R	0,09	0,23	0,24	0,44	0,17	0,13	0,92	0,49	0,33	0,332	<b>12</b>
Audi Q7 3.0 55 TFSI quattro 2015	0,50	0,55	0,98	0,66	0,97	1,00	0,17	0,98	1,00	0,656	<b>1</b>
BMW X5 XDRIVE40D 2015	0,82	0,55	0,90	1,00	1,00	0,83	0,04	0,74	0,60	0,654	<b>3</b>
MERCEDES-BENZ GLE 350D 4MATIC 2015	0,80	0,55	0,64	0,97	0,83	0,69	0,42	0,67	0,66	0,630	<b>4</b>
RANGE ROVER SPORT SDV8 2015	1,00	1,00	1,00	0,35	0,86	0,50	0,29	0,78	0,82	0,636	<b>2</b>
VOLVO XC90 D5 AWD INSCRIPTION 2015	0,36	0,22	0,64	0,54	0,67	0,50	0,79	1,00	0,72	0,517	<b>5</b>
Kia Ceed 1.4T DCT Premium+ (08.2018 - 02.2020)	0,18	0,02	0,20	0,91	0,52	0,44	0,92	0,19	0,17	0,414	<b>7</b>
Mazda 3 2.0 Skyactiv-G 6AT Active	0,13	0,23	0,24	0,71	0,51	0,54	0,50	0,05	0,00	0,318	<b>13</b>

Для критериев, которые максимизируются, преобразование имеет вид (10):

$$\tilde{Q}_i = \frac{Q_i - Q_i^-}{R_i} (\beta - \alpha) + \alpha \tag{10}$$

и для критериев, которые минимизируются (11):

$$\tilde{Q}_i = \frac{Q_i^+ - Q_i}{R_i} (\beta - \alpha) + \alpha \tag{11}$$



при этом  $R_i = Q_i^+ - Q_i^-$  - размах критерия  $Q_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ .

С точки зрения подвижности наиболее конкурентоспособной будет машина с наибольшей величиной оценки (9).

Ранее проводилась оценка подвижности легковых автомобилей различных классов. В качестве эмпирических показателей рассматривались технические характеристики автомобилей, влияющих на мощность, динамичность, маневренность, проходимость. Компоненты вектора  $\bar{Q}$ :  $Q_1$  – максимальный крутящий момент (Н·м),  $Q_2$  – объем двигателя (см<sup>3</sup>),  $Q_3$  – мощность (л. с.),  $Q_4$  – расход топлива в городском цикле (л на 100 км),  $Q_5$  – время разгона до 100 км/ч (с),  $Q_6$  – максимальная скорость (км/ч),  $Q_7$  – радиус разворота (м),  $Q_8$  – клиренс (мм),  $Q_9$  – объем багажника (л). При этом для достижения оптимального значения векторного критерия (7) частные критерии  $Q_1 - Q_3, Q_6, Q_8, Q_9$  должны принимать максимальные значения, а  $Q_4, Q_5, Q_7$  – минимальные, т.е. они подвергаются нормировке соответствующим образом. Значения всех весовых коэффициентов в этом случае будут равны между собой. В табл.1 представлены характеристики моделей, которые были рассмотрены и оценены экспертами. Вычисление показателя подвижности и конкурентоспособности нескольких образцов автомобильной техники производилось по фиксированному количеству и эмпирических критериев. Автомобиль, для которого значение функции  $F_1$  наибольшее, считается обладателем наилучшего показателя подвижности среди рассматриваемых автомобилей. В соответствии с обобщенным показателем было произведено ранжирование рассматриваемых образцов.

Таблица 2.

**Групповые неравновесные критерии и обобщенные векторные критерии  $F_2$  и  $F_3$  с учетом весовых характеристик**

Table 2.

**Group non-weighted criteria and generalized vector criterion  $F_2$  and  $F_3$  according to weighting characteristics**

Средние групповые показатели	$\bar{G}_1$	$\bar{G}_2$	$\bar{G}_3$	$\bar{G}_4$	$\bar{G}_5$	$F_2$	$F_3$	Ранжирование
Весовые коэффициенты по МАИ [19]	0,1	0,329	0,192	0,315	0,064			
Весовые коэффициенты по формуле Фишберна	0,133	0,333	0,200	0,267	0,067			
Volkswagen Polo 1.6 MPI AT Exclusive 2020	0,67	0,00	0,46	0,64	0,24	0,373	0,369	<b>8</b>
Lada Vesta 1.6 CVT Exclusive 2019	0,66	0,01	0,27	0,43	0,20	0,269	0,272	<b>13</b>
Hyundai Solaris 1.6 AT Elegance 2020	0,61	0,03	0,45	0,59	0,19	0,355	0,351	<b>10</b>
Mitsubishi Eclipse Cross 1.5T CVT 4WD Ultimate 2020	0,64	0,17	0,44	0,39	0,04	0,327	0,334	<b>12</b>
Nissan Qashqai 2.0 CVT 4WD LE+ 2019	0,75	0,12	0,34	0,43	0,22	0,329	0,337	<b>11</b>
Toyota RAV4 Престиж 2,0 CVT 4WD M20A-FKS 2020	0,67	0,13	0,38	0,75	0,34	0,441	0,431	<b>7</b>
Kia Sportage Luxe+ 2,0 6AT 4WD, G4NA-5R	0,63	0,12	0,33	0,14	0,27	0,228	0,246	<b>14</b>
Audi Q7 3.0 55 TFSI quattro 2015	0,49	0,73	0,78	0,48	0,77	0,638	0,643	<b>3</b>
BMW X5 XDRIVE40D 2015	0,44	0,85	0,66	1,00	0,57	0,802	0,779	<b>1</b>
MERCEDES-BENZ GLE 350D 4MATIC 2015	0,43	0,70	0,65	0,95	0,60	0,737	0,715	<b>2</b>
RANGE ROVER SPORT SDV8 2015	0,47	1,00	0,53	0,00	0,91	0,536	0,563	<b>4</b>
VOLVO XC90 D5 AWD INSCRIPTION 2015	0,51	0,47	0,63	0,30	0,46	0,449	0,460	<b>6</b>
Kia Ceed 1.4T DCT Premium+ (08.2018 - 02.2020)	0,50	0,14	0,58	0,86	0,08	0,485	0,465	<b>5</b>
Mazda 3 2.0 Skyactiv-G 6AT Active	0,33	0,14	0,52	0,55	0,11	0,357	0,347	<b>9</b>

Во втором варианте показатель конкурентоспособности вычисляется учетом коэффициентов весомости, для этого все оценочные параметры распределены на пять групп: размерные  $G_1$  ( $Q_8, Q_{10}$ ), силовые  $G_2$  ( $Q_1, Q_3$ ), динамические  $G_3$  ( $Q_5, Q_6, Q_7$ ), экономические  $G_4$  ( $Q_4$ ), комплектационные  $G_5$  ( $Q_9, Q_2$ ). Расчет показателя  $F_2$  производился с применением весовых коэффициентов, определенных методом анализа иерархий в работе [20]. Дополнительно проведена проверка согласованности рассуждений при нахождении весовых коэффициентов на основании оценки согласованности:  $ИС=0,088$ ;  $ОС=0,078$ , что считается приемлемым значением. При вычислении показателя  $F_3$  учет значимости групповых критериев основывался на формуле Фишберна (7). При этом предпочтительность групповых критериев выглядит следующим образом:  $G_2 > G_4 > G_3 > G_1 > G_5$ .

Внутри группы каждый комплексный показатель  $\tilde{G}_i, i = \overline{1,5}$  рассчитывается как среднее арифметическое входящих в нее показателей (табл. 2).

Таким образом, показатели конкурентоспособности рассматриваемых автомобилей, вычисленные с учетом взвешенных групповых технических характеристик, выстраивают образцы в абсолютно одинаково ранжированные ряды. Сравнивая результаты методик вычисления показателя качества (рис. 2), можно наблюдать для каждой исследуемой единицы незначительные отклонения значений обобщенного критерия.



Рис. 2. Сравнение показателей качества  $F_1, F_2$  и  $F_3$

Fig. 2. Comparison of quality indicators  $F_1, F_2$  и  $F_3$

Таблица 3.

## Сравнение расчетных и экспертных оценок

Table 3.

## Comparison of calculations and expert estimates

Модель а/м	Рейтинг по показателю F1 (без учета весовых коэффициентов)	Рейтинг по показателям F2 и F3 (с учетом весовых коэффициентов)	Рейтинг экспертов	Субъективная балльная оценка экспертов по группам автомобилей	Источник
Volkswagen Polo 1.6 MPI AT Exclusive 2020	1	1	1	8,6	Журнал «За рулем», 2020 [21]
Lada Vesta 1.6 CVT Exclusive 2019	3	3	2	8,5	
Hyundai Solaris 1.6 AT Elegance 2020	2	2	3	8,2	
Nissan Qashqai 2.0 CVT 4WD LE+ 2019	1	1	1	734	Колеса.ру, 2018 [22]
Mitsubishi Eclipse Cross 1.5T CVT 4WD Ultimate 2020	2	2	2	270	
Toyota RAV4 Престиж 2,0 CVT 4WD M20A-FKS 2020	1	1	1	844	Колеса.ру, 2020 [23]
Kia Sportage Luxe+ 2,0 6AT 4WD, G4NA-5R	2	2	2	686	
BMW X5 XDRIVE40D 2015	3	1	1	44	Автомобили.ру, 2016 [24]
MERCEDES-BENZ GLE 350D 4MATIC 2015	4	2	2	43	
RANGE ROVER SPORT SDV8 2015	2	4	3	42	
Audi Q7 3.0 55 TFSI quattro 2015	1	3	3	42	
VOLVO XC90 D5 AWD INSCRIPTION 2015	5	5	4	39	
Kia Ceed 1.4T DCT Premium+ (08.2018 - 02.2020)	1	1	1	636	Колеса.ру, 2019 [25]
Mazda 3 2.0 Skyactiv-G 6AT Active	2	2	2	506	

В табл. 3 представлены результаты сравнения рейтингов экспертов [21-25] и рейтингов, составленных на основании сравнения интегральных показателей, вычисленных по различным методикам. Методика расчета показателя качества с учетом весовых коэффициентов даёт максимально приближенный к экспертному мнению результат, что подтверждает ее объективность и практическую применимость.

## Выводы

При проведении исследования было рассмотрено два метода вычисления интегрального показателя качества. В первом случае обобщенный критерий аккумулировался из равновесных частных критериев. Такая оценка конкурентоспособности приближает к экспертным значениям. Вторая методика оценки уровня качества сравниваемых образцов базируется на первоначальном расчете групповых комплексных показателей качества, объединенных общим признаком, и дальнейшем объединении в обобщенный критерий с учетом коэффициентов весомости групп.

Вектор весовых коэффициентов был найден двумя различными вариациями метода анализа иерархий, который состоит в декомпозиции задачи оценивания на более простые составные части и дальнейшей последовательной обработкой экспертных мнений по парным сравнениям. В первом случае для получения числовых значений применялась вербально-числовая шкала, во втором случае использовалась аналитическая зависимость показателей важности критериев. Проверка экспертных оценок на непротиворечивость осуществляется посредством сравнения индекса согласованности со значением случайной согласованности.

На основании технических характеристик автомобилей, влияющих на мощность, динамичность, маневренность, проходимость были вычислены показатели качества для ряда транспортных средств по двум представленным методикам. Сравнительный анализ показал, что ранжирование автомобилей по всем показателям дает приблизительно один и тот же результат. Однако методика вычисления с применением весовых коэффициентов для групп эмпирических критериев позволяет получить наиболее точное приближение расчётных значений к экспертным оценкам. При этом нахождение весовых коэффициентов методом Фишберна вносит значительный вклад в повышение объективности оценок.

### Библиографический список

1. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Е.Ю. Гольшев // НГТУ, Н. Новгород, 2002 Деп. в ВИНТИ 10.01.02. №28-В 2002.
2. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, Е.Ю. Гольшев // Проблемы качества и эксплуатации автотракторных средств: материалы II международной научно-технической конференции (21-23 мая 2002 г.) / ПГАСА. – Пенза, 2002. Ч. 1. С. 23-31.
3. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, Е.Ю. Гольшев // Колесные машины: сб. тр. / МГТУ им Н.Э. Баумана. – М., 2003. С. 29-30.
4. **Беляков, В.В.** Подвижность и конкурентоспособность транспортно-технологических машин / В.В. Беляков // Известия Академии инженерных наук РФ им. акад. А.М. Прохорова. Транспортно-технологические машины и комплексы / под ред. Ю.В. Гуляева. – Москва – Н. Новгород: НГТУ, 2003. Т. 5 С. 3-25.
5. **Беляков, В.В.** Оценка подвижности транспортно-технологических систем // «АВТО-НН-2000» (27-29 июня 2000 г): материалы международной научно-технической конференции НГТУ. – Н. Новгород, 2000. С. 339-357.
6. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, М.Е. Бушуева // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3 (100). С. 145-174.
7. **Беляков, В.В.** Решение задачи оценки подвижности автотракторной техники с помощью многокритериальной оптимизации / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.И. Сагунов // «Информационные системы и технологии» (ИСТ-2001): тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 65-летию факультета информационных систем и технологий НГТУ Н. Новгород 20 апреля 2001 г. / НГТУ. – Н. Новгород, 2001. С. 167-168.
8. **Фасхиев, Х.А.** Анализ методов оценки качества и конкурентоспособности грузовых автомобилей / Х.А. Фасхиев // Методы менеджмента качества. 2001. № 3. С. 24-28; № 4. С. 21-26.
9. **Фасхиев, Х.А.** Определение весомости показателей качества автомобилей и их компонентов / Х.А. Фасхиев // Грузовик. 2008. № 5. С.23-27.
10. **Постников, В.М.** Выбор весовых коэффициентов локальных критериев на основе принципа арифметической прогрессии / В. М. Постников, С. Б. Спиридонов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 9. С. 237-249.
11. **Постников, В.М.** Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев / В.М. Постников, С.Б. Спиридонов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 6. С. 267-287.
12. **Фасхиев, Х.А.** Интеллектуальная поддержка ранжирования объектов по конкурентоспособности // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2014. Т. 18. № 3(64). С. 210-224.

13. **Саати, Т.** Принятие решения. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1989. – 316 с.
14. **Плиев, И.А.** Оценка технического уровня семейства автомобилей многоцелевого назначения на основе метода анализа иерархий / И.А. Плиев // Журнал автомобильных инженеров. 2010 №3 (62), №5 (64).
15. **Мазунова, Л.Н.** Разработка методики вычисления показателя подвижности по мобильности легковых автомобилей, основанной на применении многокритериальной оптимизации / Л.Н. Мазунова, М.А. Дубкова, В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 2(133). С. 102-112.
16. **Беляков, В.В.** Многокритериальная оптимизация в задачах подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем: учеб. пособие / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.И. Сагунов / НГТУ. – Н. Новгород, 2001. – 271 с.
17. **Беляков, В.В.** Многокритериальная оценка подвижности автотракторной техники / В.В. Беляков // ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2001: тр. международной научно-технической конференции, 27-29 июня 2001 г. / СПбГТУ. – СПб., 2001 С. 95-99.
18. **Беляков, В.В.** Четыре многокритериальных задачи для оценки подвижности автотракторной техники / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.И. Сагунов // Системы обработки информации и управления: межвуз. сб. науч. тр. / НГТУ. – Н. Новгород, 2001. Вып. 8. С. 106-113.
19. **Барахтанов, Л.В.** Автоматические и интеллектуальные системы транспортных средств: учебник / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, А.Н. Блохин / Н. Новгород, 2012. – 475 с.
20. **Фасхиев, Х.А.** Методика оценки качества автомобилей / Х.А. Фасхиев, А.В. Крахмалева // Экономическое возрождение России. 2006. № 2(8). С. 57-62.
21. Автомобильный журнал «За рулем» // [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://www.zr.ru/content/articles/926446-za-chto-platim>.
22. Автомобильный журнал «Колеса» // [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://www.kolesa.ru/test-drive/dva-i-poltora-sravnitelnyj-test-mitsubishi-eclipse-cross-i-nissan-qashqai>.
23. Автомобильный журнал «Колеса» // [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://yandex.ru/turbo/kolesa.ru/s/test-drive/gryaznye-bryuki-infernalnye-zvuki-sravnitelnyy-test-toyota-rav4-i-kia-sportage>.
24. Автомобильный журнал «Автомобили ру» // [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://automobili.ru/tests/group/an-ostrich-race/>
25. Автомобильный журнал «Колеса» // [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <https://www.kolesa.ru/test-drive/ottenki-serosti-i-put-gedonista-sravnitelnyu-test-drayv-kia-ceed-i-mazda-3>

*Дата поступления  
в редакцию: 29.11.2021*

УДК 629.36

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_137

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ПОЛОСЫ ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ****Д.М. Порубов**ORCID: 0000-0002-4873-6557 e-mail: [dmitry.porubov@nntu.ru](mailto:dmitry.porubov@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***А.А. Родин**ORCID: 0000-0002-6159-6077 e-mail: [xmrrarro@gmail.com](mailto:xmrrarro@gmail.com)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***А.В. Пинчин**ORCID: 0000-0002-1602-6315 e-mail: [pinchinav96@gmail.com](mailto:pinchinav96@gmail.com)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***Д.Н. Зарубин**ORCID: 0000-0002-0092-3011 e-mail: [hatpkdzt@mail.ru](mailto:hatpkdzt@mail.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***А.В. Тумасов**ORCID: 0000-0002-3766-4615 e-mail: [anton.tumasov@nntu.ru](mailto:anton.tumasov@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, 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***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*

Рассматриваются результаты испытаний LDWS – системы предупреждения о выезде с полосы движения, основанной на распознавании разметки с помощью нейронных сетей даже в сложных дорожных условиях. Данная система разработана в НГТУ им. Р.Е. Алексеева для использования на транспортных средствах легкого коммерческого класса группы ГАЗ (ГАЗель). Приведены основные шаги алгоритма системы, а также проведен сравнительный анализ испытаний в двух разных регионах: Нижегородской области и Ханты-Мансийском автономном округе. Сделаны выводы о работе системы в разных дорожных и погодных условиях данных регионов.

**Ключевые слова:** система помощи водителю, выход из полосы движения, легкие коммерческие автомобили, сравнительные испытания, регионы России.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Порубов, Д.М. Экспериментальные исследования системы контроля полосы движения на основе нейронных сетей / Д.М. Порубов, А.А. Родин, А.В. Пинчин, Д.Н. Зарубин, А.В. Тумасов, В.Ф. Кулепов, Л.Н. Орлов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. №1. 137-147. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_137

## **EXPERIMENTAL STUDIES OF TRAFFIC LANE CONTROL SYSTEM BASED ON NEURAL NETWORKS**

**D.M. Porubov**

ORCID: **0000-0002-4873-6557** e-mail: **dmitry.porubov@nntu.ru**

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

**A.A. Rodin**

ORCID: **0000-0002-6159-6077** e-mail: **xmrrarro@gmail.com**

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

**A.V. Pinchin**

ORCID: **0000-0002-1602-6315** e-mail: **pinchinav96@gmail.com**

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

**D.N. Zarubin**

ORCID: **0000-0002-0092-3011** e-mail: **hatpkdzt@mail.ru**

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

**A.V. Tumasov**

ORCID: **0000-0002-3766-4615** e-mail: **anton.tumasov@nntu.ru**

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

**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*

**Abstract.** Results of testing of LDWS – a lane departure warning system based on the recognition of markings using neural networks, even in difficult road conditions, are considered. This system was developed at the R.E. Alekseev NNSTU for use in light commercial vehicles of the GAZ group (GAZelle). The main steps of the system algorithm are given, as well as a comparative analysis of tests in two different regions is carried out: Nizhny Novgorod Region and Khanty-Mansi Autonomous Okrug. Conclusions are drawn about the system operation in different road and weather conditions of these regions.

**Key words:** driver assistance system, lane departure, light commercial vehicles, comparative tests, regions of Russia.

**FOR CITATION:** D.M. Porubov, A.A. Rodin, A.V. Pinchin, D.N. Zarubin, A.V. Tumasov, V.F. Kulepov, L.N. Orlov. Experimental studies of traffic lane control system based on neural networks. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №1. С. 137-147. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_137

## Введение

Большинство дорожно-транспортных происшествий, ставших сегодня одной из самых серьезных социальных проблем, происходит по неосторожности водителя. В связи с этим много работ посвящено исследованию способов разработки системы помощи водителю для повышения безопасности вождения [1, 2]. Общество автомобильных инженеров (SAE) определяет 6 уровней автоматизации вождения в диапазоне от 0 (полностью ручное управление) до 5 (полностью автономное) [3]. Большая часть систем помощи водителю, устанавливаемая на современные автомобили заводами изготовителями, относится ко второму уровню по классификации SAE. При этом транспортное средство способно влиять на рулевое управление, а также управлять ускорением и/или замедлением транспортного средства. Например, системы помощи водителю компании BMW [4], Mercedes, Toyota [5] соответствуют уровню 2 и позволяют оценить дорожную разметку, следить за впередиидущим транспортным средством и т.д.

За последнее десятилетие большое количество исследований в области интеллектуальных транспортных систем было посвящено теме предупреждения о выезде с полосы движения (LDWS, Lane Departure Warning System). Значительная часть несчастных случаев со смертельным исходом на шоссе каждый год связана с выездом за пределы полосы движения транспортных средств. Многие производители автомобилей разрабатывают передовые системы помощи водителю, помогающие предотвратить непреднамеренный выезд за пределы полосы движения. Последовательный подход этих систем состоит в том, чтобы предупредить водителя о непреднамеренном выезде за пределы полосы движения. Для прогнозирования возможного съезда с полосы движения система технического зрения, установленная на транспортном средстве, обнаруживает разметку полос на дороге и определяет ориентацию и положение транспортного средства по отношению к обнаруженным линиям полосы движения. Несмотря на широкую распространенность, данные системы несовершенны и расположены к сбоям в различных дорожных условиях. Сбои подобных систем в сложных дорожных условиях могут приводить к ДТП. Для повышения надежности таких систем, при их разработке необходимо постоянно проводить комплекс дорожных испытаний как в специально подготовленных, так и в реальных дорожных условиях различных географических областей, в которых предполагается эксплуатация данных систем. В Российской Федерации общая протяженность дорог с твердым покрытием составляет более 984 000 км, а качество дорожной разметки может меняться в зависимости от региона. Поэтому для оценки качества работы подобных систем в наиболее полном спектре дорожных условий (в частности, качества дорожной разметки и погодных условий), а также их совершенствования, полевые испытания нельзя ограничивать одним географическим регионом.

Данная статья имеет своей целью продемонстрировать сравнение результатов испытаний на дорогах общего пользования системы помощи водителю, разработанной командой инженеров НГТУ им. Р.Е. Алексеева в двух разных субъектах РФ: Нижегородская область и Ханты-Мансийский автономный округ – Югра (ХМАО). В качестве объекта испытаний выступает портативная система предупреждения о непреднамеренном сходе с полосы движения, работающая в реальном времени и обладающая такими свойствами, как низкая стоимость, простота установки и хорошая совместимость с различными транспортными средствами легкого коммерческого класса.



## Разработка системы LDWS

Ранее коллективом авторов была разработана система LDWS [6]. Новое решение проведено в рамках создания второго прототипа детектора данной системы. Она состоит из двух модулей: модуля оценки и модуля предупреждения (принятия решения). В первом модуле оценивается геометрия дороги, включая кривизну и положение транспортного средства относительно полосы на дороге, что имеет решающее значение для обнаружения съезда с полосы движения. Модуль предупреждения принимает решение о подаче звукового сигнала предупреждения, используя информацию из сенсорных данных и модуля оценки. Для системы предупреждения о выезде с полосы движения определены два критерия эффективности: частота ложных срабатываний и время срабатывания предупреждения. Вычислитель разработанной системы установлен в салоне транспортного средства легкого коммерческого класса группы ГАЗ (ГАЗель NEXT). Видеокамера системы LDWS установлена за ветровым стеклом и направлена вперед вдоль направления движения транспортного средства.

В первом прототипе системы LDWS использовались подходы технического зрения для распознавания дорожной разметки. При этом использование подхода на основе технического зрения обладает как рядом преимуществ, таких как понятность и простота реализации; высокая производительность работы всей системы; низкие требования к вычислительным мощностям, так и рядом недостатков: сбой при резких перепадах освещения; сбой при наличии бликующих поверхностей в солнечную погоду. Более подробно недостатки описаны в работе [7]. Данные недостатки могут приводить к некорректной работе всей системе в ряде следующих дорожных ситуаций: нечеткие линии дорожной разметки (перекрытие линий, истертость линий, загрязненность линий, линии слабо контрастируют с дорожным полотном); сильная нагрузка задней оси ТС; резкая смена освещения (въезд/выезд из тоннеля); наличие нескольких полос движения; быстрое изменение ограничительных линий разметки; перекрытие линий дорожной разметки другими ТС; крутые повороты; повреждение или загрязнение ветрового стекла в непосредственной близости к сенсору. Соответственно, для распознавания дорожной разметки был использован более эффективный алгоритм на основе нейросетевого подхода, который решает основные проблемы, описанные в работах [6, 7].

При таком подходе:

- 1) найденная разметка обрезается регионом интереса, параметры которого задаются в конфигурационном файле системы LDWS; это делается для того, чтобы дальнейшее применение линейной регрессии к изображению было подвержено меньшему количеству зашумления;
- 2) найденные линии сортируются слева направо;
- 3) к найденной разметке применяется линейная регрессия, чтобы разбросанные по кадру точки вытянуть в одну линию.

В итоге граничные координаты линии публикуются в специальном ros-сообщении. Дальнейший цикл работы состоит из следующих ключевых методов (которые также используются и для распознавания дорожной разметки на основе методов технического зрения): фильтрация линий по углу наклона; объединение близких линий в группы (кластера); усреднение параметров прямых по кластерам; перевод линий в bird's eye view формат; фильтрация многообъектным фильтром частиц; принятие решения о подаче уведомления. В основе текущего решения лежит открытая нейронная сеть Point Instance Network (PINet) [8]. Предложенный метод основан на подходе оценки ключевых точек и мгновенной сегментации. PINet включает несколько сложенных нейронных сетей, которые обучаются одновременно. Поэтому, размер обученных моделей можно выбрать в соответствии с имеющейся вычислительной мощностью. PINet можно обучить независимо от количества полос движения. Также данная сеть обеспечивает конкурентоспособную точность и минимизацию количества ложных срабатываний.

В ходе выполнения проекта по разработке LDWS PINet претерпела некоторые изменения на этапе постобработки, но сама архитектура не менялась. Данная сеть изначально тренировалась на наборе данных TuSimple [9] - популярном общедоступном наборе данных для обнаружения полос движения. В качестве структуры данных и их разметки была взята структура TuSimple. Для обучения и работы нейросетевого детектора требуется определенный список ключевых параметров, который описан ниже.

Общие параметры:

- ширина изображения, которое будет подаваться на вход сети;
- высота изображения, которое будет подаваться на вход сети;
- флаг, отвечающий за использование режима вычислений с половинной точностью (FP16);
- доверительный интервал для всех точек дорожной разметки, которые выдает нейронная сеть.

Параметры, которые используются при обучении сети перечислены ниже:

- шаг корректировки весов;
- параметр для оптимизатора;
- количество эпох обучения;
- параметр в интервале (0, 1), который указывает, как часто во время обучения на эпохе будет осуществляться валидация модели (расчет метрик Accuracy/FP/FN на валидационной выборке) (0.1 означает 10 раз за эпоху);
- размер батча для тренировки;
- количество процессов, которые работают параллельно при формировании входных данных для сети;
- список разбиений тренировочных данных, которые будут использоваться.

Решение о лучших весах принимается на основе валидационной выборки. Для бенчмаркинга сети используются следующие параметры:

- размер батча для бенчмаркинга;
- количество процессов, которые работают параллельно при формировании входных данных для сети;
- список разбиений тестовых данных, которые будут использоваться.

Параметры нормализации данных:

- среднее значение по каждому из каналов, необходимое для нормализации изображений;
- стандартное отклонение по каждому из каналов, необходимое для нормализации изображений;

При обучении нейросети использовалась так называемая аугментация данных - метод, используемый для увеличения объема данных путем добавления слегка измененных копий существующих или вновь созданных синтетических данных из существующих данных. Он действует как регуляризатор и помогает уменьшить переобучение при обучении нейросети.

Ниже, на рис. 1 приведена демонстрация описанных аугментаций. Для разметки данных использовался специальный инструмент от OpenVINO: CVAT [10].

При выполнении аугментации данных к исходному изображению добавлялись эффекты, имитирующие различные дорожные условия. В частности, к исходному изображению добавлялись эффекты:

- случайного сдвига вниз/вверх, влево/вправо;
- случайного поворота вокруг центра кадра;
- случайного зашумления в виде белого шума;
- случайного размытия в виде так называемого Motion Blur;
- случайного размытия в виде Гауссовского размытия;
- случайного изменения яркости и контраста;
- имитации падающей тени;

- имитации идущего дождя;
- имитации заснеженной дороги;
- имитации солнечной вспышки;
- случайного отражения по горизонтали.



**Рис. 1. Аугментация данных для обучения нейронной сети путем добавления на видеокادر специальных эффектов, имитирующих различные дорожные условия**

**Fig. 1. Augmentation of data for a neural network training by adding to a video frame special effects simulating different road conditions**

Набор данных TuSimple, на которых нейросеть проходит первичное обучение, не является достаточным для использования системы на дорогах общего пользования в различных дорожных условиях. Процент отказа системы будет очень велик на данном этапе. В связи с этим, для проверки внедренных решений, а также для дальнейшего обучения нейросети необходимо провести масштабные испытания разработанной системы на дорогах общего пользования, увеличивая спектр дорожных условий, что и было реализовано. Сравнительный анализ результатов испытаний приведен ниже.

### **Испытания**

Испытания проводились на участках дорог Нижегородской области, а также в ХМАО. Испытания на дорогах общего пользования осуществлялись в разное время суток и в различных погодных условиях (в период весна-лето-осень 2021 г.) Для сверки с нормативной базой как на этапе разработке, так и на этапе тестирования системы LDWS был выбран стандарт ISO 17361 [11], применяемый к подобным системам. При проведении испытаний регистрировались способности системы распознавать разметку, позиционировать ТС внутри полосы движения, а также подавать предупреждающий сигнал в регламентированный стандартами интервал времени.

Приведем в качестве примера испытаний определение линий разметки на дорожном полотне. Согласно соответствующему пункту программы и методики испытаний системы LDWS транспортное средство плавно разгоняется до скорости 65 км/ч. Далее осуществляет-

ся движение по измерительному участку с нанесенной дорожной разметкой с поддержанием заданной скорости до тех пор, пока система LDWS не перейдет в активный режим работы, распознав дорожную разметку. При условии сохранения предписанной скорости ТС движется по центру полосы движения с приближением к линиям разметки, но без их пересечения (рис. 2). Испытания на дорогах Нижегородской области и в ХМАО отличались как по погодным условиям, так по качеству дорожной разметки. На дорожном полотне выбранной территории в ХМАО присутствовала дорожная разметка, разделяющая встречное и попутное движение, которая на некоторых участках (рис. 3) была частично стерта. Аналогичные испытания проводились в темное время суток (рис. 4, 5).

При проведении апробации на дорогах общего пользования в условиях средней полосы и северных районов РФ разработанная система LDWS показала стабильные результаты распознавая как хорошо отличимую, так и частично стертую дорожную разметку в светлое (рис. 2,3) и темное (рис. 4,5) время суток.

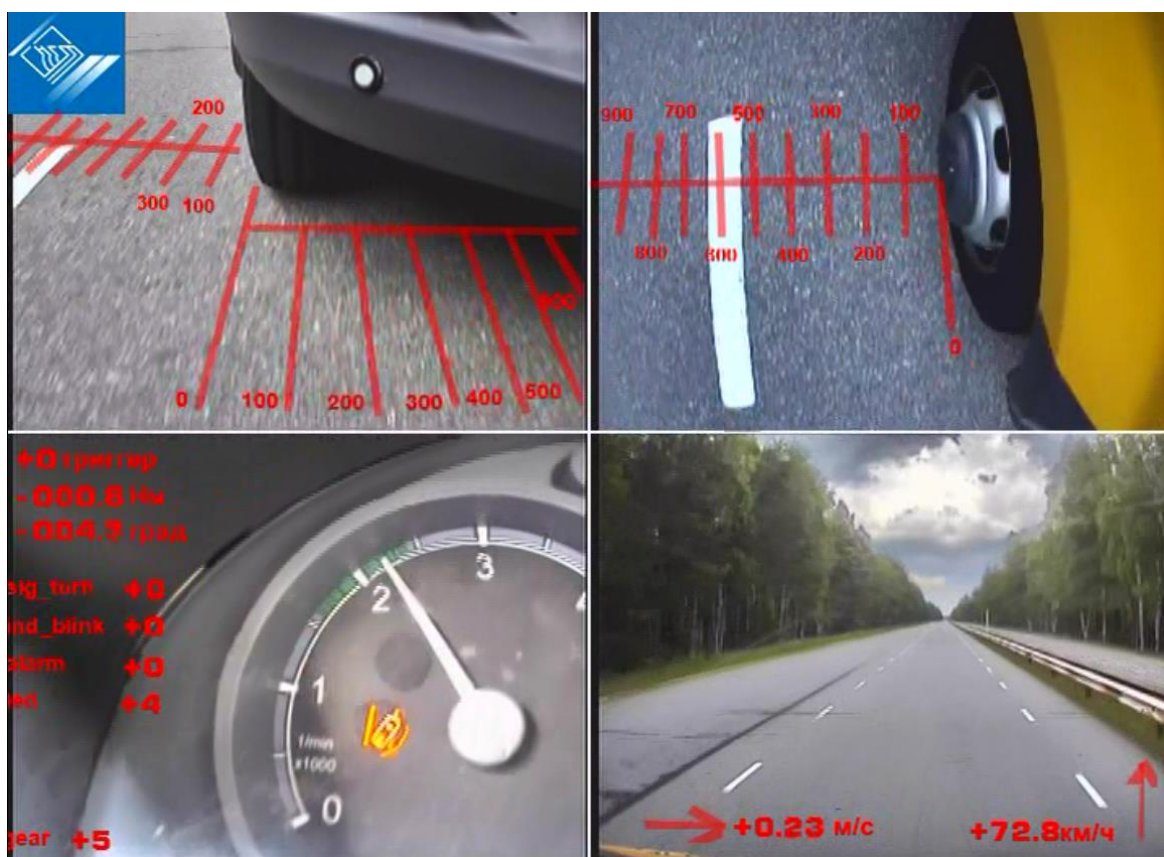


Рис. 2. Движение ТС внутри полосы движения (испытания в Нижегородской области).  
Правая сторона ТС находится у границы полосы движения,  
система LDWS находится в активном режиме

Fig. 2. Vehicle movement inside the traffic lane (tests in Nizhny Novgorod region).  
The vehicle right side is located at the lane border, LDWS system is in active mode



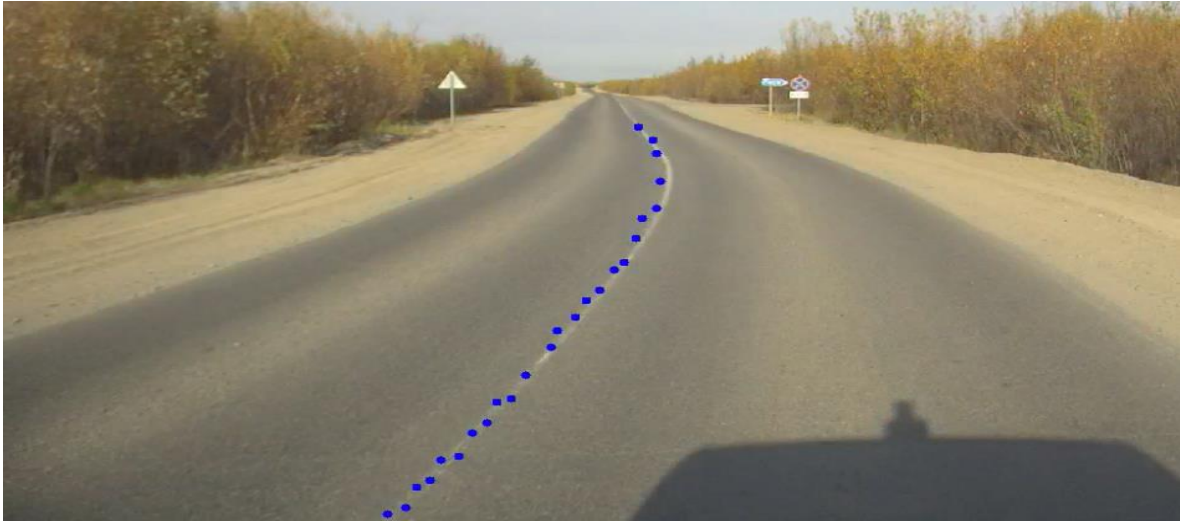


Рис. 3. Испытания в светлое время суток при сухой погоде с частично стертой дорожной разметкой. Синими точками обозначена распознанная дорожная разметка

Fig. 3. Tests at daylight hours in dry weather with partially erased road markings. Blue dots indicate the recognized road markings

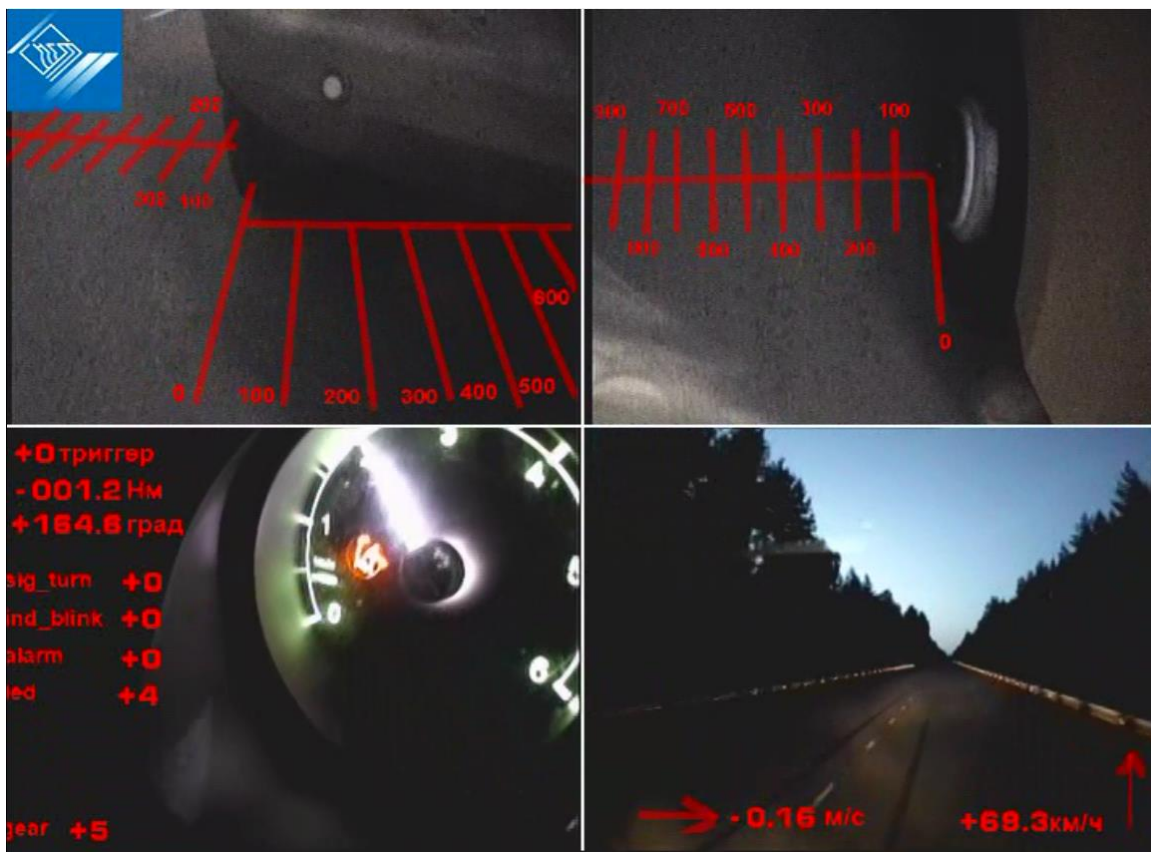


Рис. 4. LDWS в активном режиме работы в темное время суток. Прерывистая линия дорожной разметки слева от ПТ2

Fig. 4. LDWS is in active operation mode at darkness hours. Broken line of road markings to the left of the PT2 vehicle



**Рис. 5. Испытания в темное время суток при сухой погоде с частично стертой дорожной разметкой. Синими точками обозначена распознанная дорожная разметка**

**Fig. 5. Tests at dark hours in dry weather with partially erased road markings. Blue dots indicate the recognized road markings**

Сравнение результатов испытаний, проведенных в двух различных субъектах РФ, приведено в табл. 1.

*Таблица 1.*

**Сравнение результатов эффективности работы системы LDWS при проведении испытаний в Нижегородской области (НО) и ХМАО**

*Table 1.*

**Comparison of LDWS system overall performance results when conducting tests in Nizhny Novgorod region (NNR) and KhMAO**

Название испытания	Эффективность работы, %	
	НО	ХМАО
Испытание определения линий разметки полосы движения, положения ТС в полосе движения	100	100
Испытания на отсутствие линий разметки полосы движения	100	100
Испытания согласно стандарту ISO 17361: уведомление водителя о выходе из полосы движения	97.8	97.6
Испытание на предупреждение о выходе из полосы движения при криволинейном движении	98	97.8
Проверка отсутствия срабатывания предупреждения при включении запроса на подавление срабатывания предупреждения - сигнала указателя направления поворота	100	100
Испытание на выявление ложных срабатываний системы	96,4	96,7
Испытание на удержание пассивного режима после отключения указателей направления поворота	100	100

Эффективность системы во всех испытаниях составила более 96 % для обоих регионов, в которых проводились испытания. Разница в эффективности работы системы между двумя испытательными районами не превышает 0,5 %, что говорит об устойчивости работы применяемых алгоритмов в разных дорожных и погодных условиях. Проведение испытаний

позволило отработать все аспекты поведения системы в реальных условиях. Были выявлены и устранены все обнаруженные недочеты, которые были пропущены в процессе разработки и тестирования в виртуальной среде.

Разработанная система предупреждения о непреднамеренном выходе из полосы движения апробирована широким спектром тестов, включающих полевые испытания на специальном полигоне, а также испытания на дорогах общего пользования в Нижегородской области, а также в северных районах РФ.

### Выводы

Приведены результаты испытаний системы предупреждения о непреднамеренном выходе из полосы движения, разработанной командой инженеров НГТУ им. Р.Е. Алексеева, в реальных дорожных условиях двух субъектов Российской Федерации: Нижегородская область и ХМАО. Структура разрабатываемой системы LDWS для автомобиля ГАЗель Next, реализованная с помощью нейросетевого подхода, позволяющего производить предварительную обработку видеокadra, поиск и фильтрацию линий разметки, вычисления позиции ТС в полосе движения и обработки условий подачи предупреждающего сигнала, позволила определять как хорошо различимую, так и частично поврежденную дорожную разметку в светлое и темное время суток. Общие результаты испытаний демонстрируют несущественную разницу в работе системы в различных регионах страны.

Среди преимуществ данного подхода следует отметить понятность и простоту реализации, высокую производительность всей системы, а также невысокие требования к вычислительным мощностям. В целом алгоритмические методы нейросетевого подхода, применяемые для распознавания дорожной разметки и реализации функции LDWS, являются стабильно работающими в хороших условиях, но в них возможны ложные срабатывания. Основной причиной срабатываний является чувствительность данной технологии к условиям внешнего освещения.

В дальнейшем планируется увеличение объема проводимых испытаний в различных регионах Российской Федерации.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель Next с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года №218). Экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы».*

### Библиографический список

1. **Okuda, R.** A survey of technical trend of ADAS and autonomous driving / R. Okuda, Y. Kajiwara, K. Terashima // Technical Papers of 2014 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/VLSI-DAT.2014.6834940.
2. **Ziebinski, A.** Review of advanced driver assistance systems (ADAS) / A. Ziebinski, R. Cupek, D. Grzechca, L. Chruszczyk // IP Conference Proceedings 1906, 120002 (2017), <https://doi.org/10.1063/1.5012394>.
3. SAE J3016 - 2021. Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles.
4. BMW [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон. Дан. Режим доступа: <https://www.bmw.com/>
5. Toyota [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон. Дан. Режим доступа: <https://www.toyota.com/>.
6. **Порубов, Д.М.** Разработка системы контроля полосы движения на основе технического зрения / Д.М. Порубов, А.А. Гладышев, Д.Ю. Тюгин, П.О. Береснев, В.И. Филатов, А.В. Пинчин // Труды

---

НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2020. No4(131). DOI: 10.46960/1810-210X\_2020\_4\_119.

7. **Nixon, M.** Feature extraction and image processing for computer vision. / M. Nixon, A. Aguado – Academic press, 2019.
8. **Ко, Y.** Key Points Estimation and Point Instance Segmentation Approach for Lane Detection / Yeongmin Ko, Younkwan Lee, Shoaib Azam, Farzeen Munir, Moongu Jeon, Witold Pedrycz // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, doi: 10.1109/TITS.2021.3088488.
9. TuSimple [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://github.com/TuSimple/tusimple-benchmark/issues/3>
10. CVAT [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://cvat.org/>.
11. ISO 17361 -2017. Intelligent transport systems — Lane departure warning systems — Performance requirements and test procedures.

*Дата поступления  
в редакцию: 01.12.2021*



УДК 629.33

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_148

## СНИЖЕНИЕ ВИБРОНАГРУЖЕННОСТИ КОММЕРЧЕСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ПОДВЕСКИ НА ОСНОВЕ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Е.В. Степанов**ORCID: 0000-0003-4894-3473 e-mail: [evgeniystepanov1991@nntu.ru](mailto:evgeniystepanov1991@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Представлена конструкция упругодемпфирующего устройства подвески автомобиля на основе эластомерных материалов и математическая модель эластомерного элемента. Предложена методика расчета упругодемпфирующих устройств на основе эластомерных материалов. При оценке эффективности их применения в системе поддресоривания легкого коммерческого и грузового автомобилей по критериям вибронгруженности использовались расчетные модели автомобилей и результаты натурных испытаний. Критерием вибронгруженности является среднеквадратические величины вертикальных ускорений на поддресоренной и неподдресоренной части автомобиля. Результаты экспериментальных и расчетных исследований показывают возможность снижения среднеквадратических величин вертикальных ускорений в диапазоне от 5,1 до 34,3 % для рассматриваемых автомобилей в выбранных условиях движения. При этом максимальное относительное отклонение результатов испытаний и моделирования не превышает 14,9 %.

**Ключевые слова:** подвеска, эластомер, математическая модель, плавность хода, вибронгруженность, имитационное моделирование, верификация, коммерческий автомобиль, испытания.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Степанов, Е.В. Снижение вибронгруженности коммерческих автомобилей за счет применения упругодемпфирующих устройств подвески на основе эластомерных материалов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. №1. 148-163. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_148

## REDUCTION OF VIBRATION LOAD OF COMMERCIAL VEHICLES DUE TO THE USE OF ELASTIC DAMPING SUSPENSION DEVICES BASED ON ELASTOMERIC MATERIALS

**E.V. Stepanov**ORCID: 0000-0003-4894-3473 e-mail: [evgeniystepanov1991@nntu.ru](mailto:evgeniystepanov1991@nntu.ru)Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Structure of an elastic damping device of a vehicle suspension based on elastomeric materials, and a mathematical model of elastomeric element are presented. Method for calculation of elastic damping devices based on elastomeric materials, is proposed. When evaluating the effectiveness of use of elastomeric materials in springing systems of light commercial and commercial vehicles according to the criteria of vibration load, computational models of vehicles and the results of field tests were used. Criteria for vibration load are the RMS values of vertical accelerations on sprung and unsprung parts of a vehicle. Results of experimental and computational studies show the possibility of reduction of vertical acceleration RMS values in the range from 5.1 to 34.3 % for the vehicles under consideration in selected driving conditions. At the same time, the maximum relative deviation of the test and simulation results does not exceed 14.9 %.

**Key words:** suspension, elastomer, mathematical model, smooth running, vibration load, simulation, verification, commercial vehicle, testing.

**FOR CITATION:** E.V. Stepanov. reduction of vibration load of commercial vehicles due to the use of elastic damping suspension devices based on elastomeric materials. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №1. C. 148-163. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_1\_148

## 1. Введение

Автомобиль – сложная колебательная система, которая находится в контакте с поверхностью дороги. Колебания автомобиля оказывают влияние не только на людей и перевозимые грузы, но и на ресурс узлов и деталей его конструкции [1]. Подвеска способствует уменьшению негативных воздействий колебаний и необходима для повышения плавности и безопасности движения автомобиля. Высокая конкуренция и рост требований заставляют производителей автомобилей уделять особое внимание комфортабельности и безопасности, в частности, показателям плавности хода. Основными элементами подвески автомобилей, определяющими плавность движения, являются упругий и демпфирующий элемент [2, 3]. Снижение уровня вибронагруженности при различных эксплуатационных условиях возможно за счет оптимального выбора упругой характеристики подвески и снижения неподрессоренной массы автомобиля.

Применение эластомерных материалов в качестве упругого элемента подвески при выполнении известных требований к упругой характеристике является актуальной задачей, так как обеспечивает существенное снижение массы неподрессоренных частей автомобиля и прогрессивную упругую характеристику [4], и, как следствие, повышение плавности движения. Кроме этого, неметаллический конструкционный материал не имеет коррозионного износа и обладает простой геометрической формой, получаемой элементарными операциями в изготовлении, что определяет меньшую стоимость подобной конструкции.

В данной работе объектами исследования являются легкий коммерческий автомобиль снаряженной массой 2700 кг и грузовой автомобиль полной массой 8700 кг. Для легкого коммерческого автомобиля рассматривается передняя независимая подвеска на двойных поперечных рычагах. У грузового автомобиля исследуется задняя зависимая подвеска на многолистовых полуэллиптических рессорах с подрессорником.

Цель данной статьи – подтвердить возможность снижения вибронагруженности коммерческих автомобилей путем применения упругодемпфирующих устройств подвески на основе эластомерных материалов.

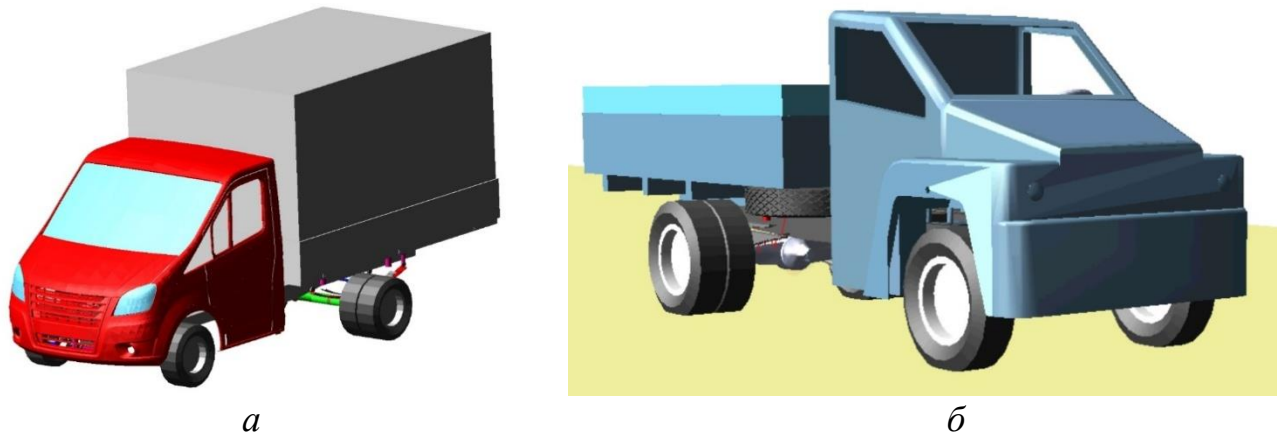
## 2. Методы исследования

Данный раздел посвящен обзору методов моделирования динамики подвески автомобиля, разработке математических моделей динамики легкого коммерческого и грузового автомобиля с различными типами подвесок. Представлено описание конструкции эластомерного упругодемпфирующего устройства, его математической модели и методики расчета упругодемпфирующих устройств подвески на основе эластомерных материалов. Также описан способ моделирования возмущающего воздействия дорожного полотна, основанный на принципе суперпозиций гармонических компонент микропрофиля.

### 2.1 Математическая модель автомобиля и эластомерного устройства подвески

Общий вид моделей легкого коммерческого и грузового автомобилей, реализованный в программном комплексе MSC.ADAMS для получения расчетных показателей вибронагруженности, представлен на рис. 1. Легкий коммерческий автомобиль с колесной формулой 4x2 и снаряженной массой 2 790 кг имеет независимую переднюю подвеску на поперечных рычагах и заднюю рессорную зависимую подвеску. Грузовой автомобиль имеет переднюю и заднюю рессорные зависимые подвески, полная масса составляет 8 700 кг. При разработке данных моделей были приняты следующие допущения: рама, кабина, кузов, силовой агрегат, рычаги передней подвески, передний и задний мосты являются абсолютно твердыми телами; пружины подвески, амортизаторы и рессоры имеют характеристики, соответствующие конструкторской документации; сайлентблоки и резиновые опоры имеют линейные характери-

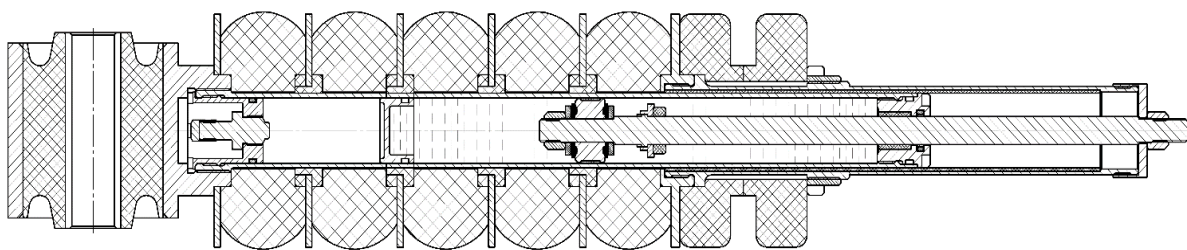
стики жесткости; пневматические шины имеют линейные характеристики жесткости в вертикальном и боковом направлении, а также демпфирующие свойства с постоянным коэффициентом затухания; дорожная поверхность является недеформируемой; влияние трансмиссии не учитывается. Модели достаточно подробно воспроизводят геометрию подвесок реальных транспортных средств со всеми степенями свободы, а также кинематическими и силовыми связями [5, 6].



**Рис. 1. Общий вид моделей автомобилей в программном комплексе MSC.ADAMS:**  
*a* – легкий коммерческий автомобиль; *б* – грузовой автомобиль

**Fig. 1. General view of car models in the MSC.ADAMS software package:**  
*a* – light commercial vehicle; *b* – truck

Для возможности анализа эффективности внедрения эластомерных материалов в систему поддрессоривания была предложена конструкция упругодемпфирующего устройства подвески являющегося комбинацией гидравлического амортизатора и пакета эластомерных элементов, имеющих оригинальную геометрическую форму [7]. На рис. 2 представлен вид в разрезе предлагаемого устройства.



**Рис. 2. Вид в разрезе конструкции упругодемпфирующего устройства**

**Fig. 2. Cross-sectional view of elastic damping device structure**

Математическое описание динамического поведения упругодемпфирующего устройства подвески, учитывающее влияние упругих и демпфирующих характеристик агрегата, может быть охарактеризовано следующим уравнением (1):

$$F_0 = F_y + F_d + F_T, \quad (1)$$

где  $F_0$  – суммарная сила устройства;  $F_y$  – упругая сила;  $F_d$  – демпфирующая сила;  $F_T$  – сила трения.

$$F_y = F_{\text{ЭП}} + F_T, \quad (2)$$

$$F_{\Gamma} = p_{CT} S_{\Pi} \left( \frac{V_{CT}}{V_{CT} - S_{\Pi} \cdot \Delta} \right)^n, \quad (3)$$

$$F_{Д} = \dot{\Delta} (k_A + k_{Э}), \quad (4)$$

$$F_{T} = \begin{cases} F_C \operatorname{sign}(\dot{\Delta}), \text{ при } |\dot{\Delta}| \geq \dot{\Delta}_0 \\ \frac{F_C}{\dot{\Delta}_0} \dot{\Delta}, \text{ при } |\dot{\Delta}| < \dot{\Delta}_0 \end{cases}, \quad (5)$$

где  $F_{ЭП}$  – сила, развиваемая эластомерным пакетом, Н;  $F_{\Gamma}$  – упругая сила, создаваемая газовой камерой амортизатора, Н;  $p_{CT}$  – статическое давление в газовой камере амортизатора, Па;  $S_{\Pi}$  – площадь газового поршня амортизатора, м<sup>2</sup>;  $V_{CT}$  – статический объем газовой камеры амортизатора, м<sup>3</sup>;  $\Delta$  – деформация упругодемпфирующего устройства, м;  $\dot{\Delta}$  – скорость деформации упругодемпфирующего устройства, м/с;  $k_A$  – коэффициент демпфирования амортизатора (зависит от  $\dot{\Delta}$ ), Н·с/м;  $k_{Э}$  – условный коэффициент демпфирования эластомерного пакета, Н·с/м;  $n$  – показатель политропы;  $F_C$  – кулоновская сила трения (сила сухого трения в уплотнениях амортизатора), Н;  $\dot{\Delta}_0$  – граница участка вязкого сопротивления, м/с.

Основной сложностью при расчете силы, развиваемой эластомерным пакетом, является определение жесткости эластомерных элементов в зависимости от их деформации [8,9]. В работе выявлена связь величины деформации упругого элемента от изменения площади рабочего поперечного сечения эластомера, и для проектных расчетов предлагается использовать следующую формулу жесткости элемента, имеющего размеры, представленные на рис. 3 (б):

$$C(\Delta) = \frac{2(1 + \mu) \cdot G \cdot K \cdot \pi \cdot (R_0 + \Delta)^2 \cdot (1 - p^2)}{H - \Delta}, \quad (6)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $G$  – модуль сдвига, Па;  $K = \frac{D}{d} \cdot \frac{R_0}{H}$  – коэффициент повышения жесткости;  $R_0 = \sqrt{R^2 - \frac{H^2}{4}} - R + \frac{D}{2}$  – эффективный наружный радиус эластомера, м;  $\Delta$  – деформация эластомера, м;  $p = \frac{d}{2(R_0 + \Delta)}$  – геометрический параметр формы эластомера (при  $2R > D$ ).

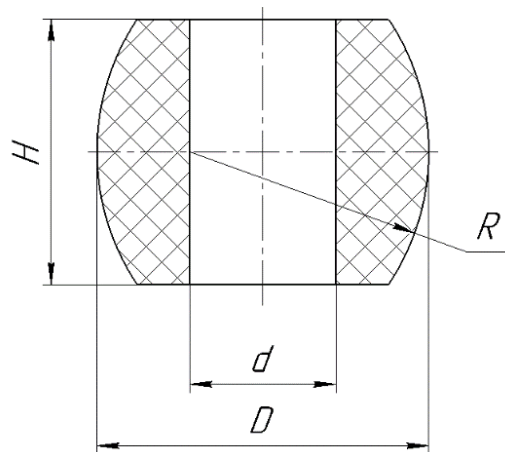


Рис. 3. Расчетная схема эластомерного элемента подвески

Fig. 3. Computational scheme of suspension elastomeric element

В результате анализа и обобщения подходов к проектным расчетам параметров упругих и демпфирующих элементов подвески, а также способов расчета упругой характеристики эластомерного элемента с определенной геометрией была разработана методика расчета

упругодемпфирующих устройств подвески автомобиля на основе эластомерных материалов (рис. 4).

Предлагаемая методика содержит следующие основные этапы:

- формирование перечня исходных данных о параметрах автомобиля и особенностях его конструкции (в большей степени важна информация о подвеске);
- сбор информации о статистических характеристиках микропрофиля дорог (спектральная плотность), на которых предполагается эксплуатация автомобиля [10];
- выбор проектных значений ключевых параметров подвески;
- расчет рациональных упругих и демпфирующих характеристик подвески с использованием упрощенной модели колебаний автомобиля;
- формирование характеристик упругого и демпфирующего элемента подвески;
- расчет конструктивных параметров эластомерных элементов и гидравлического телескопического амортизатора;
- разработка конструкции комбинированного упругодемпфирующего устройства с учетом возможности интеграции в подвеску автомобиля.

На этапе расчета рациональных упругих и демпфирующих характеристик подвески автомобиля возникает конфликт между плавностью хода и безопасностью движения. Критерием оценки плавности хода и вибронегруженности автомобиля при движении по стохастическим профилям дорог является значение средних квадратических величин (СКВ) вертикальных ускорений  $\sigma_z$  подрессоренной массы, а критерием оценки безопасности движения может являться значение СКВ деформации упругого элемента подвески  $\sigma_f$ . Проведение предварительной оценки динамики движения автомобиля и расчетов упругих и демпфирующих характеристик подвески по данным критериям весьма трудоемко, если использовать подробную математическую модель автомобиля. Гораздо эффективнее проводить предварительные расчеты, используя простую плоскую трехмассовую модель, достаточно хорошо описывающую колебания автомобиля (рис. 5).

Колебания подрессоренных и неподрессоренных масс трехмассовой модели описываются системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} M\ddot{z} + C_{p1}(z + \theta L_1 - \xi_1) + C_{p2}(z + \theta L_2 - \xi_2) + K_{a1}(\dot{z} + \dot{\theta}L_1 - \dot{\xi}_1) + K_{a2}(\dot{z} + \dot{\theta}L_2 - \dot{\xi}_2) = 0 \\ I\ddot{\theta} + C_{p1}L_1(z + \theta L_1 - \xi_1) - C_{p2}L_2(z - \theta L_2 - \xi_2) + K_{a1}L_1(\dot{z} + \dot{\theta}L_1 - \dot{\xi}_1) - K_{a2}L_2(\dot{z} - \dot{\theta}L_2 - \dot{\xi}_2) = 0 \\ m_1\ddot{\xi}_1 - C_{p1}(z + \theta L_1 - \xi_1) + C_{m1}(\xi_1 - q_1) - K_{a1}(\dot{z} + \dot{\theta}L_1 - \dot{\xi}_1) + K_{m1}(\dot{\xi}_1 - \dot{q}_1) = 0 \\ m_2\ddot{\xi}_2 - C_{p2}(z - \theta L_2 - \xi_2) + C_{m2}(\xi_2 - q_2) - K_{a2}(\dot{z} - \dot{\theta}L_2 - \dot{\xi}_2) + K_{m2}(\dot{\xi}_2 - \dot{q}_2) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

где  $M$  – подрессоренная масса,  $m_1, m_2$  – соответственно неподрессоренные массы передней и задней осей,  $I$  – момент инерции подрессоренной массы относительно поперечной оси,  $K_{a1}, K_{a2}$ , – приведенные коэффициенты сопротивления амортизаторов передней и задней подвесок,  $C_{p1}, C_{p2}$  – приведенные жесткости передней и задней подвесок,  $K_{m1}, K_{m2}$  – коэффициенты сопротивления шин передней и задней осей,  $C_{m1}, C_{m2}$  – жесткости шин передней и задней осей,  $L_1, L_2$  – расстояния от центра масс автомобиля до передней и задней осей,  $z, \dot{z}, \ddot{z}$  – соответственно перемещение, скорость и ускорение подрессоренной массы,  $\xi_{1,2}, \dot{\xi}_{1,2}, \ddot{\xi}_{1,2}$  – соответственно перемещения, скорости и ускорения неподрессоренных масс передней и задней осей,  $q_1, q_2$  – ординаты микропрофиля под передней и задней осями.

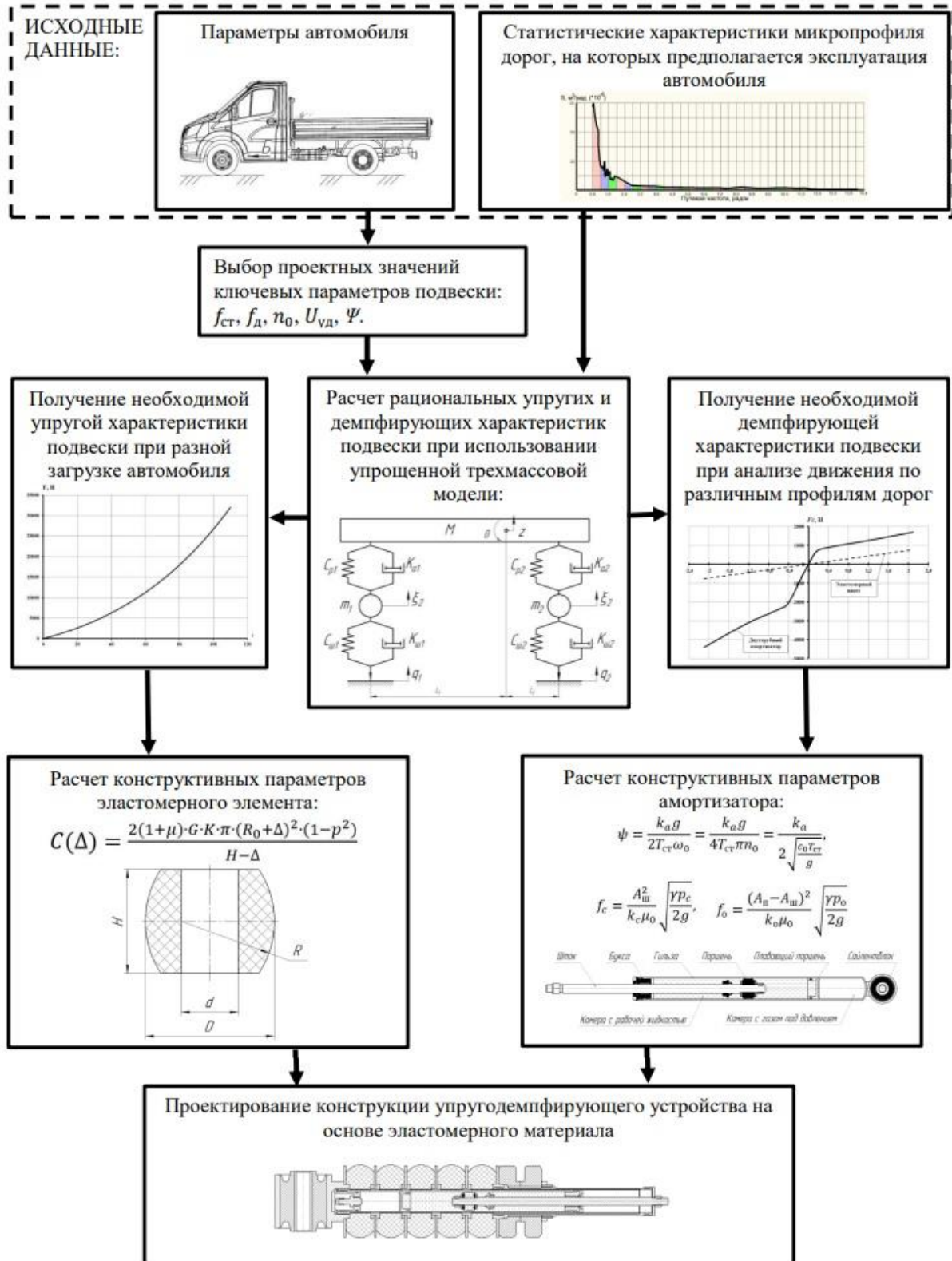


Рис. 4. Методика расчета упругодемпфирующих устройств подвески на основе эластомерных материалов

Fig. 4. Method of calculation of suspension elastic damping devices based on elastomeric materials

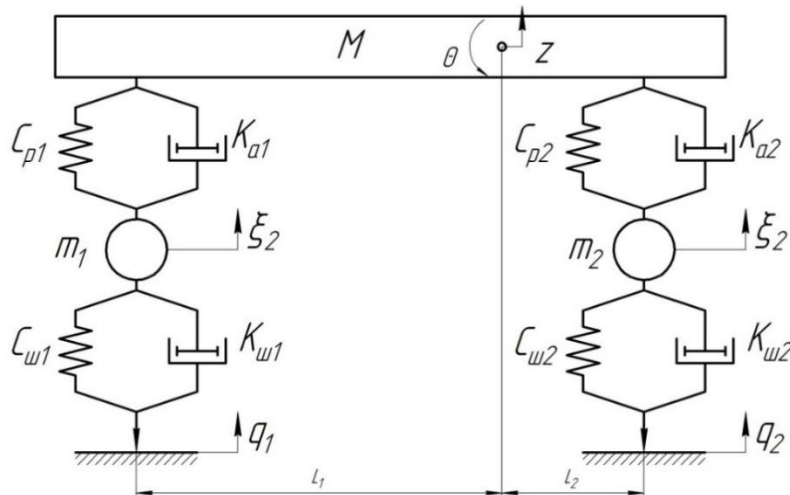


Рис. 5. Трехмассовая расчетная модель автомобиля

Fig. 5. Three-mass computational model of the vehicle

Особое внимание уделяется формированию возмущения от дорожной поверхности. В работе предлагается использовать для оценки вибронгруженности автомобиля реальные спектральные характеристики дорог. Формирование случайного возмущения микропрофиля предлагается реализовать с использованием суммы гармонических составляющих, с частотой и амплитудой, выбираемых из определенных соображений [11]. В настоящей работе предлагается учитывать корреляцию амплитуд волн дорожных неровностей с их длинами, выявляемую с помощью характеристики спектральной плотности дисперсии микропрофиля. На рис. 6 показана схема формирования возмущения от микропрофиля дорожной поверхности с использованием метода суммирования гармонических составляющих процесса. График характеристики дисперсии ординат микропрофиля как функции длины волны (неровности) разбивается на составляющие с кратными интервалами путевой частоты или длины волны (рис. 7). Частота каждого из выделенных интервалов соответствует частоте одной из гармонических составляющих. Текущие значения ординат гармонической составляющей возмущения могут задаваться с помощью аналитического выражения функции микропрофиля характерной синусоидальной формы (8):

$$q = q_0 \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{S_0} s \right) = q_0 \left( 1 - \cos \frac{2\pi v}{S_0} t \right), \quad (8)$$

где  $S_0$  – максимальная длина неровности (волны),  $q_0$  – амплитуда синусоиды ( $2q_0$  – размах синусоиды),  $q$  – текущее значение высоты неровности,  $s$  – текущее значение длины неровности.

Дисперсия, соответствующая гармоническому процессу со средней частотой интервала  $\{\theta_j, \theta_{j+1}\}$ , равна площади, ограниченной кривой функции в пределах заданного частотного интервала (9):

$$D_j = \frac{S_q(\theta_{j+1}) + S_q(\theta_j)}{2} (\theta_{j+1} - \theta_j), \quad (9)$$

где  $D_j$  – дисперсия функции спектральной плотности микропрофиля для интервала путевой частоты  $\{\theta_j, \theta_{j+1}\}$ ;  $S_q(\theta_j)$ ,  $S_q(\theta_{j+1})$  – значения, спектральной функции при путевых частотах, равных  $\theta_j, \theta_{j+1}$ .

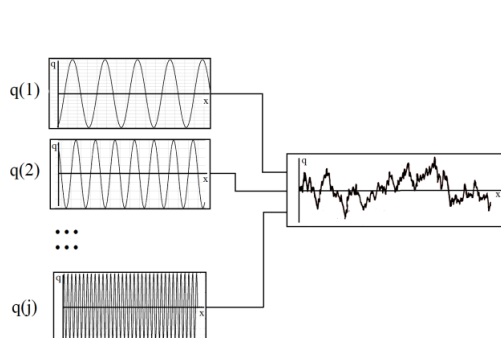
Среднее значение частоты интервала (10):

$$\theta_{jcp} = \frac{\theta_j + \theta_{j+1}}{2}, \quad (10)$$

где  $\theta_{jcp}$  – средняя путевая частота интервала  $\{\theta_j, \theta_{j+1}\}$ .

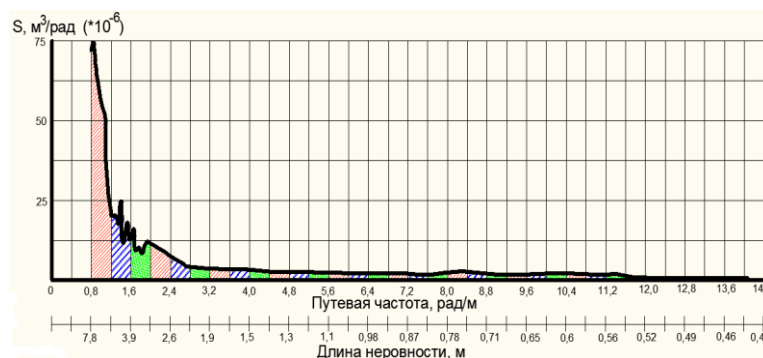


Алгоритм моделирования процессов предусматривает варьирование частоты возмущающего воздействия микропрофиля дороги при различных (постоянных) скоростях движения. Реализация указанной задачи может выполняться с использованием программных средств. Разработка трехмассовой расчетной модели автомобиля, формирование процесса возмущения микропрофиля и расчет характеристик динамических процессов автомобиля были выполнены в рамках данной работы программном пакете MatLab/Simulink.



**Рис. 6. Схема моделирования возмущения микропрофиля**

**Fig. 6. Microprofile perturbation modeling scheme**



**Рис. 7. Спектральная плотность бульжной дороги ровного замощения**

**Fig. 7. Spectral density of a smooth paved cobblestone road**

## 2.2 Экспериментальные исследования

Этот раздел посвящен экспериментальным исследованиям характеристик эластомерных элементов, пневматических шин и натурным испытаниям стандартной и эластомерной подвесок легкого коммерческого автомобиля. Для определения упругих и демпфирующих свойств эластомерного элемента была осуществлена специальная серия лабораторных исследований, которая позволила выяснить реальные свойства эластомеров. С целью получения качественных значений жесткости и демпфирующих характеристик был разработан и изготовлен специальный направляющий аппарат для эластомерного пакета, обеспечивающий центрирование элементов вдоль единой оси и минимизирующий влияние трения направляющего аппарата за счет применения материалов с низким коэффициентом трения и высококачественной обработки рабочих поверхностей. На рис. 8 представлен внешний вид стендовой установки для получения упругой характеристики пакета эластомерных элементов при сжатии (нагрузении) и разгрузке.

Для определения демпфирующих свойств эластомера был поставлен эксперимент, позволяющий рассчитать логарифмический декремент затухания колебательного процесса в эластомере и величину «условного» коэффициента демпфирования в результате сброса маятникового копра (рис. 9). Полученные эмпирические данные об упругодемпфирующих свойствах эластомерных элементов позволяют провести статистический анализ по определению средних арифметических значений жесткости  $v$  и «условного» коэффициента демпфирования. Аналогичные стендовые испытания были осуществлены с целью определения вертикальной жесткости и коэффициента демпфирования пневматических шин автомобиля. Для проверки адекватности предложенной методики расчета упругодемпфирующих устройств подвески, а также разработанных математических моделей автомобиля проводилась серия натурных испытаний легкого коммерческого автомобиля с двумя типами подвесок. При испытаниях использовались два участка испытательных дорог с твердым покрытием: динамометрическая и бульжная дорога ровного замощения, а также была осуществлена серия испытаний по преодолению волнообразной единичной неровности в соответствии с ГОСТ Р



52605-2006 на различных скоростях движения. В процессе испытаний проводились измерения вертикальных составляющих ускорений, действующих на лонжероне рамы над левым колесом автомобиля и на нижнем рычаге подвески, а также деформация упругого элемента подвески. Внешний вид подвески со схемой установки датчиков на автомобиль представлен на рис. 10. Фрагмент испытаний автомобиля при преодолении искусственной единичной неровности представлен на рис. 11.



Рис. 8. Стендовая установка для испытаний эластомеров

Fig. 8. Bench installation for elastomers testing

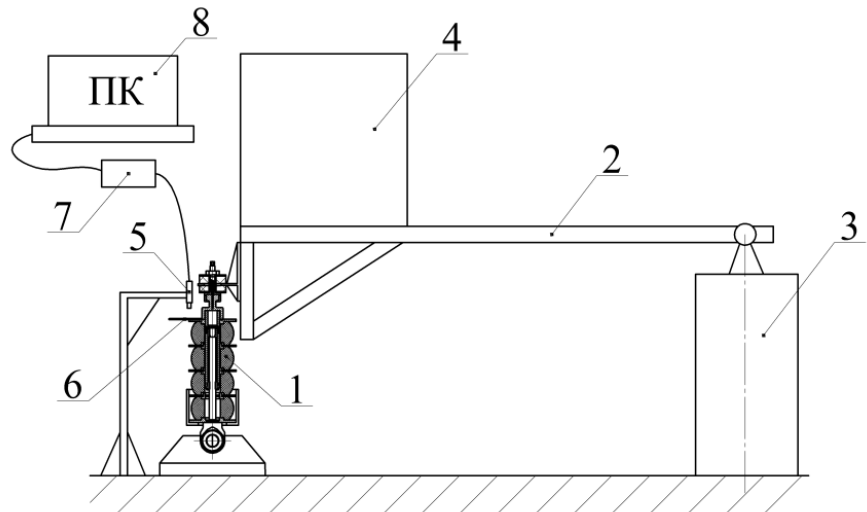


Рис. 9. Стенд для определения собственного коэффициента демпфирования эластомерного пакета

Fig. 9. Bench for determination of intrinsic damping coefficient of an elastomeric package



Рис. 10. Внешний вид подвески автомобиля с эластомерным пакетом и установленными датчиками

Fig. 10. Appearance of the car suspension with elastomeric package and installed sensors



Рис. 11. Фрагмент испытаний подвески при переезде единичной неровности

Fig. 11. Fragment of suspension tests when moving across a single unevenness

### 2.3 Обработка результатов эксперимента и моделирования

В данном разделе представлены результаты стендовых испытаний эластомерных элементов, экспериментального и расчетного исследования вибронгруженности легкого коммерческого автомобиля и оценка адекватности разработанных математических моделей при сравнении с результатами натуральных испытаний. Также осуществлено расчетное исследование вибронгруженности грузового автомобиля с целью прогнозирования эффективности применения эластомерных материалов в подвесках данного типа транспортных средств. При обработке результатов эксперимента использовались методы математической статистики [12, 13]. Результаты данной обработки значений выборок лабораторных исследований упругой характеристики эластомерного пакета и сравнение с результатами математического моделирования представлены на рис. 12.

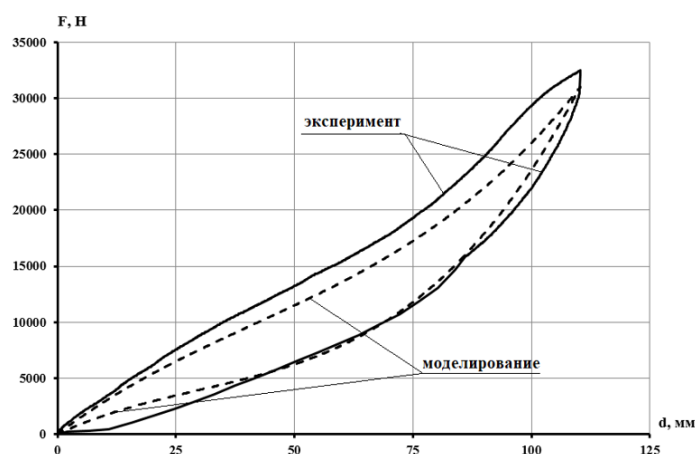


Рис. 12. Сравнение характеристик эластомерного пакета при нагружении и разгрузке

Fig. 12. Comparison of elastomeric package characteristics during loading and unloading

Максимальное относительное отклонение значений усилия в ключевых точках характеристик, полученных в ходе эксперимента и моделирования, не превышает 8 %. После проведения натуральных испытаний подвески автомобиля осуществлялась обработка и проверка однородности результатов экспериментальных заездов на испытательных участках дорог. Затем проводится анализ по выбранным критериям обеспечения плавности хода, вибронгруженности и безопасности движения в диапазоне частот 0,2-80 Гц для стандартной передней подвески легкого коммерческого автомобиля с металлическими упругими элементами и эластомерной подвески. В качестве критериев выступают следующие величины:

- СКВ вертикальных ускорений подрессоренной массы ( $\sigma_{\ddot{z}}$ );
- СКВ вертикальных ускорений неподрессоренной массы ( $\sigma_{\ddot{z}_1}$ );
- СКВ деформаций упругого элемента подвески ( $\sigma_f$ ).

Величина каждого критерия является средним арифметическим значением, полученным в результате серии экспериментальных заездов. При анализе движения автомобиля через единичную неровность на различных скоростях целесообразно рассматривать не СКВ ускорений подрессоренных и неподрессоренных частей автомобиля, а также СКВ деформаций упругого элемента, а максимальные значения рассматриваемых параметров ( $\dot{Z}_{\max}$ ,  $\dot{Z}_{1\max}$ ,  $f_{\max}$ ). Результаты обработки экспериментальных данных при исследовании движения легкого коммерческого автомобиля по булыжной дороге ровного замощения, динамометрической дороги и преодолении единичной неровности для двух типов подвесок представлены в табл. 1-3.

Таблица 1.

Результаты обработки экспериментальных заездов по булыжной дороге

Table 1.

## Results of processing of experimental runs on a cobblestone road

Параметр	Стандартная подвеска			Эластомерная подвеска			Относительное снижение СКВ		
	$\sigma_{\dot{z}}$ , м/с <sup>2</sup>	$\sigma_{\dot{z}1}$ , м/с <sup>2</sup>	$\sigma_f$ , мм	$\sigma_{\dot{z}}$ , м/с <sup>2</sup>	$\sigma_{\dot{z}1}$ , м/с <sup>2</sup>	$\sigma_f$ , мм	$\delta\sigma_{\dot{z}}$ , %	$\delta\sigma_{\dot{z}1}$ , %	$\delta\sigma_f$ , %
30	11,461	24,521	2,964	7,868	18,139	2,851	31,3	26,0	3,8
40	13,389	28,680	3,543	9,131	20,716	3,564	31,8	27,8	-0,6
50	14,312	31,609	3,836	10,156	23,281	3,967	29,0	26,3	-3,4

Таблица 2.

Результаты обработки экспериментальных заездов по динамометрической дороге

Table 2.

## Results of processing of experimental runs on a dynamometer road

Параметр	Стандартная подвеска			Эластомерная подвеска			Относительное снижение СКВ		
	$\sigma_{\dot{z}}$ , м/с <sup>2</sup>	$\sigma_{\dot{z}1}$ , м/с <sup>2</sup>	$\sigma_f$ , мм	$\sigma_{\dot{z}}$ , м/с <sup>2</sup>	$\sigma_{\dot{z}1}$ , м/с <sup>2</sup>	$\sigma_f$ , мм	$\delta\sigma_{\dot{z}}$ , %	$\delta\sigma_{\dot{z}1}$ , %	$\delta\sigma_f$ , %
50	1,496	3,008	0,610	1,356	2,447	0,421	9,4	18,7	31,0
70	1,760	3,254	0,945	1,642	2,884	0,697	6,7	11,4	26,2
90	2,131	3,548	1,120	2,137	3,518	1,051	-0,3	0,8	6,2

Таблица 3.

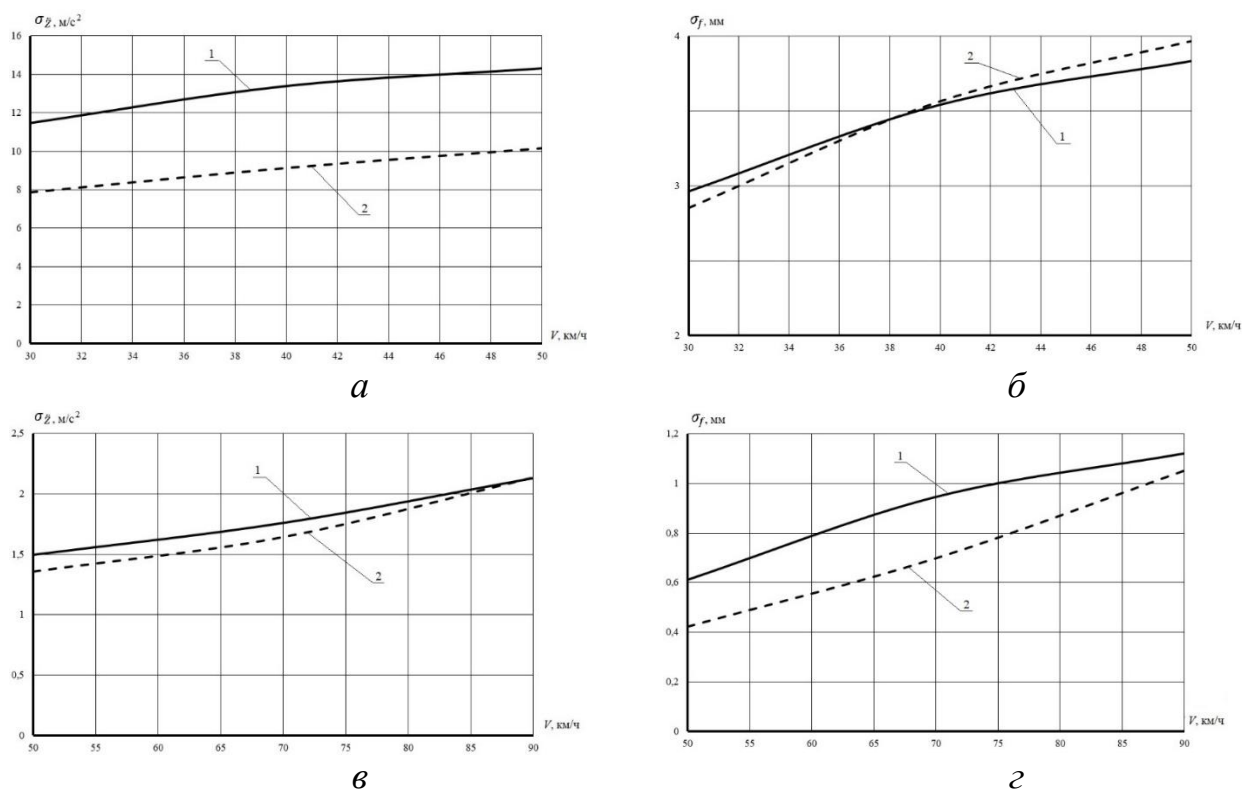
Результаты обработки экспериментальных заездов через единичную неровность

Table 3.

## Results of processing of experimental runs through a single unevenness

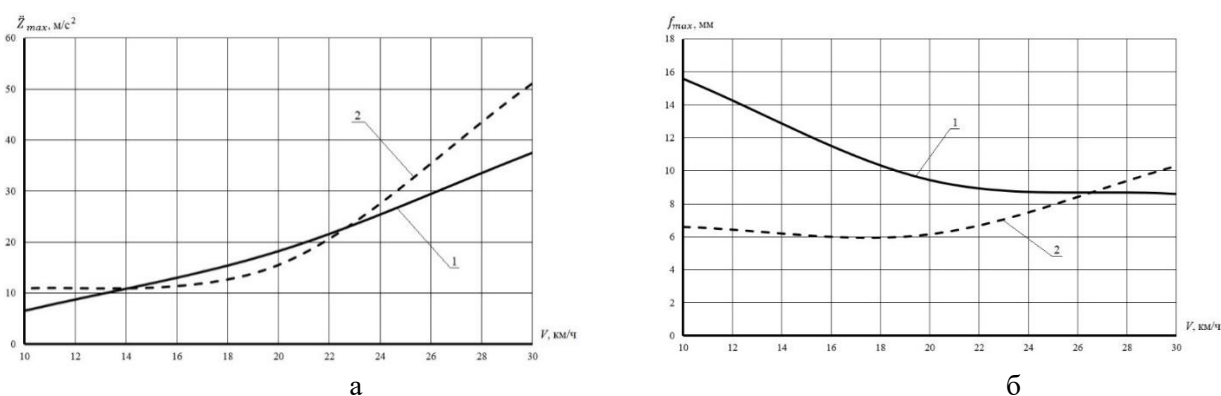
Параметр	Стандартная подвеска			Эластомерная подвеска			Относительное снижение СКВ		
	$\dot{Z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	$\dot{Z}_{1max}$ , м/с <sup>2</sup>	$f_{max}$ , мм	$\dot{Z}_{max}$ , м/с <sup>2</sup>	$\dot{Z}_{1max}$ , м/с <sup>2</sup>	$f_{max}$ , мм	$\delta\dot{Z}_{max}$ , %	$\delta\dot{Z}_{1max}$ , %	$\delta f_{max}$ , %
10	6,534	31,45	15,59	10,89	20,128	6,596	-66,7	36,0	57,7
20	18,216	50,32	9,445	15,543	37,74	6,146	14,7	25,0	34,9
30	37,491	149,83	8,605	51,139	127,62	10,29	-36,4	14,8	-19,6

Графическая интерпретация полученных данных представлена на рис. 13-14.



**Рис. 13.** СКВ экспериментальных значений вертикального ускорения поддресоренной части автомобиля (а, в) и СКВ деформаций упругого элемента подвески (б, г) при движении по булыжной дороге (а, б) и динамометрической дороге (в, г) на различных скоростях: 1 – стандартная подвеска; 2 – эластомерная

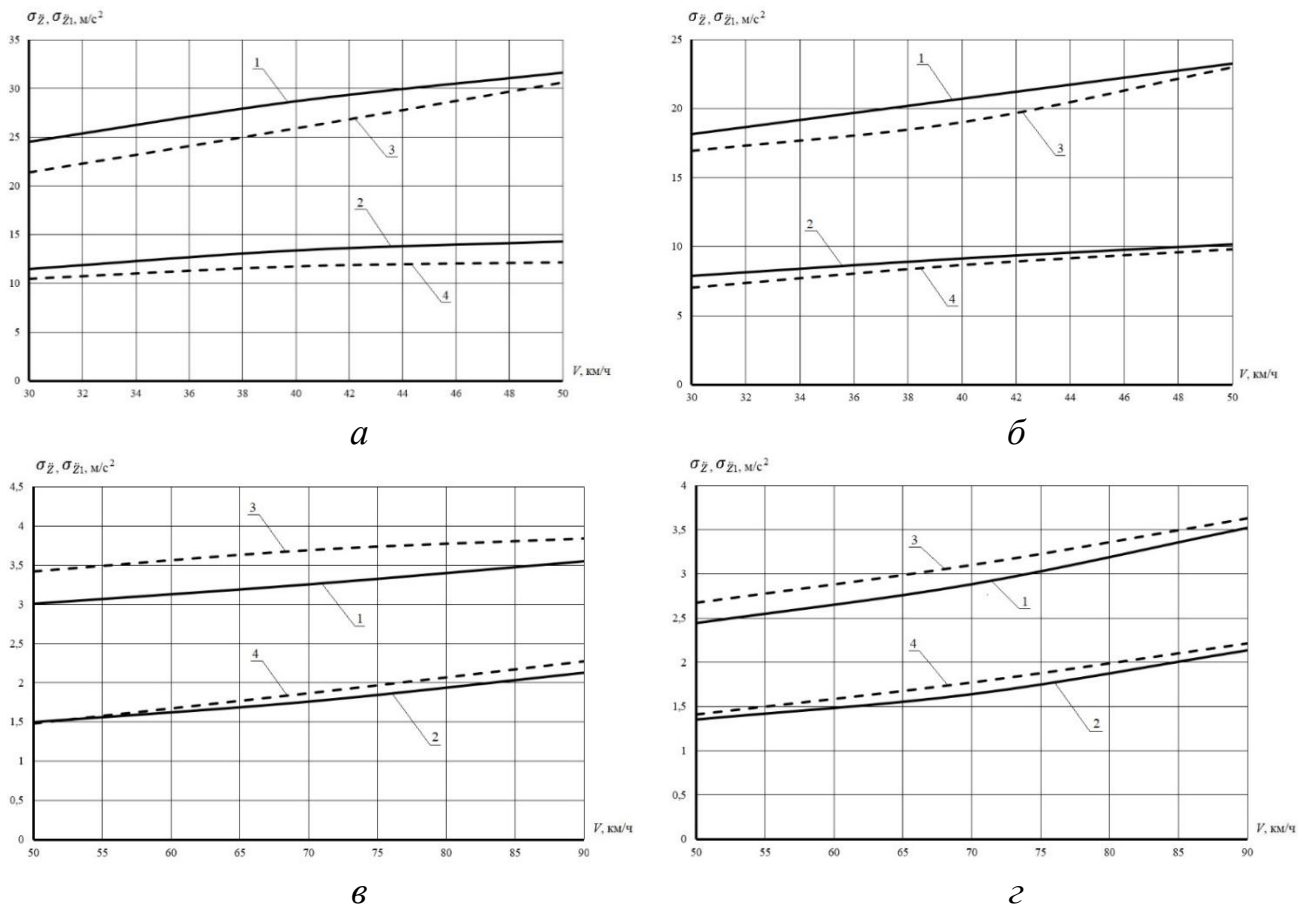
**Fig. 13.** RMS of the car sprung part vertical acceleration experimental values (a, c) and RMS of suspension elastic element deformations (b, d) during movement on a cobblestone road (a, b) and a dynamometer road (c, d) at different speeds: 1 – standard suspension; 2 – elastomeric suspension



**Рис. 14.** Максимальные значения вертикального ускорения поддресоренной части автомобиля (а) и деформации упругого элемента подвески (б) при переезде через единичную неровность на различных скоростях: 1 – стандартная подвеска; 2 – эластомерная

**Fig. 14.** Car sprung part vertical acceleration maximum values (a) and suspension elastic element deformation (b) when moving across a single unevenness at various speeds: 1 – standard suspension; 2 – elastomeric suspension

Результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных при исследовании движения легкого коммерческого автомобиля по булыжной дороге ровного замощения и динамометрической дороге для стандартной подвески и эластомерной представлены на рис. 15.



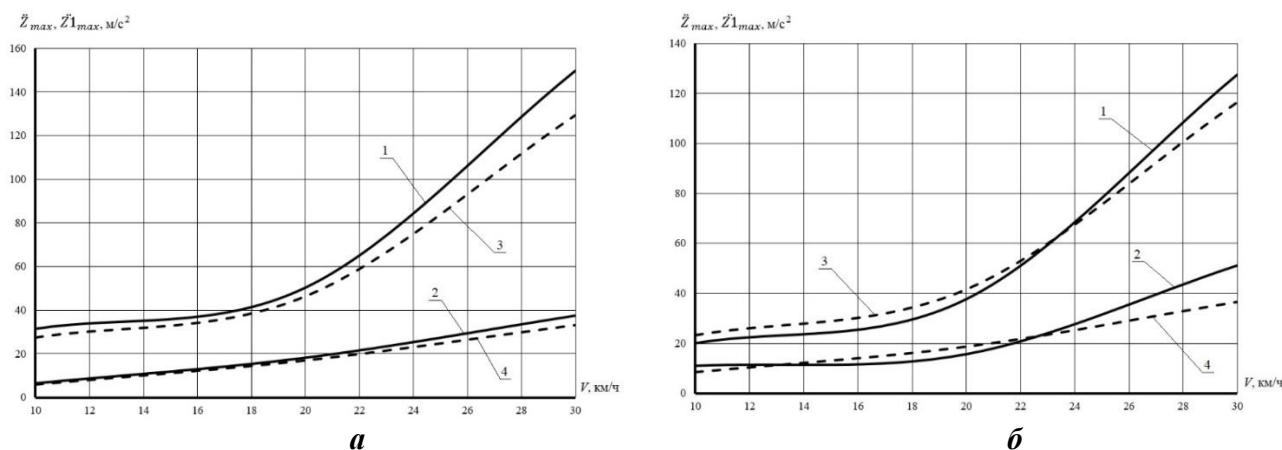
**Рис. 15.** СКВ значений вертикального ускорения поддрессоренной и неподдрессоренной части автомобиля со стандартной подвеской (*a, в*) и эластомерной (*б, г*) при движении по булыжной дороге (*a, б*) и динамометрической (*в, г*): 1 – экспериментальные значения  $\sigma_{z1}$ ; 2 – экспериментальные значения  $\sigma_z$ ; 3 – расчетные значения  $\sigma_{z1}$ ; 4 – расчетные значения  $\sigma_z$

**Fig. 15.** RMS values of vertical acceleration of the sprung and unsprung parts a car with a standard suspension (*a, c*) and elastomeric (*b, d*) when driving on a cobblestone road (*a, b*) and dynamometric (*c, d*):

1 – experimental values  $\sigma_{z1}$ ; 2 – experimental values  $\sigma_z$ ;  
3 – computational values  $\sigma_{z1}$ ; 4 – computational values  $\sigma_z$

Результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных максимальных значений вертикальных ускорений при преодолении единичной неровности представлены на рис. 16. Теоретическая оценка виброн нагруженности грузового автомобиля выполнена на основе сравнения результатов имитационного моделирования задней рессорной подвески с альтернативной конструкцией, использующей эластомерный пакет. Результаты сравнительного анализа расчетных данных при исследовании движения грузового автомобиля по булыжной дороге ровного замощения для рессорной и эластомерной подвесок представлены на рис. 17. Результаты анализа адекватности предлагаемой математической модели легкого коммерческого автомобиля при оценке СКВ и максимальных значений вертикальных ускорений показывают хорошую сходимость экспериментальных и расчетных данных. Максимальная относительная погрешность не превышает по абсолютному значению 14,9 %. При-

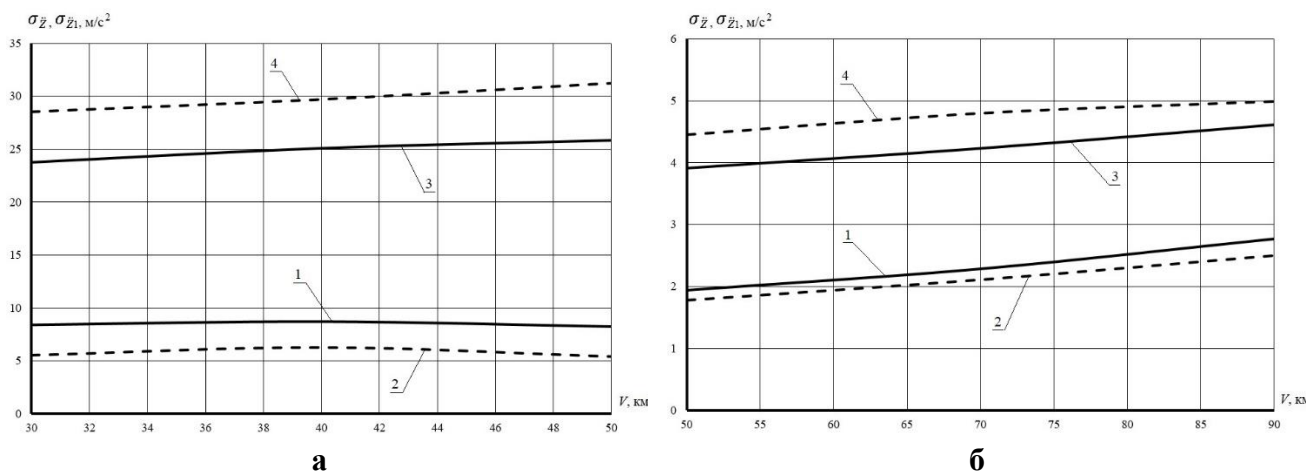
нимая во внимание сложность динамической системы и принимаемых при моделировании допущениях, можно подтвердить адекватность описания поведения реального автомобиля предложенной математической моделью при оценке плавности хода и вибронгруженности. Таким образом, предложенные при моделировании подходы являются приемлемыми, и результаты оценки вибронгруженности грузового автомобиля также могут считаться адекватными.



**Рис. 16.** Максимальные значения вертикального ускорения подрессоренной и непрорессоренной части автомобиля со стандартной (а) и эластомерной (б) подвеской при преодолении единичной неровности: 1 – экспериментальные значения  $\dot{Z}'_{1max}$ ; 2 – экспериментальные значения  $\dot{Z}_{max}$ ; 3 – расчетные значения  $\dot{Z}'_{1max}$ ; 4 – расчетные значения  $\dot{Z}_{max}$

**Fig. 16.** Maximum values of vertical acceleration of sprung and unsprung part of vehicle with standard (a) and elastomeric (б) suspension when moving across a single unevenness:

1 – experimental values  $\dot{Z}'_{1max}$ ; 2 – experimental values  $\dot{Z}_{max}$ ;  
3 – computational values  $\dot{Z}'_{1max}$ ; 4 – computational values  $\dot{Z}_{max}$



**Рис. 17.** СКВ расчетных значений вертикального ускорения подрессоренной и непрорессоренной части грузового автомобиля при движении по булыжной дороге (а) и динамометрической (б): 1 – расчетные значения  $\sigma_{\dot{z}}$  для рессорной подвески;

2 – расчетные значения  $\sigma_{\dot{z}}$  для эластомерной подвески; 3 – расчетные значения  $\sigma_{\dot{z}'_1}$  для рессорной подвески; 4 – расчетные значения  $\sigma_{\dot{z}'_1}$  для эластомерной подвески

**Рис. 17.** RMS computational values of vertical acceleration of sprung and unsprung part of truck when moving along a cobblestone road (а) and dynamometric (б): 1 – computational values  $\sigma_{\dot{z}}$  for spring suspension; 2 – computational values  $\sigma_{\dot{z}}$  for elastomeric suspension; 3 – computational values  $\sigma_{\dot{z}'_1}$  for spring suspension; 4 – computational values  $\sigma_{\dot{z}'_1}$  for elastomeric suspension



### 3. Результаты и выводы

Предложена одна из возможных конструкций упругодемпфирующего устройства подвески автомобиля, представляющая собой комбинацию пакета эластомерных элементов с гидравлическим амортизатором. Представлена методика расчета упругодемпфирующих устройств подвески автомобиля на основе эластомерных материалов, включающая математическую модель эластомерного элемента, связывающая геометрические размеры и физико-механические свойства материала с его упругой характеристикой. Для анализа виброн нагруженности разработаны имитационные модели легкого коммерческого автомобиля с передней независимой подвеской на металлических винтовых пружинах, грузового автомобиля с задней многолистовой рессорной подвеской и их аналоги с упругодемпфирующими устройствами на основе эластомерных материалов. Результаты анализа адекватности имитационных моделей показывают хорошую сходимость экспериментальных и расчетных данных при оценке средних квадратических величин и максимальных значений вертикальных ускорений для двух типов подвесок. Максимальная относительная погрешность не превышает по абсолютному значению 14,9 %.



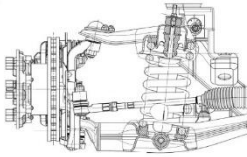
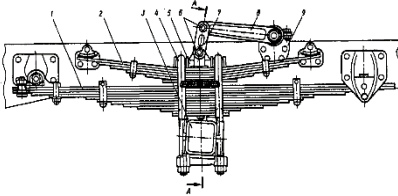
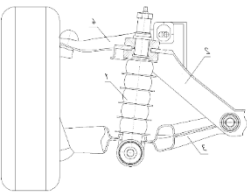
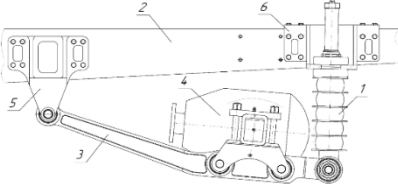
Экспериментальные и расчетные исследования виброн нагруженности легкого коммерческого автомобиля снаряженной массой 2790 кг и грузового автомобиля полной массой 8700 кг при движении по стохастическим профилям со стандартной и эластомерной подвесками подтверждают целесообразность внедрения эластомерных элементов в конструкцию систем поддрессоривания легких коммерческих и грузовых среднетоннажных автомобилей с точки зрения снижения виброн нагруженности в ожидаемом диапазоне от 5,1 до 34,3 %. Кроме этого, на основе проведенных проектных расчетов упругодемпфирующих устройств подвески для легкого коммерческого и грузового автомобилей получены величины их масс (табл. 4).

Таблица 4.

Величины масс элементов серийных и эластомерных подвесок

Table 4.

Mass values of elements of standard and elastomeric suspensions

Легкий коммерческий автомобиль		Грузовой автомобиль		
				
Тип подвески	Общий вид	Масса элементов, кг	Общий вид	Масса элементов, кг
Серийная		9,7		81
Эластомерная		4		34

Для легкого коммерческого автомобиля эластомерное упругодемпфирующее устройство имеет массу 4,0 кг, что в 2,4 раза меньше чем масса металлической винтовой пружины и амортизатора стандартной подвески (9,7 кг). Для грузового автомобиля эластомерное упругодемпфирующее устройство с направляющим аппаратом подвески имеет массу 34 кг, что в 2,4 раза меньше чем масса многорычковой металлической рессоры и подрессорника стандартной подвески (81,0 кг). Таким образом, наблюдается существенное снижение неподрессоренной массы автомобиля, что также является преимуществом предлагаемого решения.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель Next с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года №218) с использованием измерительной аппаратуры Центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы».*

### Библиографический список

1. **Ротенберг, Р.В.** Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода / Р.В. Ротенберг. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 392 с.
2. **Успенский, И.Н.** Проектирование подвески автомобиля / И.Н. Успенский, А.А. Мельников. – М.: Машиностроение, 1976. – 168 с.
3. **Раймпель, Й.** Шасси автомобиля: Элементы подвески / Й. Раймпель; пер. с нем. А.Л. Карпухина, под ред. Г.Г. Гридасова. – М.: Машиностроение, 1987. – 284 с.
4. **Reichwein, H.G.** Light, strong and economical — epochy fiber-reinforced structures for automotive mass production / H.G. Reichwein, P. Langemeier, T. Hasson, M. Schendzielorz // Automotive Composites Conference & Exhibition. 2010.
5. **Степанов, Е.В.** Оценка адекватности модели легкого коммерческого автомобиля при исследовании плавности хода/ Е.В. Степанов и др./ Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Н. Новгород, 2021. №4(135). С. 110-118, doi: 10.46960/1816-210X\_2021\_4\_110
6. **Васильев, А.А.** Моделирование условий криволинейного движения автопоезда в программном комплексе ADAMS/CAR / А.А. Васильев, С.Ю. Костин, С.А. Сергиевский [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2013. № 5(102). С. 239-245.
7. **Степанов, Е.В.** Оценка плавности хода автомобиля с гидроэластомерной подвеской / Е.В. Степанов, Ю.И. Молев, С.М. Огороднов, А.С. Вашурин / Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Н.Новгород, 2020. №3 (130). С. 120-131, doi: 10.46960/1816-210X\_2020\_3\_120
8. **Лавендел, Э.Э.** Прикладные методы расчета изделий из высокоэластичных материалов / Э.Э. Лавендел. Рига, Зинатне, 1980. 238 с.
9. **Белкин, А.Е.** Расчет эластомерного цилиндрического амортизатора с учетом вязких свойств материала / А.Е. Белкин, Н.Л. Нарская // Известия вузов. Машиностроение. 2015. №8 (665).
10. **Макаров, В.С.** Определение характеристик микропрофиля дорог, предназначенных для движения транспортно-технологических машин / В.С. Макаров, К.О. Гончаров, В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, А.М. Беляев, А.В. Папунин, А.В. Редкозубов // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5.
11. **Малеев, С.И.** Аналитические исследования динамики подвески / С.И. Малеев, С.М. Огороднов, Е.В. Степанов, А.В. Пинчин // Современные наукоемкие технологии. 2019. №6. С. 88-95. DOI: 10.17513/snt.37555
12. **Шведов, А.С.** Теория вероятностей и математическая статистика / А.С. Шведов. – М.: Издат. дом ГУ ВШЭ, 2005. – 252 с.
13. **Адлер, Ю.П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

**Дата поступления  
в редакцию: 01.12.2021**



## НАШИ АВТОРЫ

### ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

**Балашова Татьяна Ивановна** – доцент  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

**Галкина Екатерина Дмитриевна** – аспирант  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева

**Логанов Сергей Викторович** – доцент  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

**Манцеров Сергей Александрович** – заведующая кафедрой «Автоматизация машиностроения» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент

**Михайлов Евгений Александрович** – старший научный сотрудник Физического Института им. П.Н. Лебедева РАН, ассистент МГУ им. М.В. Ломоносова, канд. физ.-мат. наук

**Савкин Артем Евгеньевич** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева

**Сидорова Елена Владимировна** – доцент  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

**Степанова Анастасия Павловна** – студентка МГУ им. М.В. Ломоносова

**Таранюк Антон Александрович** – студент МГУ им. М.В. Ломоносова

**Тимофеев Егор Ренатович** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева

**Тимофеева Ольга Павловна** – заведующая кафедрой «Информатика и системы управления» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

**Аркадов Геннадий Викторович** – заместитель директора Акционерного общества «Научно-технический центр «Диалпром», канд. техн. наук, канд. эк. наук

**Литвак Маргарита Михайловна** – начальник отдела разработки информационного обеспечения ООО «Инновационная фирма СНИИП АТОМ» (ИФ СНИИП АТОМ)

**Павелко Владимир Ильич** – заместитель директора Акционерного общества «Научно-технический центр «Диалпром», канд. техн. наук

**Поваров Владимир Петрович** – заместитель Генерального директора – директор филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС», д-р техн. наук

**Поваров Петр Владимирович** – начальник смены блока 4 очереди филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»

**Саляев Александр Васильевич** – начальник бюро отдела физических и теплогидравлических расчетов стационарных реакторных установок АО «ОКБМ Африкантов»

**Слепов Михаил Тимофеевич** – начальник отдела филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», канд. техн. наук

**Тихонов Александр Игоревич** – начальник смены блока 4 очереди филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»

**Тучков Максим Юрьевич** – начальник смены блока 4 очереди филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»

**Усынина Светлана Германовна** – ведущий инженер-конструктор отдела физических и теплогидравлических расчетов стационарных реакторных установок АО «ОКБМ Африкантов»

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ:  
ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ,  
ПРОИЗВОДСТВО**

**Аникин Алексей Александрович** – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Басманов Иван Вадимович** – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

**Беляков Владимир Викторович** – начальник Управления научно-исследовательских и инновационных работ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор

**Бушуева Марина Евгеньевна** – декан НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент

**Вольская Наталья Станиславовна** – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

**Евсеев Кирилл Борисович** – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

**Ерофеева Лариса Николаевна** – заведующая кафедрой «Высшая математика» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук, доцент

**Зарубин Дмитрий Николаевич** – инженер Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения НГТУ им. Р.Е. Алексеева

**Кулепов Виктор Федорович** – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Лебедев Денис Романович** – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

**Левенков Ярослав Юрьевич** – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

**Мазунова Лариса Николаевна** – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева

**Макаров Владимир Сергеевич** – профессор НГТУ 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 НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Пинчин Алексей Викторович** – инженер Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения НГТУ им. Р.Е. Алексеева»

**Порубов Дмитрий Михайлович** – ведущий инженер Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения НГТУ им. Р.Е. Алексеева

**Родин Артем Александрович** – инженер Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения НГТУ им. Р.Е. Алексеева

**Степанов Евгений Владимирович** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева

**Тумасов Антон Владимирович** – директор Института транспортных систем НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент

**Чичекин Илья Викторович** – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

**Ястребов Геннадий Юрьевич** – доцент Рубцовского индустриального института (филиала Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, канд. техн. наук

## ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ «ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

*Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, ауд. 1363-3*

*Телефон: 8(920)00-37-877*

*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 и 4-6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 7; минимальный объем статьи – 0,5 п.л.
- Статью необходимо сопроводить актом и протоколом экспортного контроля, экспертным заключением о возможности открытого опубликования, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию.
- Печатные экземпляры статей должны быть подписаны всеми авторами.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в порядке, отражающим их авторский вклад); аннотацию, ключевые слова.
- Аннотация (150-250 слов) отражает актуальность поставленной проблемы, цели исследования, методы, результаты, обозначение новизны, ключевые выводы.
- Ключевые слова (не менее 10) отражают тематическую направленность, объект и результаты исследования.
- Изложение материала должно быть логически выстроенным. Тематическая направленность представленного исследования должна строго соответствовать рубрике журналу. 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 выполняют строго в редакторе MS Equation 3-12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается. Использованию аббревиатур должна предшествовать их расшифровка.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы: (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel. Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображения выполняются в формате jpg или tif с разрешением 300 dpi. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисовочная подпись 11 жирный кегль, ссылки на рисунки: (рис. 1).

**РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПРИНИМАЮТСЯ:****05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации****05.13.17 Теоретические основы информатики**

Валерий Павлович Хранилов: hranilov@nntu.ru

**05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы**

Евгений Викторович Бычков: fae\_nir@nntu.ru

**05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и выход из эксплуатации**

Максим Александрович Легчанов: legchanov@nntu.ru

**05.05.03 Колесные и гусеничные машины**

Владимир Сергеевич Макаров: vladimir.makarov@nntu.ru

16+

**ТРУДЫ НГТУ  
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

**№ 1 (136)**

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**  
Технический редактор: **М.В. Прохорова**

*Редакция:*  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.  
rsl@nntu.ru  
Свободная цена

Подписано в печать: 25.03.2022. Дата выхода в свет 30.03.2022. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 7,50. Тираж 300 экз. Заказ .

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.  
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

**Индекс 44757**  
**Объединенный каталог «Пресса России»**

**Свидетельство о регистрации**  
**периодического печатного издания**  
**ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013 г.**