

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

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

*Журнал издается с 2010 года*

**№ 3 (134)**

**Нижний Новгород 2021**

УДК 050(06)  
ББК 9я54  
Т 78

Т 78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2021. №3(134).  
– 130 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**

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

### **УЧРЕДИТЕЛЬ**

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  
периодического печатного издания:*  
ПИ № ФС 77-56417

УДК 050(06)  
ББК 9я54

© Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2021

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

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

*Published since 2010*

**№ 3 (134)**

**Nizhny Novgorod 2021**

*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:  
ПН № ФС 77-56417*

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ .....</b>	<b>7</b>
<b>Булатов В.В., Пономарев А.Н.</b> Развитие теоретического метода в области нелинейного взаимодействия широкополосных световых волн в сложных средах .....	<b>7</b>
<b>Володченкова К.Б., Гиниятуллин Р.Р.</b> Моделирование многокомпонентных течений на произвольных неструктурированных сетках .....	<b>20</b>
<b>Галкин В.М., Мазунова Л.Н.</b> Повышение точности воспроизведения сигнала при цифро-аналоговом преобразовании .....	<b>32</b>
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ .....</b>	<b>41</b>
<b>Андреев Н.Г., Вавилкин В.Н.</b> Программа расчета уровней гамма-излучения остановленного реактора .....	<b>41</b>
<b>Анфимов А.М., Кирилов И.Н., Кузнецов Д.В., Рогожкин С.А.</b> Разработка расчетной модели реактора типа БН с системой расхолаживания через межпакетное пространство ТВС ...	<b>49</b>
<b>Бокова Т.А., Боков П.А., Волков Н.С., Маров А.Р., Баранова Л.В.</b> Экспериментальное исследование состояния пристенной области в кольцевом зазоре в системе «Вращающийся вал – ТЖМТ – стенка кронштейна» .....	<b>57</b>
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>68</b>
<b>Береснев П.О., Зарубин Д.Н., Тюгин Д.Ю., Мишустов В.П., Филатов В.И., Порубов Д.М.</b> Разработка системы контроля слепых зон для коммерческих транспортных средств ....	<b>68</b>
<b>Верещагин С.Б.</b> Основы проектирования средств тепловой защиты кабин и обитаемых отсеков .....	<b>81</b>
<b>Горожанкин С.А., Савенков Н.В.</b> Оптимизация движения автобусов категории м <sub>3</sub> на основе загородных ездовых циклов .....	<b>86</b>
<b>Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Карташов А.Б., Наказной И.О.</b> Расчет устойчивости колесной валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины на опрокидывание .....	<b>99</b>
<b>Куклина И.Г., Мокеров Д.С.</b> Автоматизация исследований колебаний машины с двигателями типа «шнек-ротор» .....	<b>107</b>
<b>Умирзоков А.М., Гоибов Н.Р., Сайдуллозода С.С., Бердиев А.Л.</b> Оценка сети автомобильных дорог республики Таджикистан .....	<b>117</b>
<b>НАШИ АВТОРЫ .....</b>	<b>125</b>

## CONTENTS

<b>INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS .....</b>	<b>7</b>
<b>Bulatov V.V., Ponomarev A.N.</b> The development of the theoretical method in nonlinear interaction of wideband light waves in complex media .....	7
<b>Volodchenkova K.B., Giniyatullin R.R.</b> Simulating multicomponent flows on arbitrary unstructured meshes .....	20
<b>Galkin V.M., Mazunova L.N.</b> Increasing the signal presentation accuracy during digital-to-analog conversion .....	32
<b>ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES .....</b>	<b>41</b>
<b>Andreev N.G., Vavilkin V.N.</b> Program for calculation the gamma radiation levels of a shutdown reactor .....	41
<b>Anfimov A.M., Kirilov I.N., Kuznetsov D.V., Rogozhkin S.A.</b> The development of the computational model of a fast-neutron reactor with a system for heat removal through the fuel assembly interwrapper space .....	49
<b>Bokova T.A., Bokov P.A., Volkov N.S., Marov A.R., Baranova L.V.</b> Experimental study of the wall area state in annular gap in «Rotating shaft – HLMC – Bracket wall» system .....	57
<b>MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION .....</b>	<b>68</b>
<b>Beresnev P.O., Zarubin D.N., Tyugin D.Yu., Mishustov V.P., Filatov V.I., Porubov D.M.</b> Developing a system for controlling blind spots for commercial transport vehicles .....	68
<b>Vereshchagin S.B.</b> Basics of designing means for thermal protection of cabins and crew modules .....	81
<b>Gorozhankin S.A., Savenkov N.V.</b> Optimization of category M <sub>3</sub> bus movement based on extra-urban driving cycles .....	86
<b>Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Kartashov A.B., Nakaznoy I.O.</b> Calculating the resistance against overturning of a wheeled feller-delimber-slasher machine .....	99
<b>Kuklina I.G., Mokerov D.S.</b> Automating investigations in the vibrations of a machine with screw-rotor propulsion units .....	107
<b>A.M. Umirzokov, N.R. Goibov, S.S. Saidullozoda, A.L. Berdiev</b> Appraisal of the road network in the republic of Tajikistan .....	117
<b>AUTHORS .....</b>	<b>125</b>

---

# ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

---

УДК 621.373.826

DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_7

## РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА В ОБЛАСТИ НЕЛИНЕЙНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СВЕТОВЫХ ВОЛН В СЛОЖНЫХ СРЕДАХ

**В.В. Булатов**ORCID: 0000-0002-4390-4013 e-mail: [internalwave@mail.ru](mailto:internalwave@mail.ru)

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

*Москва, Россия***А.Н. Пономарев**ORCID: 0000-0003-2814-6776 e-mail: [holodel@yandex.ru](mailto:holodel@yandex.ru)

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

*Москва, Россия*

Представлено теоретическое исследование нелинейного взаимодействия широкополосных пучков света с учетом шума спонтанного рассеяния для случая вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ). Использование схемы с многократным пересечением лазерного излучения позволяет получить высокий коэффициент отражения с усилением значительно больше единицы для слабого светового сигнала. Изучено влияние спонтанного рассеяния нелинейной среды на характеристики параметрического возбуждения, получены оценки коэффициентов отражения и ограничения чувствительности.

Показана возможность применения параметрической генерации ВРМБ в схеме с пересечениями сигнальной и опорной волн в устройствах для обращения слабых световых волн. Проведен учет влияния спонтанного рассеяния нелинейной среды на характеристики параметрического возбуждения и сделаны оценки коэффициентов отражения и ограничения чувствительности. Результаты исследования актуальны при построении сложных информационных систем, преобразующих измеряемые значения физических величин в оптические сигналы, передаваемые по оптическому волокну.

**Ключевые слова:** вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна, параметрическая генерация, лазерное излучение, нелинейная среда.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Булатов, В.В. Развитие теоретического метода в области нелинейного взаимодействия широкополосных световых волн в сложных средах / В.В. Булатов, А.Н. Пономарев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2021. № 3. С. 7-19. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_7

## THE DEVELOPMENT OF THE THEORETICAL METHOD IN NONLINEAR INTERACTION OF WIDEBAND LIGHT WAVES IN COMPLEX MEDIA

**V.V. Bulatov**ORCID: 0000-0002-4390-4013 e-mail: [internalwave@mail.ru](mailto:internalwave@mail.ru)

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS

*Moscow, Russia***A.N. Ponomarev**ORCID: 0000-0003-2814-6776 e-mail: [holodel@yandex.ru](mailto:holodel@yandex.ru)

Moscow State Technical University named after N.E. Bauman

*Moscow, Russia*

**Abstract.** Theoretical research in the nonlinear interaction of wideband light beams with account of the noise of spontaneous scattering for the case of stimulated Mandelstam-Brillouin scattering (SMBS) is presented. Using a scheme with multiple intersection of laser emission yields a high reflection coefficient with amplification far greater than unity for a weak light signal. The impact of spontaneous scattering of a nonlinear medium on the characteristics of parametric excitation is studied, and estimates of reflection and sensitivity limitation coefficients are obtained.

The possibility of using parametric SMBS generation in a scheme with intersection of the signal and reference waves in devices for conjugation of weak light waves is shown. The impact of spontaneous scattering of a nonlinear medium on the characteristics of parametric excitation are taken into account, and reflection and sensitivity limitation coefficients are estimated. The research findings are relevant for building complex information systems that transform measured physical quantities into optical signals transmitted over optical fibers.

**Key words:** stimulated Mandelstam-Brillouin scattering, parametric generation, laser emission, nonlinear medium.

**FOR CITATION:** V.V. Bulatov, A.N. Ponomarev. The development of the theoretical method in nonlinear interaction of wideband light waves in complex media. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 3. Pp. 7-19.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_7

## Введение

Проблема исправления или восстановления волнового фронта актуальна в сложных информационных системах в сфере астрономии, лазерной локации, офтальмологии и других областях, требующих получения оптического изображения высокого разрешения и качества. Искажения волнового фронта неизбежно возникают при прохождении излучения через неоднородную среду, которой, в частности, являются световолоконные кабели и атмосфера. Подобные искажения приводят к ухудшению оптического изображения, изменению контрастности. Для устранения нерегулярных динамических искажений разрабатываются специальные оптические системы с использованием твердотельных лазеров, включающие приемник излучения, регистрирующий световые волны, устройство коррекции волнового фронта и систему управления. Для восстановления искажений волнового фронта может быть использован эффект обращения волнового фронта. Обращенный волновой фронт будет обратным по отношению к искаженному первичному лучу, и в результате наложения двух фронтов можно восстановить исходное изображение. В частности, при лазерной локации из-за атмосферной турбулентности излучение после прохождения нескольких километров превращается в сильно искаженное пятно, изменяющееся со временем. Отражаясь от объекта, оно еще сильнее искажается и может привести к ошибке в работе. В случае использования обращения волнового фронта, отраженного от объекта излучения, направляемого обратно по тому же самому пути через атмосферу, при отсутствии значительных изменений условий прохождения луча происходит восстановление качества пятна на объекте.

В настоящее время компактные твердотельные лазеры с диодной накачкой широко применяются в медицине, лазерной локации, оптической связи, сложных информационных системах и в других областях науки и техники [1-3]. При прохождении излучения через среду, которая, как правило, оптически неоднородна, происходят фазовые искажения волнового фронта, приводящие, в том числе, к существенной потере информации. В силу этого обстоятельства возникают случаи, когда требуется делать компенсацию указанных искажений в режиме реального времени. Поэтому необходимо разрабатывать соответствующие оптические устройства, обладающие указанными свойствами. Поскольку вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ) обладает малой инерционностью, что является одним из необходимых условий для обработки оптического сигнала в реальном времени, на основе применения данного явления можно разработать устройство, удовлетворяющее поставленным требованиям. Также для использования оптического устройства в лазерной локации необходимо, чтобы оно могло работать в определенном интервале частот, обусловленном доплеровским смещением частоты отраженного сигнала от движущегося объекта, скорость которого может быть достаточно велика. При этом, поскольку принимаемый отраженный



сигнал обычно имеет очень слабую интенсивность, устройство должно быть способным работать с сигналами низкой интенсивности. Для соответствия данным требованиям можно использовать эффект обращения волнового фронта (ОВФ), получаемый с применением свойства нелинейности ВРМБ. В [4] была экспериментально показана возможность ОВФ для слабых световых сигналов. Однако для получения ОВФ здесь использовались две сопряженные опорные волны, что, во-первых, усложняет техническую реализацию устройства, во-вторых, ограничивает область изменения отраженной волны шириной линии спонтанного ВРМБ, которое обычно бывает порядка  $10^{-2}$  см<sup>-1</sup>. Последнее условие накладывает ограничение на скорость объекта лазерной локации – не более 100 м/с, что значительно сужает область использования.

В работе теоретически показано, что в случае параметрического ВРМБ в пересекающихся световых пучках можно получить высокую эффективность отражения без применения двух сопряженных опорных волн. Также изучено влияние ширины спектра как лазерного излучения накачки, так и отраженной (сигнальной) слабой волны на коэффициент отражения нелинейной среды. Рассмотрены случаи, когда одна или обе волны лазерной накачки и отраженной являются широкополосными.

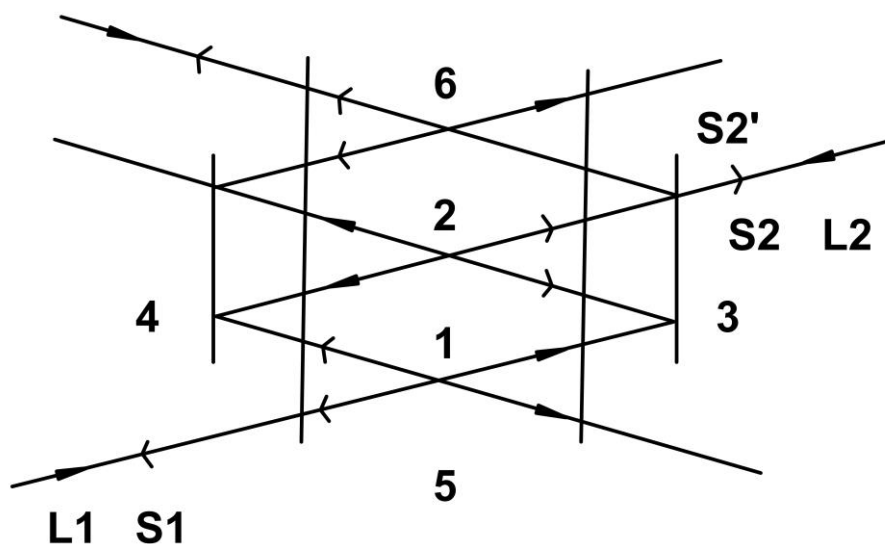


Рис. 1. Схема параметрической генерации ВРМБ для трех пересечений

Fig. 1. Scheme of parametric SMBS generation for three intersections

#### Случай одинаковых частот излучение накачки и сигнальной волны

Рассмотрим схему параметрической генерации (рис. 1), где L1 и L2 обозначают лазерное излучение накачки, а S1 и S2 – обращенные по отношению к L1 и L2 возбуждаемые стоксовы волны. В приведенной схеме в пересечении 1 при наличии излучения S1 происходит параметрическое возбуждение излучения S2, которое, в свою очередь, сопряжено с L2. Излучение S2 после отражения от зеркала 4 попадает в пересечение 2, что и обуславливает параметрическое возбуждение излучения S1, которое, отражаясь от зеркала 3, возвращается в пересечение 1. Цифрой 5 отмечена нелинейная среда. Поэтому вышеописанным способом в приведенной схеме образуется обратная связь. В случае использования схемы с тремя пересечениями, которая приведена на рис.1, цифрой 6 отмечено третье пересечение, коэффициент обратной связи будет больше. В схемах, использующих нелинейность обратного ВРМБ, волны S1 и S2 распространяются в нелинейной среде в одном направлении,

поэтому параметрическая неустойчивость в случае только одного пересечения невозможна и применение двух или более пересечений необходимо. Значения полей S1 и S2 на выходе из системы находятся в результате последовательного расчета отдельных пересечений с учетом граничных условий, содержащих обмен излучения соседних пересечений [5]. Начнем решение задачи с условия равных монохроматических волн:  $\omega_{L1} = \omega_{L2} = \omega_L$ . Рассматривается случай малых углов между пересекающимися лучами. Согласно [5], пороговое условие для параметрической генерации можно записать в виде (1):

$$F(I_{L1}, I_{L2}, \omega_s) = 1. \quad (1)$$

Здесь F означает некую комплексную функцию,  $I_{L1}$  и  $I_{L2}$  – интенсивности излучений L1 и L2. Рассмотрим случай, когда  $I_{L1} \approx I_{L2}$ . Поскольку F определяет амплитудное и фазовое условие для параметрической генерации, то очевидно, что  $F(I_{L1}, 0, \omega_s) = 0$ . Тогда, если известна интенсивность  $I_{L1}$ , уравнение (1) задает пороговую интенсивность другой волны  $I_{L2}$  и частоту генерации  $\omega_s$ . При двух пересечениях ( $N = 2$ ) условие параметрической генерации имеет следующий вид [6] (2):

$$F = (M-1)^2 M^2 a^{(1+a)^2} \exp(i\Omega\tau). \quad (2)$$

Здесь  $M = \exp((\chi_1 + \chi_2)I)$ ,  $\chi_1 = b I_{L1}(1 + i\rho)/2(1 + \rho^2)$ ,  $\chi_2 = b I_{L2}(1 + I)(1 + \rho^2)/2$   $b$  – удельный коэффициент усиления ВРМБ,  $I_{L1}$  и  $I_{L2}$  – интенсивности соответствующих лучей L1 и L2,  $\rho = 2(\Omega - \Omega_0)/\Delta\Omega$ ,  $\Omega = \omega_L - \omega_s$ ,  $\Delta\Omega$  – ширина линии спонтанного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна,  $\Omega_0$  – резонансная частота фоновой волны,  $I$  – длина пути излучения в нелинейной среде в каждом пересечении,  $a = I_{L2}/I_{L1}$ . Уравнение (2) получено для случая, когда  $\tau = \tau_m$ , где  $\tau = \tau' + \tau''$  – времена пролетов между пересечениями 1 и 2 с последующим отражением от зеркал 3 и 4,  $\tau_m = 2\pi m/\Omega_0$ ,  $m = 1, 2, \dots$ . В этом случае генерация стоксового излучения происходит на центральной частоте ВРМБ:  $\omega_s = \omega_s^0 = \omega_L - \Omega_0$ . Для суммарного инкремента должно выполняться следующее условие:  $G_1 = 2bI I_{L1} \geq 2 \ln 2$ . Заметим, что при  $G_1 = 2 \ln 2$  порог для генерации L2 по интенсивности будет максимальным:  $I_{L1} = I_{L2}$ . При росте  $G_1$  происходит падение интенсивности  $I_{L2}$ , поэтому для обращения волнового фронта слабых сигналов следует обратить особое внимание на случай, когда  $G_1 \gg 1$  и, соответственно,  $I_{L2}$  мало (параметр  $a$  много меньше единицы). При  $\tau = \tau_m$ ,  $\rho = 0(\Omega = \Omega_0)$  для интенсивностей волн S1 и S2 после прохождения нелинейной среды запишем коэффициент отражения в виде:  $R_1 = I_{S1}^{6bx}/I_{L1}$  и  $R_2 = I_{S2}^{6bx}/I_{L2}$ . Тогда можно будет получить следующие соотношения (3-4):

$$\frac{I_{S2}^{6bx}}{I_{S1}^{6bx}} = \frac{(M-1)^2(M^3+1)^2 a(1+a)^2}{M^2(M+a)^4}, \quad (3)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{I_{S2}^{6bx}}{I_{S1}^{6bx}} \cdot \frac{1}{a} = \frac{(M-1)^2(M^3+1)^2(1+a)^2}{M^2(M+a)^4}. \quad (4)$$

В приведенных соотношениях  $M = \exp((G_1 + G_2)/4)$ , где  $G_2 = 2bI_{L2}l$ , параметр  $a$  можно найти с учетом (1) и (2), выразив через  $M$ . При  $\tau \ll \tau_1, \tau_2$ , когда  $\rho = 0$  результаты будут близки к случаю  $\tau = \tau_m$ . Для случая трех пересечений и  $\tau = \tau_m$  пороговое условие для генерации принимает вид [6]:  $F = (M-1)^2 M^2 (M^3 + 2)a(a+1)^{-2}$ . В общем случае для  $N$  пересечений суммарные инкременты будут равны:  $G_1 = bI_{L1}l_\Sigma$ ,  $G_2 = bI_{L2}l_\Sigma$ ,  $l_\Sigma = Nl$ . При

$\tau = \tau_m, \rho = 0$   $M = \exp((G_1 + G_2)/(2N)) \approx \exp(G_1)/(2N)$  так как  $a \ll 1, G_2 \ll G_1$ . При  $M^3 \gg 2$  и  $a \ll 1$  можно получить:  $F \approx (M - 1)^2 M^{3N-4} a$  и (5-6):

$$\frac{I_{S2}^{блх}}{I_{S1}^{блх}} \approx \frac{1}{M^N} \quad (5)$$

$$\frac{R_2}{R_1} \approx \frac{1}{M^N a} \approx (M - 1)^2 M^{2(N-2)} \quad (6)$$

Рассмотрим идеальный случай, когда  $N \gg 1, G_1 \ll N$  и рост стоковых волн, в реальности происходящий в области пересечения световых пучков, усредняется по всей длине прохождения излучения в активной среде. Тогда процесс можно описать с помощью введения неких гладких функций  $\xi_1, \xi_2$ , усреднено описывающих изменение волн  $S_1$  и  $S_2$  в результате прохождения нелинейной среды с учетом изменения фазы. Для указанных функций можно записать следующую систему уравнений [7] (7-8):

$$\frac{d\xi_1}{dz} = -2\chi_1 \xi_1 - \chi_2 (\xi_1 + \xi_2 \exp(i\Delta z)) \quad (7)$$

$$\frac{d\xi_2}{dz} = 2\chi_2 \xi_2 + \chi_1 (\xi_2 + \xi_1 \exp(-i\Delta z))$$

$$0 \leq Z \leq N, \Delta = \frac{\Omega \tau}{l}, |\xi_1| = \frac{|E_{S1}|}{|E_{L1}|}, |\xi_2| = \frac{|E_{S2}|}{|E_{L2}|} \quad (8)$$

Данный подход дает хорошее приближение в предельном случае при  $N \rightarrow \infty, \tau \rightarrow 0$ . Решение системы (7) определяет условие параметрической неустойчивости и позволяет оценить характеристики параметрической генерации. В случае  $\tau \ll \tau_1 = 2\pi/\Omega_0$  можно считать:  $\Delta Z \approx 0, \exp(\pm \Delta Z) = 1$ . При  $a^2 \ll 1$  пороговое условие принимает вид (1), где (9):

$$F = \frac{a}{9(1+8/9a)} \exp\left(\frac{3}{2}\left(1+\frac{7}{9}a\right)G_1\right) \quad (9)$$

При  $G_1 \gg 1$  выражение (9) принимает следующий вид (10):

$$F = \frac{1}{9} a \exp(3G_1/2) \quad (10)$$

Тогда отношение выходных интенсивностей и коэффициентов отражения можно представить в виде (11-12):

$$\frac{I_{S2}^{блх}}{I_{S1}^{блх}} = \left(1 + \frac{8}{9}a\right) \exp\left(-\frac{1}{2}(1-a)G_1\right) \approx \exp\left(-\frac{1}{2}G_1\right), \quad (11)$$

$$\frac{R_a}{R_1} = \frac{1}{9} \exp\left(\left(1 + \frac{5}{3}a\right)G_1\right) \approx \frac{1}{9} \exp(G_1) \quad (12)$$

Можно отметить, что значение в (11) совпадает с (5) в случае  $M \approx \exp(G_1/2N)$ .

Отсюда следует, что при больших  $G_1$  получим, что  $I_{S1}^{блх} \gg I_{S2}^{блх}$ . Из полученных результатов видно, что увеличение числа пересечений при постоянной  $G_1$  дает возможность заметно уменьшить величину пороговой интенсивности слабой волны и увеличить коэффициент отражения  $R_2$ .

### Учет истощения лазерной накачки и шума спонтанного рассеяния

При превышении значения интенсивности на входе порогового значения стационарная генерация начинает происходить в условиях истощения накачки, учет которого дает возможность, пренебрегая шумом спонтанного рассеяния, оценить величины абсолют-

ных значений интенсивности стоксовых волн и коэффициентов отражения. В случае незначительного истощения накачки условие стационарной генерации можно получить из (1), если за  $I_{L1}$  и  $I_{L2}$  взять интенсивности, усредненные по всей длине прохождения нелинейной среды. Оценки при  $G_1 \gg 1$ ,  $I_{L2}^{6x} \ll I_{L1}^{6x}$ ,  $\tau = \tau_m$ , показывают, что ослабление волн после прохождения пересечений примерно одинаково. Поэтому для усредненных значений интенсивностей можно считать  $I_{L1} \approx I_{L1}^{6bx}$ ,  $I_{L2} \approx I_{L2}^{6x}$  поскольку истощение волн L1 и L2 главным образом происходит в той области, где достигается большое значение интенсивности стоксового излучения  $I_{S1}$ , а именно вблизи границы нелинейной среды, где выходят волны S1, L2 и входит волна L1. Далее во всех ранее приведенных формулах под значениями  $I_{L1}$  и  $I_{L2}$  будем понимать среднее значение интенсивности. Поскольку  $I_{L2}^{6x} \ll I_{L1}^{6x}$  и  $I_{S2}^{6bx} \ll I_{S1}^{6x}$ , с учетом сохранения энергии можно записать (13):

$$I_{S1}^{6bx} \approx I_{L1}^{6x} - I_{L1}^{6bx}. \quad (13)$$

Применяя условие (1) при  $\tau = \tau_m$ ,  $\omega_s = \omega_s^o$  и  $I_{L1} \approx I_{L1}^{6bx}$ ,  $I_{L2} \approx I_{L2}^{6x}$ , можно получить (14):

$$I_{L1}^{6bx} \approx I_{L1} = I_{L1}(I_{L2}) \approx I_{L1}(I_{L2}^{6x}). \quad (14)$$

Таким образом, в данном случае значения интенсивности  $I_{L1}^{6bx}$  и средней интенсивности  $I_{L1}$  зависят от  $I_{L2}^{6x}$  и не зависят от  $I_{L1}^{6x}$ . Тогда из (13) и (14) можно найти (15):

$$I_{S1}^{6bx} \approx I_{L1}^{6x} - I_{L1}(I_{L2}^{6x}). \quad (15)$$

Из (15) видно, что значение выходной интенсивности S1 определяется превышением порога интенсивности накачки L1. Поэтому по двум известным значениям  $I_{L1}^{6x}$  и  $I_{L2}^{6x}$  можно найти средние значения интенсивностей  $I_{L1}$  и  $I_{L2}$ , затем выразить через них инкременты  $G_1$  и  $G_2$ , далее можно определить  $I_{S1}^{6bx}$  и  $R_1$ . Затем с помощью выражений для  $I_{S2}^{6bx} / I_{S1}^{6bx}$  и  $R_2 / R_1$  находятся  $I_{S2}^{6bx}$  и  $R_2$ . При околороговом значении генерации для интенсивностей  $I_{S1} \sim 0$ ,  $I_{S2} \sim 0$  и  $R_1 \sim 0$ ,  $R_2 \sim 0$ , поэтому для получения  $R_2 \gg 1$  требуется заметное превышения порога.

Рассмотрим далее случай, когда  $I_{L1}^{6x} = \text{const}$  и превышение порога достигается за счет увеличения интенсивности сигнальной волны  $I_{L2}^{6x}$ . Тогда, согласно (14) и (15), значения интенсивности  $I_{L1}$  и инкремента  $G_1$  уменьшаются, а значения  $I_{S1}^{6bx}$  и  $R_1$  увеличиваются. Увеличение  $I_{S1}^{6bx}$  и уменьшение  $G_1$  вызывает в соответствии с (5) и (11) увеличение  $I_{S2}^{6bx}$ . Значения  $R_2$  в соответствии с (6) и (12) сначала возрастают из-за увеличения  $R_1$ , а затем начинают уменьшаться, так как уменьшается значение  $G_1$ . Максимальное значение  $R_2$  при  $N \rightarrow \infty$  достигается при  $G_1 = G_1^{(m)} = 2/(1-K)$ ,  $K = \sqrt{1 - \frac{4}{G_1^{6x}}}$ ,  $G_1^{6x} = bI_{L1}^{6x}I_{L2}$ ,  $R_1 = R_1^{(m)} = \frac{1}{G_1^{(m)} - 1}$ ,

$$I_{L2}^{6x} = I_{L2}^{6x(m)} \approx I_{L2}(I_{L2}^{(m)}).$$

Тогда для максимального значения интенсивности сигнальной волны  $I_{L2}^{6x(m)}$  и  $I_{L2}(I_{L1}^{6x})$  получим (16):

$$I_{L2}^{6x(m)} = I_{L2}(I_{L1}^{6x}) \frac{G_1^{(m)}}{G_1^{6x}} \exp\left(\frac{3}{2}(G_1^{6x} - G_1^{(m)})\right). \quad (16)$$

Наибольшее значение для  $R_{2\text{max}}$  равно (17):

$$R_{2\max} = \frac{1}{9(G_1^{(m)} - 1)} \exp(G_1^{(m)}). \quad (17)$$

При  $G_1^{\text{BX}} = 20$ ,  $G_1^{(m)} = 19$  из (16) получим  $I_{L2}^{\text{BX}(m)} \sim 4,3 I_{L2}(I_{L1}^{\text{BX}})$ . При росте  $G_1^{\text{BX}}$  также будет увеличиваться и значение  $R_{2\max}$ , но  $I_{S2}^{\text{ВЫХ}(m)}$  будет уменьшаться вследствие уменьшения  $I_{L2}(I_{L1}^{\text{BX}})$ . При больших значениях  $G_1$  требуется учитывать шум спонтанного рассеяния, что ведет к определенным изменениям в описанном выше процессе параметрической генерации. В случае учета спонтанного шума линия генерации будет иметь конечную ширину и возбуждение стоксовой компоненты излучения S1 наблюдается и без присутствия сигнальной волны L2. В этом случае при малых значениях интенсивности  $I_{L2}$  значения интенсивности  $I_{S1}$  перестает зависеть от  $I_{L2}$ , и возбуждение стоксовой компоненты S1 становится беспороговым.

Возбуждение необращенной стоксовой волны S2, которое происходит в результате взаимодействия волны L1 с шумом спонтанного рассеяния, определяет значение предельной чувствительности устройства. При больших значениях  $G_1$  интенсивность стоксовой волны S2 становится существенной и ограничивает возможность уменьшения интенсивности  $I_{L2}$ . Пороговое условие (1) при учете спонтанного шума не выполняется, но может быть использовано для оценки близости к режиму условного «идеального» генератора. Рассмотрим результаты расчетов для случая, когда число пересечений  $N \rightarrow \infty$ ,  $G_1 \gg 1$  и  $\tau_\Sigma \ll \tau_1$ . Для F можно использовать выражение (10). Введем спектральные плотности интенсивностей стоксовых компонент (18):

$$J_{S2}^{\text{блх}}(\omega_s) = J_{S1}^{\text{блх}}(\omega_s) |F| \exp(-G_1(\rho)/2). \quad (18)$$

$$G_1(\rho) = \frac{G_1}{1 + \rho^2}$$

Тогда с учетом (10)  $J_{S2}^{\text{блх}}(\omega_s)$  можно записать в виде (19):

$$J_{S1}^{\text{блх}}(L_0 S) = J_{S1}^{\text{блх}}(\omega_s) \frac{a}{9} \exp(G_1(\rho)). \quad (19)$$

Используя выражение (18) получаем (20):

$$\frac{J_{S2}^{\text{блх}}(\omega_s^0)}{J_{S1}^{\text{блх}}(\omega_s^0)} = F(I_{L1}, I_{L2}, \omega_s^0) \exp(-G_1/2). \quad (20)$$

Видно, что при  $F = 1$  полученное выражение совпадает с отношением интенсивностей, полученных в (11). Введем при вышеуказанных предположениях параметр  $F_0$  следующим образом (21):

$$F_0 = F(I_{L1}, I_{L2}, \omega_s^0) = \frac{I_{L2}}{I_{L2}(I_{L1})}. \quad (21)$$

Определенный (21) параметр  $F_0$  характеризует степень близости устройства к режиму «идеального» генератора. Из (18), используя  $F_0$ , можно получить ширину спектральной линии волны S1 на выходе из устройства (22):

$$\Delta\omega_{S1} \approx \Delta\Omega \frac{1 - F_0}{\mu G \sqrt{F_0}}, \quad (22)$$

где  $\mu = 1.5$ . Полученное выражение (22) может использоваться при  $0,2 \leq F_0 < 1$ . Форма линии  $J_{S1}^{\text{ВЫХ}}(\omega_s)$  в указанном диапазоне  $F_0$  зависит от величины  $F_0$ . В случае  $F_0 \sim 1$  форма спектральной линии имеет лоренцевский вид. Распределение спектральной плотности  $J_{S2}^{\text{ВЫХ}}(\omega_s)$  в соответствии с (19) будет уже, чем спектральная линия  $J_{S1}^{\text{ВЫХ}}(\omega_s)$ , но для  $\Delta\omega_{S1} \ll \Delta\Omega, \rho \ll 1$  это сужение незначительно, и  $\Delta\omega_{S2}$  можно положить равным  $\Delta\omega_{S1}$ . Интег-

рируя (18) по  $\omega_s$ , можно найти  $I_{S1}^{БВХ}$ . Значения  $I_{L1}$  и  $I_{L2}$  можно найти при заданных внешних параметрах  $I_{L1}^{БВХ}$  и  $I_{L2}^{БВХ}$ . В случае незначительного истощения волны накачки получим  $I_{L2} \sim I_{L2}^{БВХ}$ ,  $I_{L1} \sim I_{L1}^{БВХ} = I_{L1}^{БВХ} - I_{S1}^{БВХ}$ . Так как  $I_{S1}^{БВХ}$  зависит от  $I_{L1}$ , мы получили уравнение для нахождения  $I_{L1}$ .

### Случай различных частот излучение накачки и сигнальной волны

Будем рассматривать случай отличных частот сигнальной волны  $\omega_{L2}$  и излучения накачки  $\omega_{L1}$  без учета влияния шума спонтанного рассеяния. Тогда при  $|\omega_{L1} - \omega_{L2}| \geq \Delta\Omega$  параметрическое возбуждение полей S1 и S2, сопряженных с лучами L1 и L2, будет происходить на частотах  $\omega_{S1} = \omega_{L1} - \Omega$ ,  $\omega_{S2} = \omega_{L2} - \Omega$ . Будем искать значения полей стоксового рассеяния  $E_{S1}$  и  $E_{S2}$  в отдельном пересечении волн в виде обращенных по отношению к полям накачки (23):

$$\begin{aligned} E_{S1}(\mathbf{r}) &= f_1(z) \exp(-i(k_{L1} - k_{S1})z) E_{L1}^*(\mathbf{r}), \\ E_{S2}(\mathbf{r}) &= f_2(z) \exp(-i(k_{L2} - k_{S2})z) E_{L2}^*(\mathbf{r}) \end{aligned}, \quad (23)$$

где  $k_{L1} = (\omega_{L1} n_{L1})/c$ ,  $k_{L2} = (\omega_{L2} n_{L2})/c$ ,  $k_{S1} = (\omega_{S1} n_{S1})/c$ ,  $k_{S2} = (\omega_{S2} n_{S2})/c$ ,  $n_{L1}, n_{L2}, n_{S1}, n_{S2}$  – показатели преломления. Пренебрегая осциллирующей некогерентной частью параметрического усиления, получим следующую систему уравнений (24):

$$\begin{aligned} \frac{df_1}{dz} &= -\chi_2(f_1 + f_2 \exp(2i\delta_{12}z)) \\ \frac{df_2}{dz} &= -\chi_1(f_2 + f_1 \exp(2i\delta_{21}z)) \end{aligned}, \quad (24)$$

где  $\delta_{12} = k_{L1} - k_{L2}$ ,  $\delta_{21} = k_{L2} - k_{L1}$ . Будем рассматривать случай незначительной расстройки:  $2|\delta_{12}l| \ll \pi$ ,  $2|\delta_{21}l| \ll \pi$ . Тогда  $\exp(2i\delta_{12}l) \approx 1$ ,  $\exp(2i\delta_{21}l) \approx 1$ . В этом случае, решая (24) для двух пересечений с граничными условиями, содержащими обмен излучения между пересечениями, получаем пороговое условие для параметрической генерации (25):

$$F = (M - 1)^2 a(1 + a)^{-2} \exp(i(\Omega' \tau' + \Omega'' \tau'')) = 1, \quad (25)$$

где  $\Omega' = \Omega + (\omega_{L1} - \omega_{L2})$ ,  $\Omega'' = \Omega - (\omega_{L1} - \omega_{L2})$ . При симметричном расположении нелинейной среды между зеркалами 3 и 4 (рис. 1), и из (25) получаем  $\tau' = \tau''$ , откуда (26):

$$F = (M - 1)^2 a(1 + a)^{-2} \exp(i\Omega\tau) = 1. \quad (26)$$

При  $\tau = \tau_m$  из (26) находим  $\Omega = \Omega_0$ ,  $\omega_{S1} = \omega_{L2} - \Omega_0$  и  $\omega_{S2} = \omega_{L1} - \Omega_0$ . Параметрическая генерация будет возможна при значении суммарного инкремента  $G \geq 2\ln 3$ . При минимальном значении  $G_1$  порог по интенсивности сигнальной волны будет максимален:  $I_{L2} = I_{L1}$ . При увеличении  $G_1$  происходит быстрое уменьшение значения интенсивности  $I_{L2}$ . Далее можно записать (27-28):

$$\frac{I_{S2}^{БВХ}}{I_{S1}^{БВХ}} = \frac{(M + a)^4}{(1 + a)^4 (M + 1)^2}, \quad (27)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{(M + a)^4}{(1 + a)^4 (M + 1)^2 a}. \quad (28)$$

Для случая  $N$  пересечений при  $\tau = \tau''$ ,  $\tau = \tau_m$ ,  $M \gg 2$ ,  $a \ll 1$ , можно записать (29-31):

$$F \approx (M - 1)^2 M^{N-2} \cdot a, \quad (29)$$

$$\frac{I_{S2}^{6bx}}{I_{S1}^{6bx}} \approx M^N, \quad (30)$$

$$\frac{R_2}{R_1} \approx \frac{M^N}{a} \approx (M - 1)^2 M^{2(N-1)}. \quad (31)$$

При  $N \rightarrow \infty, I \rightarrow 0, \tau = \tau''$  система дифференциальных уравнений будет следующей (32):

$$\begin{aligned} \frac{d\xi_1}{dz} &= -\chi_2(\xi_1 + \xi_2 \exp(i\Delta z)) \\ \frac{d\xi_2}{dz} &= \chi_1(\xi_2 + \xi_1 \exp(i\Delta z)) \end{aligned} \quad (32)$$

Приведем результаты для случая  $\tau_2 \ll \tau_1$ , когда в (32) можно считать  $\exp(\pm i\Delta z) = 1$ . Тогда пороговые условия для параметрической генерации можно записать (33):

$$F = a \exp((1 - a)G_1 / 2). \quad (33)$$

Отношение выходных интенсивностей стоксовых волн  $S_1$  и  $S_2$ , а также коэффициентов отражения имеет вид (34-35):

$$\frac{I_{S2}^{6bx}}{I_{S1}^{6bx}} = \exp\left(\frac{1}{2}(1 - a)G_1\right) = \frac{1}{a}, \quad (34)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \exp((1 - a)G_1) = \frac{1}{a^2}. \quad (35)$$

Таким образом, при одинаковых  $G_1$  пороговая интенсивность сигнальной волны заметно выше, чем в ранее рассмотренном случае равных частот для  $L1$  и  $L2$ . Учет истощения накачки проводится аналогично ранее исследованному случаю при равенстве частот опорной и сигнальной волн. Ослабление волн  $L1$  и  $L2$  после прохождения нелинейной среды будет примерно одинаковым, но теперь средняя интенсивность  $I_{L1} \approx I_{L2}$ . Последнее обусловлено тем, что истощение волны  $L1$  происходит при взаимодействии с волной  $S2$ , которая имеет высокую интенсивность около выхода  $L1$ . Знание значения  $I_{L1}^{6bx}$  позволяет определить средние значения интенсивностей  $I_{L1} \approx I_{L1}^{6x}$ ,  $I_{L2} \approx I_{L2}(I_{L1}^{6x})$  и  $I_{L2}^{6bx} \approx I_{L2}$ . Введем коэффициент преобразования  $\eta = I_{S2}^{6bx} / I_{L1}^{6x}$ . Тогда в случае  $\eta$  заметно меньше 1 можно будет записать

$I_{L2}^{6x} \approx (1 - \eta)^{-1} I_{L2}(I_{L2}^{6x})$  и коэффициент отражения  $R_2$  получим в виде (36):

$$R_2 = \frac{\eta}{a}. \quad (36)$$

Здесь  $a = a(L_{L1}^{6x})$  может быть определено из (1). Укажем, что для случая, когда  $N \rightarrow \infty$ , используя (33) при  $G_1$  много больше единицы, можно получить (37-38):

$$a = \frac{I_{L2}(I_{L1})}{I_{L1}} \approx \exp(-G_1 / 2), \quad (37)$$

$$R_2 \approx \eta \exp(G_1 / 2). \quad (38)$$

Присутствие в реальном устройстве шума спонтанного рассеяния ограничивает значение  $G_1$ , поскольку в случае больших  $G_1$  будет значительной интенсивность волны  $S1'$ , возбуждаемой опорной волной  $L1$  из спонтанного шума, и которая не участвует в параметриче-

ском взаимодействии из-за неподходящего смещения частоты относительно  $\omega_{L2}$ . Но при этом генерация S1 приводит к истощению опорной волны L1. Условие  $I'_{S1}{}^{6bx} \ll I_{L1}$  вызывает ограничение  $G_1 \approx 15-16$ . При  $G_1 = 16$  и  $\eta = 0.3$  из (37), (39) получаем оценку для  $a \sim 5 \cdot 10^{-4}$  и  $R_2 = 10^3$ . Поскольку L2 не взаимодействует с S1', то беспороговое возбуждение S2 не происходит. Для  $G_1 \geq 10$  получим  $I'_{S2}{}^{6bx} \ll I_{S1}{}^{6bx}$  и с учетом  $I'_{S1}{}^{6bx} \ll I_{L1}$ , при не слишком малом коэффициенте преобразования  $\eta$  получаем  $I'_{S2}{}^{6bx} \ll I_{S2}{}^{6bx}$ , поэтому зашумление стоксовой волны S2 несущественно. Таким образом, мы получили, что учет спонтанного шума незначительно влияет на характеристики параметрической генерации, поэтому последние будут близки к ранее упоминавшийся модели «идеального» генератора.

### Учет влияния ширины спектра опорной и сигнальной волн

Рассмотрим случай, когда одна или одновременно две волны L1 и L2 имеют ширину спектра, существенно превышающую  $\Delta\Omega$ . Тогда кроме пространственной когерентности требуется выполнение условия:  $\Delta\omega_L \ll 2\pi c/l_{nL}$ , где  $\omega_L$  – интервал, охватывающий спектральные распределения обеих волн. В этом случае при  $\tau' = \tau''$  и  $\tau = \tau_m$  в каждом пересечении имеет место корреляция огибающих волн S2 с L1 и S1 с L2. Поэтому будет происходить параметрическое взаимодействие на синхронно возбуждаемой фоновой волне. В случае широкополосной волны накачки L1 возбуждение S1 не будет эффективным при  $\Delta\omega_{L1} \geq 2\pi/\tau$ , когда длина когерентности опорной волны  $l_{ког} = 2\pi c/n_{L1}\Delta\omega_{L1}$  меньше расстояния между соседними пересечениями [4], и при  $G_1 < 2\pi n_L/l_{ког}$ , когда  $I_{L1}$  оказывается меньше критического значения интенсивности волны широкополосной накачки. Данное обстоятельство дает возможность увеличить значение  $G_1$  до порога необращенной волны S2, которая при всех перечисленных условиях усиливается аналогично случаю, когда излучение опорной волны является монохроматическим. Взяв значение  $G_1$  в пределах 22-24 в результате расчета получим оценку для коэффициента отражения  $R_2 \sim 10^5$ .

### Общие принципы построения асимптотических решений

При решении рассмотренных задач возникает необходимость асимптотического исследования быстроосциллирующих интегралов (БОИ). Проблемы вычисления коротковолновых асимптотик БОИ возникают в задачах дифракции, распространения электромагнитных волн в ионосфере и магнитосфере Земли и планет, дифракции лазерного излучения на локальных неоднородностях среды и СВЧ-излучения на телах сложной формы, распространения электромагнитного импульса при радиолокации, распространения акустических и внутренних гравитационных волн в атмосфере и океана, сейсмических волн в земной коре [8, 9]. Практическое значение асимптотических методов не ограничивается вопросами теории волновой дифракции, так как аналогичные БОИ возникают также в задачах квантовой механики, например, в физической кинематике и в квантово-механической теории соударений [10, 11].

Под БОИ понимаются интегралы следующего вида:  $u(\lambda, \alpha) = \int_C f(\mathbf{p}, \alpha) \exp(i\lambda\Phi(\mathbf{p}, \alpha)) d\mathbf{p}$ ,

где  $\mathbf{p} \in R^M$ , ( $M = 1, 2, 3, \dots$ ),  $\Phi$  – аналитическая функция переменных  $\mathbf{p}$ ,  $f$  – кусочно-бесконечно-дифференцируемая функция переменных  $\mathbf{p}$ , функции  $\Phi, f$  предполагающаяся кусочно-гладкой граница области интегрирования  $C$  зависит от набора параметров  $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)$ . В качестве таких параметров могут выступать, например, координаты точки наблюдения и источника, также и другие параметры рассматриваемой конкретной задачи.



Алгоритмы определения этой асимптотики сводятся к следующему. Вводится понятие критических точек, к которым, в частности, относятся: 1) стационарные (седловые) точки фазовой функции  $\Phi(\mathbf{p}, \boldsymbol{\alpha})$ , т.е. точки, в которых  $\mathop{\text{grad}}_{\mathbf{p}} \Phi(\mathbf{p}, \boldsymbol{\alpha}) = 0$ , если при этом  $\det\left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial p_i \partial p_j}\right] \neq 0$ ,

то стационарные (седловые) точки называются регулярными; 2) особые точки (полюсы, точки ветвления) внеэкспоненциальной функции  $f(\mathbf{p}, \boldsymbol{\alpha})$ ; 3) критические точки на границе области  $S$ ; 4) точки, в которых  $\mathop{\text{grad}}_{\mathbf{p}} \Phi(\mathbf{p}, \boldsymbol{\alpha})$  перпендикулярен границе; 5) угловые точки гра-

ницы. Асимптотика  $u(\lambda, \boldsymbol{\alpha})$  при  $\lambda \rightarrow \infty$  является суммой вкладов  $u_j$  от каждой критической  $p_j$ . В главном члене асимптотики  $u_j \approx \lambda^{-q} \Psi(p_j) f(p_j, \boldsymbol{\alpha}) \exp(i\lambda \Phi(p_j, \boldsymbol{\alpha}))$ , где показатель  $q$  определяется типом критической точки  $p_j$  [10, 11]. Например, в задачах дифракции  $u(\lambda, \boldsymbol{\alpha})$  представляет собой значение поля в точке  $\boldsymbol{\alpha}$ . Согласно интерпретации асимптотики интеграла в соответствии с методом геометрической оптики (геометрической теории дифракции) каждой критической точке  $p_j$  соответствует проходящий через  $\boldsymbol{\alpha}$  луч какого-либо из слагаемых суммарного поля; при этом  $\Phi(p_j, \boldsymbol{\alpha})$  – фаза соответствующей волны,

$\lambda^{-q} \Psi(p_j) f(p_j, \boldsymbol{\alpha})$  – амплитуда волны. Однако, описанный алгоритм становится непригодным, когда при изменении параметров  $\boldsymbol{\alpha}$  критические точки приближаются друг к другу, сливаются, исчезают или возникают заново. Например, если точка наблюдения приближается к каустике (поверхности, на которой не выполняется условие  $\det\left[\frac{\partial^2 \Phi}{\partial p_i \partial p_j}\right] \neq 0$ ), то

критические точки  $p_1, p_2$ , соответствующие лучу, еще не коснувшемуся каустики и уже прошедшему через каустику, приближаются друг к другу; сливаются, когда точка наблюдения ложится на каустику и переходят в комплексную плоскость, когда точка наблюдения, пересекая каустику, уходит в область тени. В окрестности каустики асимптотика  $u(\lambda, \boldsymbol{\alpha})$ , которая выражается через сумму вкладов  $u_j$  отдельных критических точек, заведомо неприменима.

Аналогичная ситуация возникает во всех случаях, когда точка наблюдения оказывается в переходной зоне-вблизи границы тень-свет, вблизи каустики того или иного типа, фокальной линии и т.п. Построенная таким образом асимптотика является неравномерной, она неприменима в окрестности тех значений параметров  $\boldsymbol{\alpha}$ , в которых критические точки сливаются. Поэтому возникает проблема перехода от неравномерных асимптотических разложений к равномерным асимптотикам, применимым при любых расстояниях между критическими точками, и описывающим также их слияние и исчезновение. Платой за более широкую область применения равномерных асимптотик является их более сложный вид: они выражаются через функцию Эйри, интеграл Френеля, интеграл Пирси, функцию Ханкеля [10, 11]. Выбор специальной функции зависит от типа и числа сливающихся критических точек.

Равномерные асимптотики всех БОИ строятся посредством единого аналитического приема. Делается аналитическая взаимоднозначная замена переменных интегрирования  $\mathbf{p}(\zeta)$ , которая приводит фазовую функцию  $\Phi(\mathbf{p}, \boldsymbol{\alpha})$  к полиному по переменным  $\zeta$  возможно более низкой степени, вид которого определяется поведением критических точек в исследуемой области параметров  $\boldsymbol{\alpha}$ , то есть типом каустики. Коэффициенты полученного полинома являются регулярными функциями параметров  $\boldsymbol{\alpha}$ . Получающиеся в результате интегралы сводятся к модельным, т.е. к простейшим интегралам с аналогичной конфигурацией критических точек. Некоторые из этих интегралов непосредственно совпадают с интегральными представлениями известных специальных функций, другие могут представлять собой новые специальные функции. Важно отметить, что решения большого многообразия конкретных

задач сводятся к относительно небольшому числу специальных функций. Таким образом, построение асимптотики БОИ сводятся к выбору соответствующей специальной функции и нескольких первых ее производных и к определению зависимости аргументов специальной функции, а также амплитудных и фазовых множителей, зависящих от параметров задачи.

### Заключение

Теоретически была показана возможность применения параметрической генерации вынужденного рассеяния Манделъштама – Бриллюэна в схеме с пересечениями сигнальной и опорной волн в устройствах для обращения слабых световых волн. Проведен учет влияния спонтанного рассеяния нелинейной среды на характеристики параметрического возбуждения и сделаны оценки коэффициентов отражения и ограничения чувствительности.

В заключение можно отметить, что существуют актуальные задачи управления сложными, в том числе, информационными системами, предполагающие осуществление непрерывного мониторинга состояния таких объектов, как конструкции самолетов, плотины, мосты, дамбы в течение продолжительного времени для контроля прочности конструкции с целью предотвращения возникновения аварии. Малые массы и размеры оптического волокна, высокая коррозионная стойкость особенно к химическим растворителям, маслам, воде, невысокая стоимость, а также многие другие достоинства оптических волокон открывают широкие перспективы для использования их в качестве чувствительных элементов в информационно-измерительных системах сбора данных для измерения распределения физических величин в пространстве.

Современная волоконно-оптическая система сбора данных – это совокупность аппаратно-программных средств и волоконно-оптических средств передачи, обеспечивающих сбор измерительной информации от множества волоконно-оптических датчиков и её передачу в соответствии с определенным алгоритмом. Существуют волоконно-оптические датчики, в которых в оптическое волокно включается ряд дискретных точечных чувствительных элементов и под действием внешнего воздействия возникает модуляция. Однако наибольший практический интерес вызывают волоконно-оптические датчики, построенные на базе таких оптических эффектов, как рамановское рассеяние и рассеяние Манделъштама-Бриллюэна. По существу, эти измерительные преобразователи делятся на два типа: на основе вынужденного комбинационного рассеяния и на основе эффекта Манделъштама-Бриллюэна, рассмотренного в настоящей работе. Полученные теоретические результаты являются актуальными при построении сложных измерительных информационных систем, преобразующих измеряемые значения физических величин в оптические сигналы, передаваемые по оптическому волокну.

*Работа выполнена по теме государственного задания №АААА-А20-120011690131-7 (В.В. Булатов).*

### Библиографический список

1. Coney A., Damzen MJ. High-energy diode-pumped alexandrite amplifier development with applications in satellite-based lidar // Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics. 2021. V. 38. P. 209.
2. Smith G, Shardlow P.C., Damzen M.J. High-power near-diffraction-limited solid-state amplified spontaneous emission laser devices // Opt. Lett. 2007. V. 32. P. 1911.
3. Jayet B., Huignard J.-P., Ramaz F. Optical phase conjugation in nd:yvo4 for acousto-optic detection in scattering media // Opt. Lett. 2013. V. 38(8). P. 1256.
4. **Ефимов, В.Ф.** Поляризационные методы повышения энергетических характеристик ОВФ-зеркал / В.Ф. Ефимов, И.Г. Зубарев, С.И. Михайлов [и др.] // Квантовая электроника. 1984. Т.11. №2. С.303.
5. **Одинцов, В.И.** Эффективное обращение волнового фронта в режиме параметрической обратной связи / В.И. Одинцов, Л.Ф. Рогачева // Письма в ЖЭТФ. 1982. Т. 19. № 3. С. 221.

6. **Одинцов, В.И.** Низкопороговое ОВФ с большим коэффициентом отражения при ВРМБ в пересекающихся световых пучках / В.И. Одинцов, А.Н. Пономарев, Е.Ю. Соколова // Квантовая электроника. 1992. Т. 19. № 11. С. 1086.
7. **Одинцов, В.И.** Использование петлевой схемы с многократными пересечениями пучков для ОВФ широкополосной накачки / В.И. Одинцов, А.Н. Пономарев // Квантовая электроника. 1992. Т. 19. № 3. С. 221.
8. **Булатов, В.В.** Введение в математические методы моделирования сложных систем / В.В. Булатов. – М.: ОнтоПринт, 2018. – 342 с.
9. **Bulatov V.V.** Modern mathematical methods of complex systems modelling. – М.: Онто Принт, 2020. – 269 с.
10. **Арнольд, В.А.** Особенности каустик и волновых фронтов / В.А. Арнольд. – М.: Фазис, 2002. – 120 с.
11. **Kravtsov Y., Orlov Y.** Caustics, catastrophes, and wave fields. – Berlin: Springer, 1999. 228 p.

*Дата поступления*

*в редакцию: 15.06.2021*

УДК 519.6

DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_20

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ  
НА ПРОИЗВОЛЬНЫХ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ****К.Б. Володченкова**ORCID: 0000-0002-0084-0531 e-mail: [ksuwatomsk@mail.ru](mailto:ksuwatomsk@mail.ru)

Российский федеральный ядерный центр

«Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

Саров, Россия

**Р.Р. Гиниятуллин**ORCID: 0000-0002-6260-5326 e-mail: [rrginiyatullin@vniief.ru](mailto:rrginiyatullin@vniief.ru)

Российский федеральный ядерный центр

«Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

Саров, Россия

Исследованы схемы аппроксимации конвективных потоков, предназначенные для расчета низкоскоростных многокомпонентных течений, несжимаемых на неструктурированных сетках для моделирования. Методика моделирования основана на алгоритме *SIMPLE*, предназначенном для численного моделирования несжимаемых и слабосжимаемых течений. Расчеты проведены на сетках различного типа, включая блочно-структурированные, а также произвольные неструктурированные тетраэдральные и полиэдральные. Для решения полученных при дискретизации систем линейных уравнений применяются итерационные решатели алгоритмом Гаусса-Зейделя и многосеточный алгоритм *AMG*. Для моделирования турбулентности выбрана *RANS* модель *SST* как одна из наиболее популярных и применимых для относительно низкоскоростных течений. Для блочно-структурированных типов сеток получена наибольшая погрешность для схемы *UD* и минимальная погрешность для схем повышенного порядка среди всех проведенных расчетов. На полиэдральных сетках для всех расчетов относительная погрешность несколько выше, чем на блочно-структурированных. При измельчении сетки наилучший характер сходимости демонстрирует схема *LUD*. Для тетраэдральных сеток характер сходимости практически не зависит от выбранной схемы, и наблюдается стабильный тренд сеточной сходимости; показано преимущество относительно полиэдральных сеток при сопоставимом характерном размере на грубой сетке. Сеточная сходимость на тетраэдральных сетках наиболее предсказуема, однако не дает преимуществ при использовании схем повышенного порядка точности.

Представлены рекомендации оптимального характерного размера ячеек для зоны смешения потоков для получения приемлемых результатов на выбранных сетках различного типа.

**Ключевые слова:** многокомпонентные течения, неструктурированные сетки, алгоритм *SIMPLE*, уравнения переноса концентраций, уравнение Навье-Стокса.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Володченкова, К.Б. Моделирование многокомпонентных течений на произвольных неструктурированных сетках / К.Б. Володченкова, Р.Р. Гиниятуллин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2021. № 3. С. 20-31. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_20

**SIMULATING MULTICOMPONENT FLOWS  
ON ARBITRARY UNSTRUCTURED MESHES****K.B. Volodchenkova**ORCID: 0000-0002-0084-0531 e-mail: [ksuwatomsk@mail.ru](mailto:ksuwatomsk@mail.ru)

Russian Federal Nuclear Center –

The All-Russian Research Institute of Experimental Physics

Sarov, Russia

**R.R. Giniyatullin**

ORCID: 0000-0002-6260-5326 e-mail: rrginiyatullin@vniief.ru

Russian Federal Nuclear Center –

The All-Russian Research Institute of Experimental Physics

*Sarov, Russia*

**Abstract.** Schemes of approximating convective flows were investigated. They are intended for calculating incompressible flows on unstructured meshes for simulating low-velocity multicomponent flows. The simulation technique is based on the SIMPLE algorithm used for numerical simulation of incompressible and weakly compressible flows. Calculations were performed on meshes of various types, including block-structured ones, as well as arbitrary unstructured tetrahedral and polyhedral meshes. The systems of linear equations obtained by discretization are solved using iteration solvers with the Gauss-Seidel algorithm and the multimesh AMG algorithm. Turbulence was simulated using the RANS model SST as one of the most popular and applicable for relatively low-velocity flows. Block-structured types of meshes yielded the biggest error for the UD scheme and a minimal error for higher-order schemes among all the calculations performed. On polyhedral meshes for all calculations, the relative error is somewhat higher than that on block-structured ones. With mesh refinement, the LUD scheme demonstrated the best convergence behavior. With tetrahedral meshes, the convergence pattern is practically independent of the chosen scheme, and a steady mesh convergence trend is observed. An advantage of polyhedral meshes was shown at a comparable character of the size on a coarse mesh. The mesh convergence on tetrahedral meshes is the most predictable one; however, it offers no advantage when using increased accuracy order schemes.

Recommendations are given for an optimal characteristic size of meshes for the flow mixing zones to obtain acceptable results on chosen meshes of different types.

**Key words:** multicomponent flows, unstructured meshes, SIMPLE algorithm, concentration transport equations, Navier-Stokes equation.

**FOR CITATION:** K.B. Volodchenkova, R.R. Giniyatullin. Simulating multicomponent flows on arbitrary unstructured meshes. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 3. P. 20-31. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_20

## Введение

Применение численных методов решения уравнений Навье-Стокса для расчета многокомпонентных течений на практике сводится в основном к расчетам на блочно-структурированных сетках с применением эффективных численных схем высокого порядка точности [1, 2]. Однако при решении прикладных задач целесообразно использовать неструктурированные расчетные сетки, состоящие из многогранников произвольной формы с выделением призматических пограничных слоев для корректного разрешения турбулентного пограничного слоя, влияющего на моделирование многокомпонентных течений в целом [3]. Одной из таких важных прикладных задач является моделирование распространения газообразных загрязняющих веществ в атмосфере.

Автоматические генераторы трехмерных неструктурированных сеток могут генерировать тетраэдральные, преимущественно гексаэдральные, призматические, полиэдральные и гибридные сетки с разными типами ячеек [4-8]. Тип ячеек в той или иной зоне расчетной области зависит в основном от сложности ее локальной геометрической конфигурации. Использование произвольной неструктурированной сетки приводит к ряду трудностей, одна из которых заключается в том, что на неструктурированной сетке заметно сужается круг доступных схем для дискретизации конвективных потоков. От свойств выбранной схемы дискретизации напрямую зависит качество моделирования: схема должна иметь малую диссипацию и обеспечивать устойчивость счета на произвольной неструктурированной сетке [3]. Нежелательная диссипация уменьшается с повышением точности определения конвективных потоков. Для такого типа сеток построен ряд схем, которые применяются на практике. Расчету на произвольных неструктурированных сетках посвящено много работ [3, 5, 9-10]. Однако во всех перечисленных исследованиях не приводятся особенности при моделировании многокомпонентного течения, влияние используемых численных схем и их применимость при решении практических задач.

Исследование применимости основных схем дискретизации конвективных потоков на неструктурированных сетках можно найти в работах [3, 5, 11]. К наиболее успешным по применимости на произвольно-неструктурированных сетках относят схемы повышенного порядка аппроксимации с линейной интерполяцией (*Linear Upwind Differences, LUD*) и гибридные с добавлением противопоточности [3]. Однако для правильного моделирования необходимо провести оценку численной диссипации выбранных применимых схем для дискретизации уравнения переноса концентраций.

В настоящей работе проводится исследование схем аппроксимации конвективных потоков, предназначенных для расчета несжимаемых на неструктурированных сетках для моделирования низкоскоростных многокомпонентных течений. На примере решения задачи о впрыске струи пропана в воздушный поток оценивается влияние схем дискретизации конвективного потока в уравнении переноса концентраций. Приводится оценка полученной точности решения на произвольных неструктурированных сетках различного типа, даются рекомендации численного расчета относительно низкоскоростных многокомпонентных течений. В первой части данной работы приводится описание основных уравнений и метод расчета концентраций в алгоритме *SIMPLE*, во второй части – описание практической задачи и ее численное решение, рекомендации по оптимальному выбору типа сетки, характерного размера и наиболее предпочтительной схемы для данного случая [5, 12].

### Метод расчета многокомпонентных течений

Для моделирования низкоскоростных многокомпонентных слабосжимаемых течений будем использовать систему уравнений Навье-Стокса, осредненную по Рейнольдсу, совместно с уравнениями переноса концентраций на основе закона диффузии Фика, которая имеет вид [11] (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * (\rho \vec{u}) = 0, \\ \frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \rho(\vec{u} * \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \frac{1}{3} \mu \nabla(\nabla * \vec{u}), \\ C_p \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla * (\rho \vec{u} T) = -\nabla * (\lambda \nabla T) + \nabla(\vec{u} * \tau) + \frac{\partial \rho}{\partial t} + S_\tau, \\ \frac{\partial \rho c_i}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u} c_i + q_{c_i}) = S_{c_i}, i = 1 \dots n - 1 \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь  $\vec{u}$  – вектор скорости,  $\rho$  – плотность среды,  $p$  – давление,  $T$  – температура,  $\mu$  – молекулярная вязкость,  $C_p$  – удельная теплоемкость,  $\lambda$  – эффективный коэффициент теплопроводности среды,  $\tau = \mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) - \frac{2}{3} \delta \nabla * \vec{u}$  – тензор вязких напряжений.

Для расчета концентраций компонент рассматриваются их объемные доли:

$$c_i, \quad 0 \leq c_i \leq 1, \quad \sum_{i=1}^n c_i = 1.$$

Последняя компонента вычисляется явно, по концентрациям других компонент:

$$c_n = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} c_i.$$

Диффузионный поток компоненты  $c_i$  выражается при помощи коэффициента диффузии по закону Фика (2):

$$\overline{q_{c_i}} = -D_i \nabla c_i, i = 1 \dots n - 1, \quad (2)$$

где  $D_i$  – коэффициент диффузии компоненты. Диффузионный поток также может быть выражен заданием числа Шмидта (3):

$$\vec{q}_{c_i} = -\frac{\mu}{s_c} \nabla c_i \quad (3)$$

В турбулентном случае необходимо учитывать также турбулентную составляющую диффузионного потока концентрации (4):

$$\vec{q}_{c_i} = -\left(\frac{\mu}{s_c} + \frac{\mu_t}{s_{c_t}}\right) \nabla c_i, \quad (4)$$

где  $\mu_t$  – турбулентная вязкость, вычисленная с помощью какой-либо модели турбулентности. Уравнения дополнены возможными источниками энергии  $S_T$  и концентраций  $S_{c_i}$ .

Для дискретизации основных уравнений используется классический метод *SIMPLE* на конечно-объемной трехмерной неструктурированной сетке [12-13]. Для решения полученных при дискретизации систем линейных уравнений применяются итерационные решатели алгоритмом Гаусса-Зейделя и многосеточный алгоритм *AMG* [13-14]. Для моделирования турбулентности выбрана *RANS* модель *SST* как одна из наиболее популярных и применимых для относительно низкоскоростных течений [15]. В методе *SIMPLE* для расчета потоков через контрольные объемы необходимо интерполировать величины из центров ячеек на грани при помощи дифференциальных схем. В большинстве случаев ограничиваются парой ячеек, разделенных гранью, на которую производится интерполяция (рис. 1).

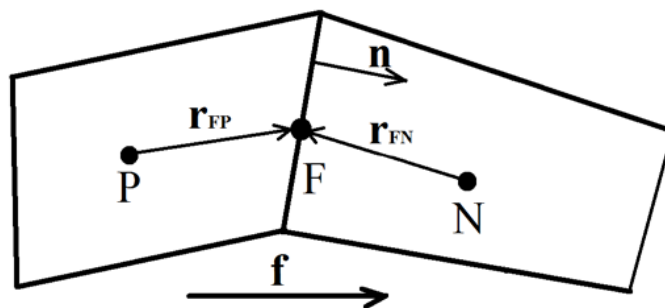


Рис. 1. Общий вид пары ячеек конечно-объемной сетки

Fig. 1. General view of a pair of meshes in a finite-volume mesh

В данной работе рассматриваются интерполяционные схемы, шаблон которых ограничен парой смежных ячеек, поскольку более широкий шаблон на неструктурированной сетке в общем случае не существует или требует построения сетки с выделенным направлением. Среди таких схем выбраны: простейшая схема первого порядка *UD*, схема с линейной интерполяцией *LUD* и гибридная схема *CD + 0.1UD*, представляющая собой линейную комбинацию схемы высокого и низкого порядков, совмещающая преимущества повышенного порядка и устойчивости счета на неструктурированной сетке [3, 16]. Представленные схемы имеют следующий вид. Схема *Upwind Differences* – схема первого порядка, она устойчива на неструктурированных сетках, но обладает большой численной диффузией [3, 16] (5):

$$c_{i,F,ud} = \begin{cases} c_{i,P}, & f > 0 \\ c_{i,N}, & f < 0 \end{cases} \quad (5)$$

где  $P$  и  $N$  – индексы ячеек по разные стороны от грани с индексом  $F$ . Гибридные схемы представляют собой линейную комбинацию схемы высокого и низкого порядков, что приводит к увеличению монотонности решения.

Диссипативные свойства анализируемых схем отличаются лишь использованием реконструкции величины на грань с линейной интерполяцией в схеме *LUD* [3, 17]. Схема *Linear Upwind Differences* с линейной интерполяцией [3, 17]:

$$c_{i,F,lud} = \begin{cases} c_{i,P} + \nabla c_{i,P} \cdot r_{FP}, & f > 0 \\ c_{i,N} + \nabla c_{i,N} \cdot r_{FN}, & f < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Гибридную схему, например, для схемы *CD*, можно записать следующим образом:

$$c_{i,F,gibr} = \gamma c_{i,F,CD} + (1 - \gamma) c_{i,F,iud} \quad (7)$$

где  $\gamma$  – коэффициент смешения. В настоящей работе рассматриваются схемы с постоянным коэффициентом смешения во всей расчетной области.

Представленная выше модель реализована в отечественном пакете программ инженерного анализа ЛОГОС [12-13].

### Результаты численных экспериментов

Для оценки сеточной сходимости рассматриваемого метода проведем эксперимент на задаче впрыска струи пропана в воздушный туннельный поток (рис. 2): моделирование многокомпонентных течений на блочно-структурированных сетках (O-сетках) и моделирование многокомпонентных течений на произвольных неструктурированных сетках [18]. Приведем ниже полученные результаты моделирования по отечественному пакету программ ЛОГОС [12], ориентированный на решение задач вычислительной гидродинамики на произвольных неструктурированных сетках [22]. Пакет программ ЛОГОС успешно прошел масштабную верификацию [25, 26] и показал достаточно хорошие результаты на серии различных гидродинамических задач, включая расчеты турбулентных [23, 24] и геофизических течений [27, 28], а также расчеты промышленных задач [21].

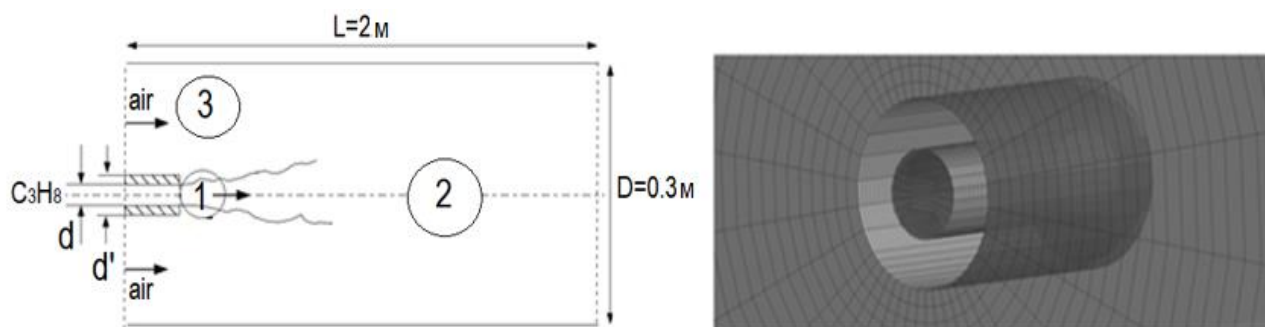


Рис. 2. Геометрия задачи и вид расчетной блочно-структурированной O-сетки

Fig. 2. Problem geometry and the form of the computational block-structured O-mesh

В рассматриваемой задаче поток впрыскивается через форсунку в воздушное пространство трубы. Исследуемое течение в трубе является турбулентным и содержит три компонента: пропан ( $C_3H_8$ ), кислород ( $O_2$ ) и азот ( $N_2$ ). Воздух, который входит в туннель, свободен от  $C_3H_8$ . Между компонентами нет никакой химической реакции, и поток адиабатный. Рассматривается развитие турбулентного течения пропана в потоке воздуха под действием силы тяжести [19, 20]. Воздух представлен смесью кислорода ( $O_2$ ) и азота ( $N_2$ ) в концентрации  $C_{O_2} = 0,23$ ,  $C_{N_2} = 0,77$ . Струя пропана ( $C_3H_8$ ) втекает со средней скоростью 53 м/с, число Рейнольдса  $Re = 68000$ . Длина туннеля составляет 2 м, диаметр – 0,3 м. Длина входного патрубка для пропана составляет 0,0165 м и была задана произвольно. Внешний диаметр патрубка равен  $d'$  – 0,011 м, внутренний диаметр  $d$  – 0,0052 м (рис. 2). На выходе из патрубка пропан начинает перемешиваться с воздухом. Для моделирования многокомпонентного газа используется уравнение состояния смеси идеальных газов. В качестве коэффициента диффузии смеси использовалось число Шмидта, равное 0,7. Характеристики компонент представлены в табл. 1.



Таблица 1.

## Характеристики компонент

Table 1.

## Characteristics of components

Величина	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
Молекулярный вес, кг/кмоль	31,9988	28,0134	44,09
Молекулярная вязкость, кг/(м·с)	1,919e-05	1,663e-05	7,95e-06
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1,2999	1,138	1,91

Для решения задачи используются следующие граничные условия: на входе задается воздух со скоростью 9,2 м/с, параметры турбулентности для воздуха (интенсивность и длина перемешивания), равные 0,004 и 0,145 м, для пропана 0,02 и 0,0026 м соответственно; на входной границе для пропана задается либо массовый расход, либо профиль скорости, вычисляемый по формуле:

$$u(y) = U \left(\frac{y}{R}\right)^{1/n}, \quad (8)$$

где  $y$  – расстояние от стенки,  $U = 70$  м/с,  $R = 2,6$  мм,  $n = 7$ .

На выходной границе задается постоянное давление 101 000 Па, все остальные границы – стенки без прилипания,  $T = 300$  К. Предварительные расчеты показали, что в задаче можно выделить три основные зоны, различающиеся характером течения (рис. 2). Первая зона (1) – основная зона впрыска, где течение наиболее интенсивно и турбулентно, а также характеризуется наибольшими градиентами концентраций и скорости. Соответственно, эта подобласть имеет максимально подробную сеточную детализацию. Экспериментальные данные также доступны только для этой зоны. Зона (2) – зона течения вниз по потоку, в которой течение почти установившееся, изменение параметров монотонно и не требует большого числа ячеек. Зона (3) – зона основного потока входа воздуха, свободного от пропана, где требование к сетке минимально. Полученные результаты будем оценивать для зоны 1 на отрезке, где решения имеют наибольшие различия. Сеточное разрешение в других зонах практически не влияет на профиль концентрации на исследуемом отрезке.

Были построены три блочно-структурированные сетки с разбиением  $O$  ( $O$ -сетка) для полной трубы. Сетка 1 является базовой для трубы и состоит из 31 788 шестигранников. Для улучшения результатов и сходимости построим еще две сетки путем автоматического измельчения базовой. Для качественного разрешения определим минимальный (самый крупный) размер для каждой зоны исходя из практического опыта использования произвольных неструктурированных конечно-объемных сеток [3, 10, 17]. Характерный размер ячеек в основной области, области 1  $\Delta = \max(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$ , где  $\Delta_i$  – максимальный размер ячейки вдоль оси  $i$ . Аналогичным образом построены неструктурированные тетраэдральные и полиэдральные сетки. Приведем характерные размеры для выбранных типов сеток в табл. 2.

Таблица 2.

## Параметры сеток

Table 2.

## Parameters of meshes

№	Тип ячеек		Кол-во ячеек, млн.	Характерный размер ячеек, $\Delta$
1	Блочнo-структурированная	Сетка 1	31 788	0,0018
2	Блочнo-структурированная	Сетка 2	180 000	0,0007
3	Блочнo-структурированная	Сетка 3	1 226 560	0,0004
4	Полиэдры	Сетка 1	27 714	0,0003

Окончание табл. 2.  
Table 2 (continued).

5	полиэдры	Сетка 2	474 183	0,00015
6	полиэдры	Сетка 3	1 875 715	0,00006
7	тетраэдры	Сетка 1	218 597	0,0005
8	тетраэдры	Сетка 2	1 470 825	0,0002
9	тетраэдры	Сетка 3	3 281 289	0,0001

Ниже приведем результаты расчетов концентрации пропана в продольном сечении трубы в зоне 1 для всех типов сеток и выбранных дифференциальных схем. Поле скорости практически не меняется при измельчении сетки, но наибольшее отличие наблюдается в поле концентрации пропана с учетом выбранной схемы и характерного размера ячейки зоны 1. Представим результаты концентрации пропана для каждого расчета в выбранном сечении, где градиенты концентраций и скорости максимальны (рис. 6-8).

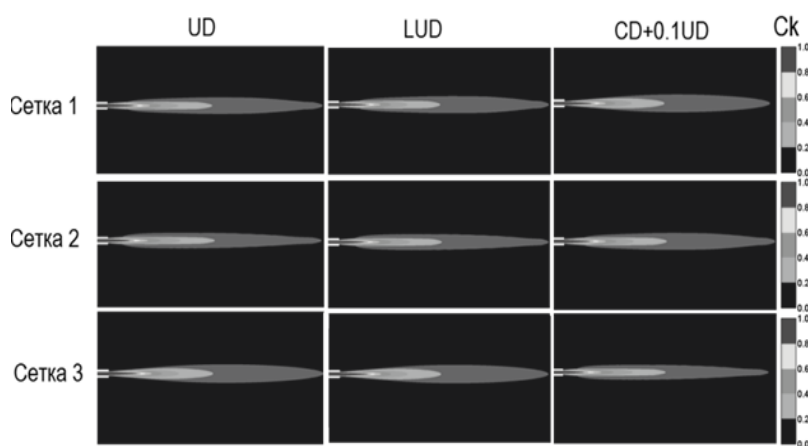


Рис. 3. Распределение концентрации пропана для блочно-структурированных сеток с учетом выбранных схем

Fig. 3. Propane concentration distribution for block-structured meshes with account of chosen schemes

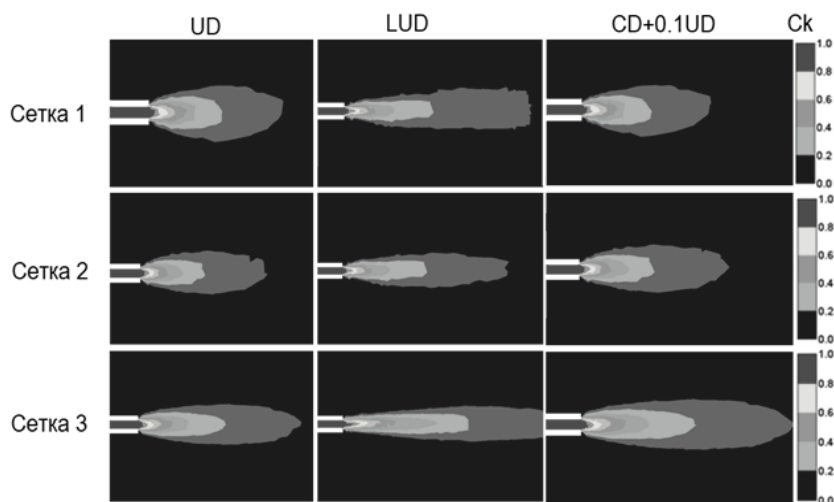
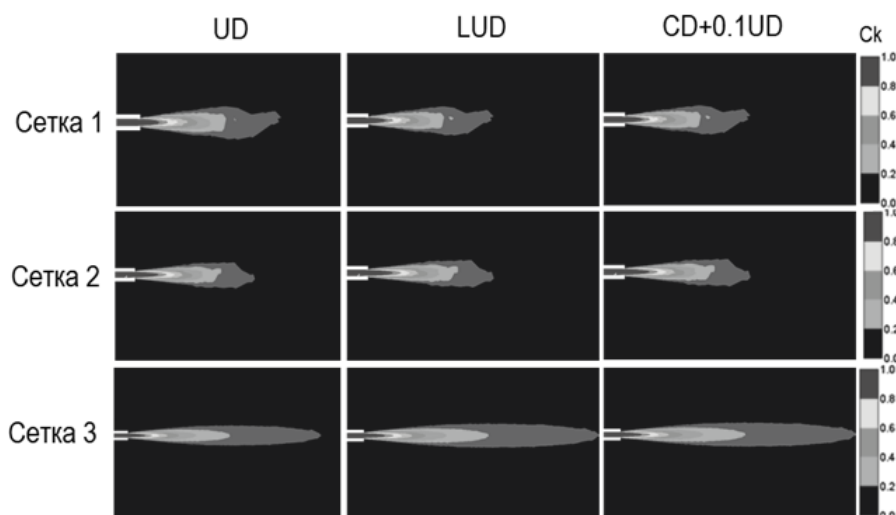


Рис. 4. Распределение концентрации пропана для полиэдральных сеток с учетом выбранных схем

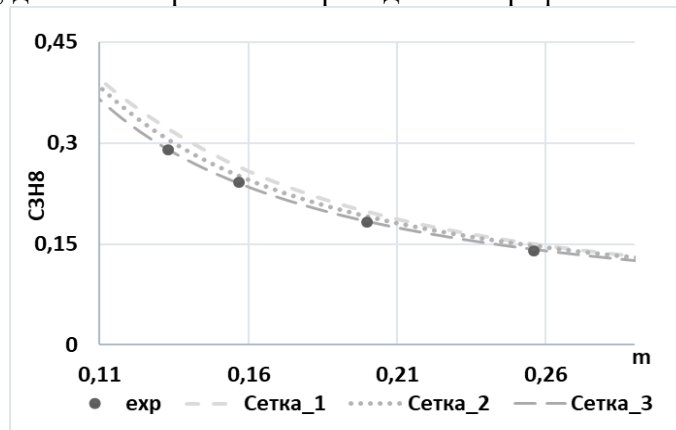
Fig. 4. Propane concentration distribution for polyhedral meshes with account of chosen schemes



**Рис. 5. Распределение концентрации пропана для тетраэдральных сеток с учетом выбранных схем**

**Fig. 5. Propane concentration distribution for tetrahedral meshes with account of chosen schemes**

На рис. 6-8 представлены поля концентрации пропана для всех типов сеток с учетом выбранных дифференциальных схем и характерного размера ячейки зоны 1. Результаты показывают качественную картину использования всех трех схем на различных сетках. Результатом моделирования является формирование объемной доли пропана вдоль оси симметрии, которые сравниваются с экспериментальными данными [19, 20]. Видно, что ядро потока пропана, полученное на блочно-структурированной сетке, наиболее выражено для схемы *UD* и практически совпадает по форме для гибридной схемы. Изолинии концентрации вне ядра потока имеют наибольшее отличие по форме для тетраэдральной сетки с учетом схемы *UD*, что объясняется повышенной диффузией из ядра потока. Для гибридной схемы видно отличие вне ядра для полиэдральной сетки, что объясняется большим количеством граней у каждой ячейки. Вне ядра потока расчеты по схемам *UD* и *LUD* качественно согласуются, детальное различие наблюдается при вычислении средней погрешности, приведенном на рис. 7. В качестве примера на рис. 6 представим один из расчетных случаев сравнения концентрации пропана в зоне 1 вдоль оси трубы для блочно-структурированной сетки и выбранной схемы *UD* согласно [3]. Для остальных сеток и расчетных схем графики выглядят аналогично, детальное сравнение приведено на графиках ниже.



**Рис. 6. Концентрация пропана на блочно-структурированных O-сетках при схеме UD**

**Fig. 6. Propane concentration on block-structured O-meshes with the UD scheme**

Для сравнительного анализа дополнительно представим среднюю погрешность для всех выбранных сеток для зоны смешения потоков.

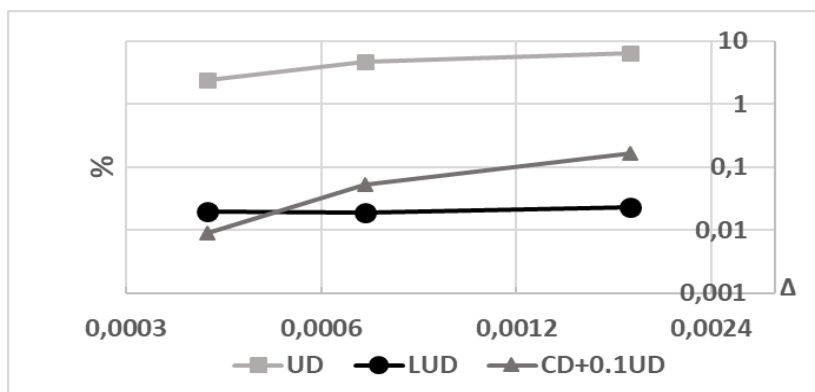


Рис. 7. Средняя погрешность для блочно-структурированных сеток

Fig. 7. Mean error for block-structured meshes

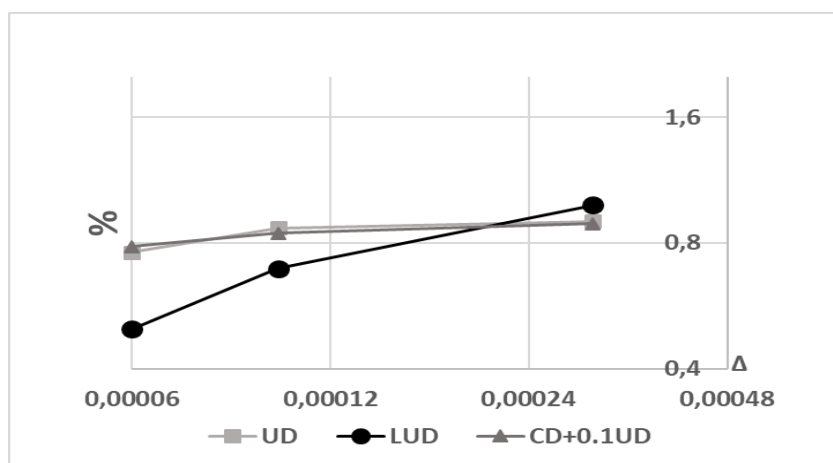


Рис. 8. Средняя погрешность для полиэдральных сеток

Fig. 8. Mean error for polyhedral meshes

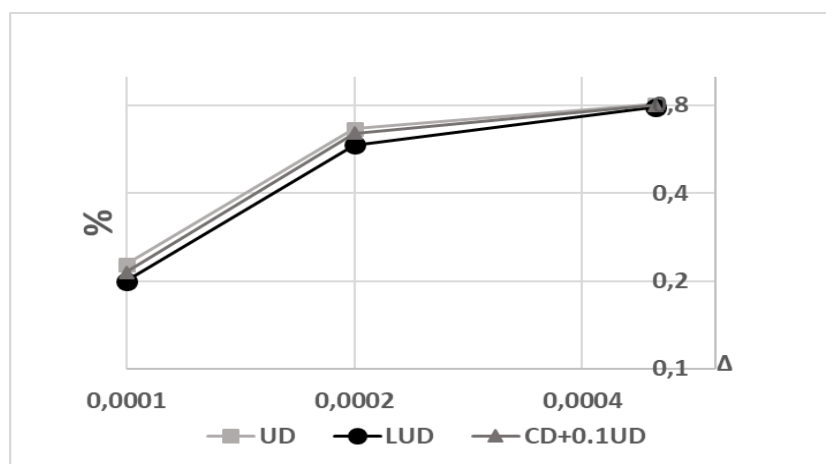


Рис. 9. Средняя погрешность для тетраэдральных сеток

Fig. 9. Mean error for tetrahedral meshes

На рис. 7 видно, что для блочно-структурированных типов сеток получена наибольшая погрешность для схемы  $UD$  и минимальная погрешность для схем повышенного порядка среди всех проведенных расчетов. Полученный результат достаточно предсказуем, поскольку блочно-структурированная сетка обладает наибольшим качеством. Наблюдаемой особенностью является разный характер сеточной сходимости: для относительно грубых сеток предпочтительнее схема  $LUD$ , обеспечивающая стабильно низкую погрешность. Однако гибридная схема  $CD+0.1UD$  демонстрирует лучший тренд сходимости при измельчении сетки. Графики погрешности для блочно-структурированных сеток пересекаются для характерного размера  $0,00055$ , что соответствует  $1/10$  диаметра входа пропана. На рис. 8 представлена погрешность для полиэдральных сеток. Несмотря на использование более подробных сеток, для всех расчетов относительная погрешность несколько больше, чем на блочно-структурированных сетках. При измельчении сетки наилучший характер сходимости демонстрирует схема  $LUD$ . На рис. 9 представлена средняя погрешность для тетраэдральных сеток. Отметим, что характер сходимости практически не зависит от выбранной схемы, и наблюдается стабильный тренд сеточной сходимости.

По результатам проведенных расчетов приведем рекомендации по необходимому сеточному разрешению для корректного моделирования многокомпонентных течений. Для обобщения рекомендаций для данного класса задач обезразмерим характерный размер ячеек на диаметр входа для пропана, равный  $0,0052$  м. Использование дифференциальной схемы  $UD$  на блочно-структурированных сетках нецелесообразно, поскольку не имеет преимуществ перед схемами повышенного порядка точности. Наилучшая ортогональность блочно-структурированной сетки не накладывает ограничений на схемы повышенного порядка. Результаты, полученные даже на самой грубой блочно-структурированной сетке с характерным размером, равным  $0,35$  от входного диаметра, дают меньшую погрешность, чем более подробные сетки других типов. Выбранный характерный размер на полиэдральных сетках позволил получить удовлетворительные результаты, поскольку максимальная погрешность составляет не более  $1,5$  % на грубой сетке с характерным размером  $0,06$  от входного диаметра. Характерный размер выбран в соответствии с [3]. Полученные результаты на тетраэдральных сетках демонстрируют преимущества относительно полиэдральных при сопоставимом характерном размере на грубой сетке, равном  $0,1$ . Сеточная сходимость на тетраэдральных сетках наиболее предсказуема, однако не дает преимуществ при использовании схем повышенного порядка точности.

### Заключение

На примере задачи о многокомпонентном течении струи пропана получены оценки влияния типа сетки и ее характерного размера и дифференциальной схемы на точность расчетов. Выбор указанных параметров для расчетов задач подобного класса позволяет уменьшить число предварительных расчетов до достижения сеточной сходимости на больших задачах. По результатам приведены оценки оптимального характерного размера ячеек для зоны смещения потоков для получения приемлемых результатов на выбранных сетках различного типа. Установлено, что при достаточно небольшом характерном размере, в сравнении с другими типами сеток, применение полиэдральных сеток, по крайней мере, в зоне 1, нецелесообразно – данный вид сетки демонстрирует наибольшую погрешность среди всех полученных расчетных случаев. Тетраэдральные сетки демонстрируют предсказуемую удовлетворительную точность и минимальное влияние дифференциальных схем. Блочно-структурированные сетки обеспечивают наименьшую погрешность при применении схем повышенного порядка, однако требуют наибольших затрат времени на подготовку сеточной модели.

**Библиографический список**

1. A Numerical Study of a Bluff-Body Stabilized Diffusion Flame. Part 2. Influence of Combustion Modeling And Finite-Rate Chemistry // a Department of Applied Mechanics, Thermodynamics and Fluid Dynamics, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway Published online,06 Apr 2007, P.191-217.
2. N. Peters Institut für Technische Mechanik RWTH Aachen // ERCOFTAC Summer School September 15-19, 1997 Aachen, Germany, P. 95.
3. **Козелков, А.С.** Моделирование турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости на неструктурированных сетках с использованием модели отсоединенных вихрей / А.С. Козелков, В.В. Курулин, Е.С. Тятюшкина, О.Л. Пучкова // Математическое моделирование. 2014. Т. 26. № 8. С. 81-96.
4. **Morton, S.A.** Assessment of unstructured grids for detached-eddy simulation of high Reynolds number separated flows / S.A. Morton, J.R. Forsythe, K.D. Squires, K.E. Wurtzler // 8th ISGG Conf., Honolulu, June 2002.
5. **Kozelkov, A.** Comparison of convective flux discretization schemes in detached-eddy simulation of turbulent flows on unstructured meshes / A. Kozelkov, V. Kurulin, V. Emelyanov, E. Tyatyushkina, K. Volkov // Journal of Scientific Computing, 2016. V. 67. P. 176-191.
6. **Лисейкин, В.Д.** Технология построения рахностных сеток / В.Д, Лисейкин, Ю.И. Шокин, И.А. Васева, Ю.В. Лиханова. – Новосибирск: Наука, 2009. – 414 с.
7. **Смолкина, Д.Н.** Автоматический генератор неструктурированных многогранных сеток методом отсечения Вант / Д.Н. Смолкина, О.Н. Борисенко, М.В. Черенкова, А.Г. Гиниятуллина, А.Н. Крупская, М.В. Кузьменко, Н.В. Чухманов, Е.В. Потехина, Н.В. Попова, М.Р. Турусов, 2018.
8. **Frey, P.J.** Mesh generation, application to Finite Elements / P.J. Frey, P.L. George // ISTE Wiley 2008.
9. **Peng, S.H.** DES and Hybrid RANS-LES Modelling of Unsteady Pressure Oscillations and Flow Features in a Rectangular Cavity / S.H. Peng, S. Leicher // Advances in Hybrid RANS-LES Modelling, 2008, pp. 132-141.
10. **Morton, S.A.** Assessment of unstructured grids for detached-eddy simulation of high Reynolds number separated flows / S.A. Morton, J.R. Forsythe, K.D. Squires, K.E. Wurtzler // 8th ISGG Conf., Honolulu, June 2002.
11. **Ferziger, J.H.** Computational Method for Fluid Dynamics / J.H. Ferziger, M. Peric // Springer-Verlag, New York, 2002, 423 p.
12. **Козелков, А.С.** Реализация метода расчета вязкой несжимаемой жидкости с использованием многосеточного метода на основе алгоритма SIMPLE в пакете программ ЛОГОС / А.С. Козелков, Ю.Н. Дерюгин, С.В. Лашкин, Д.П. Силаев, П.Г. Симонов, Е.С. Тятюшкина // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2013. Вып. 4. с.44-56.
13. **Волков, К.Н.** Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов, А.С. Козелков // Физматлит, 2014.
14. **Henson, V.E.** Boomer AMG: a parallel algebraic multigrid solver and preconditioner / V.E. Henson, U.M. Yang // Applied Numerical Mathematics. 2002. Vol. 41. P. 155-177.
15. **Menter, F.R.** Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. Turbulence / F.R. Menter, M. Kuntz, R.B. Langtry // Heat and Mass Transfer 4, 2003, pp.625-632.
16. **Travin, A.** Physical and numerical upgrades in the detached-eddy simulation of complex turbulent flows / A. Travin, M. Shur, M. Strelets, P.R. Spalart // Proceedings of Euromech Coll. Les of complex transitional and turbulent flows, Munich, Germany. Kluwer, Dordrecht, 2002, vol. 65, pp.239-254.
17. **Jasak, H.** Error Analysis and Estimation for the finite volume method with applications to fluid flows. Thesis submitted for the degree of doctor / H. Jasak // Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, 1996.
18. Fluent Validation Guide [Электронный ресурс]: Romeo.univ-reims // URL: <https://romeo.univ-reims.fr/documents/fluent/fluentValidationGuide.pdf>
19. **Strahle, W.C.** Evaluation of Data on Simple Turbulent Reacting Flows / W.C. Strahle, S.G. Lekoudis // AFOSR TR-85 0880, Chapter 2, School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
20. **Schefer, R.W.** Simultaneous Measurements of Velocity and Density in a Turbulent Nonpremixed Flame / R.W. Schefer, R.W. Dibble // AIAA Journal, 23:1070-1078, 1985.

21. **Козелков, А.С.** Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач гидродинамики в промышленных приложениях / А.С. Козелков, В.В. Курулин, С.В. Лашкин, Р.М. Шагалиев, А.В. Ялозо // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2016. Т. 56. № 8. С. 1524-1535.
22. **Волков, К.Н.** Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках / К.Н. Волков, Ю.Н. Дерюгин, В.Н. Емельянов, А.Г. Карпенко, А.С. Козелков, И.В. Тетерина. – М.: Физматлит, 2013. – 536 с.
23. **Козелков, А.С.** Исследование применения RANS моделей турбулентности для расчета неизотермических течений с низкими числами Прандтля / А.С. Козелков, В.В. Курулин, Е.С. Тятюшкина, А.А. Куркин, М.А. Легчанов, Ю.А. Циберева // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2015. № 4. С. 44-58.
24. **Козелков, А.С.** Зонный RANS-LES подход на основе алгебраической модели рейнольдсовых напряжений / А.С. Козелков, А.А. Куркин, О.Л. Крутякова, В.В. Курулин, Е.С. Тятюшкина // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2015. № 5. С. 24-33.
25. **Козелков, А.С.** Минимальный базис задач для валидации методов численного моделирования турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости / А.С. Козелков, Ю.Н. Дерюгин, Ю.А. Циберева, А.В. Корнев, О.В. Денисова, Д.Ю. Стрелец, А.А. Куркин, В.В. Курулин, И.Л. Шарипова, Д.П. Рубцова, М.А. Легчанов, Е.С. Тятюшкина, С.В. Лашкин, А.В. Ялозо, С.В. Яцевич, Н.В. Тарасова, Р.Р. Гинниятуллин, М.А. Сизова, О.Л. Крутякова // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева. 2014. № 4 (104). С. 21-69.
26. **Козелков, А.С.** Минимальный базис задач валидации методов расчета течений со свободной поверхностью / А.С. Козелков, А.А. Куркин, И.Л. Шарипова, В.В. Курулин, Е.Н. Пелиновский, Е.С. Тятюшкина, Д.П. Мелешкина, С.В. Лашкин, Н.В. Тарасова // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева. 2015. № 2 (109). С. 49-69.
27. **Козелков, А.С.** Эффекты, сопровождающие вхождение астероида в водную среду / А.С. Козелков // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева. 2016 № 3(105). С.48-77.
28. **Козелков, А.С.** Методика численного моделирования цунами оползневого типа на основе уравнений Навье-Стокса / А.С. Козелков // Вычислительная механика сплошных сред. 2016. том 9. №2. С. 218-236.

*Дата поступления  
в редакцию: 25.04.2021*

УДК 517.4

DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_32

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СИГНАЛА  
ПРИ ЦИФРО-АНАЛОГОВОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ****В.М. Галкин**ORCID: 0000-0003-1762-7718 e-mail: [vladimirgalkins@gmail.com](mailto:vladimirgalkins@gmail.com)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***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*

Анализируются теоретические основания цифровой обработки сигналов, связанные с дискретным преобразованием Фурье – базовым алгоритмом преобразования сигналов в цифровых устройствах. Дискретное преобразование Фурье интерпретируется как некоторый унитарный оператор в конечномерном пространстве, изучена его структура, найдены собственные значения и собственные подпространства; получены новые результаты, касающиеся особенностей восстановления сигнала по его частотному спектру. Рассмотрена аппроксимация периодического сигнала интерполяционным тригонометрическим многочленом по коэффициентам, полученным в результате применения дискретного преобразования Фурье. Обнаружено, что при увеличении числа отсчетов отклонение интерполяционного многочлена от исходного сигнала не стремится к нулю. Изложение иллюстрируется примерами, один из которых показывает хорошее приближение сигнала интерполяционным полиномом.

**Ключевые слова:** цифровизация, цифровая обработка сигналов, периодический сигнал, аналоговый сигнал, аппроксимация, интерполяционный многочлен, отсчеты, унитарный оператор, спектр, собственные числа, собственные подпространства.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Галкин, В.М. Повышение точности воспроизведения сигнала при цифро-аналоговом преобразовании / В.М. Галкин, Л.Н. Мазунова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 3. С. 32-40.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_32

**INCREASING THE SIGNAL PRESENTATION ACCURACY  
DURING DIGITAL-TO-ANALOG CONVERSION****V.M. Galkin**ORCID: 0000-0003-1762-7718 e-mail: [vladimirgalkins@gmail.com](mailto:vladimirgalkins@gmail.com)Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia***L.N. Mazunova**ORCID: 0000-0003-3262-8348 e-mail: [matematixx@mail.ru](mailto:matematixx@mail.ru)Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The theoretical fundamentals of digital signal processing related to the discrete Fourier transform – the basic signal conversion algorithm in digital devices are analyzed. The discrete Fourier transform is interpreted as a unitary operator in finite-dimensional space. Its structure is investigated, eigenvalues and the eigen subspace are found, and new results in the specific features of restoring a signal by its frequency spectrum are obtained. Approximation of a periodic signal with an interpolation trigonometric polynomial by coefficients obtained with the discrete Fourier transform is considered. With an increasing number of samples, the deviation of the interpolation polynomial from the initial



signal does not tend to zero. The presentation is illustrated with examples, one of which demonstrates a close approximation of the signal with the interpolation polynomial.

**Key words:** digitizing, digital signal processing, periodic signal, analog signal, approximation, interpolation polynomial, samples, unitary operator, spectrum, eigenvalues, eigen subspaces.

**FOR CITATION:** V.M. Galkin, L.N. Mazunova. Increasing the signal presentation accuracy during digital-to-analog conversion. Transactions of NNSTU n. a. R.E. Alekseev. 2021. № 3. Pp. 32-40. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_32

В современном мире непрерывно растет количество зарегистрированных устройств, передающих информацию. Происходит структурная реорганизация основ многих отраслей. Уже появились облачные сервисы, технологии определения местонахождения человека, усовершенствованные интерфейсы взаимодействия между человеком и машиной, аутентификация, различные интеллектуальные датчики и т.п. Таким образом, цифровая трансформация постепенно приходит во все сферы жизни человека, и со временем ее проявления будут еще более заметными. Цифровизация в глобальном смысле представляет собой внедрение цифровых технологий в разные сферы жизни и производства во всех без исключения странах. В узком смысле под цифровизацией понимается преобразование информации в цифровую форму информации. Передача такой оцифрованной информации ведет к снижению издержек, появлению новых возможностей и т.д.

По своей природе многие сигналы являются аналоговыми, а компьютер может выполнить обработку цифрового сигнала. В связи с этим необходимо выполнять преобразование сигнала из аналоговой формы в цифровую. Аналого-цифровое преобразование сигнала включает в себя два этапа: дискретизация сигнала (во времени или пространстве) и квантование по уровню. Дискретное преобразование Фурье является базовым алгоритмом преобразования сигналов в цифровых устройствах. Он реализован в различных программных средствах. Чтобы грамотно его использовать и правильно интерпретировать результаты, необходимо владеть соответствующим математическим аппаратом. Например, чтобы повысить точность – соответствие полученных значений исходному сигналу, нужно увеличить частоту дискретизации, т.е. чаще производить выборку. Здесь можно воспользоваться теоремой Котельникова: если аналоговый сигнал имеет ограниченный спектр, он может быть восстановлен однозначно и без потерь по своим дискретным отсчетам, взятым с частотой, строго большей удвоенной верхней частоты. Однако снижение точности может произойти и при восстановлении сигнала по его частотному спектру. Одной из задач исследования является выяснение особенностей интерполяционного приближения тригонометрическим многочленом.

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ), которое используется при цифровой обработке сигналов, по существу является унитарным оператором в конечномерном комплексном пространстве со скалярным произведением. Если  $V$  – такое пространство размерности  $N$ , то в нем можно выбрать базис такой, что скалярное произведение векторов  $x = (x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$  и  $y = (y_0, y_1, \dots, y_{N-1})$  из  $V$  запишется формулой  $(x, y) = x_0 \cdot \overline{y_0} + x_1 \cdot \overline{y_1} + \dots + x_{N-1} \cdot \overline{y_{N-1}}$ , где черта сверху означает комплексное сопряжение. ДПФ определяется как линейный оператор  $L: V \rightarrow V$ , переводящий вектор  $x$  в  $L(x) = x^*$ , где (1):

$$x_k^* = \sum_{m=0}^{N-1} x_m \xi^{-mk}, \quad (1)$$

$$\text{а } \xi = e^{\frac{2\pi i}{N}}.$$

Формула (1) определяет прямое преобразование. Обратное же выражает компоненты  $x$  через компоненты  $x^*$  (2):

$$x_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^* \xi^{mk}. \quad (2)$$

Из свойств ДПФ в литературе отмечаются:

а) сдвиг

$$x_{k-n}^* = \xi^{-kn} x_k^*$$

б) свертка

$$(x_k, y_k)^* = (x_k^*, y_k^*)$$

в) равенство Парсеваля

$$(x, y) = \frac{1}{N} (x^*, y^*), \text{ правда обычно равенство Парсеваля рассматривается при } x = y.$$

В формулах а) и б) предполагается, что индексы у компонент векторов могут быть любыми целыми числами, взятыми по модулю  $N$ . Формула в) означает, что оператор  $\sqrt{N}L$  является унитарным. С точки зрения линейной алгебры исчерпывающей информацией об операторе считается знание его собственных значений и структуры собственных подпространств. В известной литературе эти вопросы относительно  $L$  не затрагиваются, возможно, из-за отсутствия приложений. Поэтому ниже дается решение соответствующих вопросов.

*Предложение 1.* Оператор  $L^2$  переводит вектор  $x$  в вектор  $x^{**}$ , причем  $x_k^{**} = N x_{-k}$ .

$$\begin{aligned} \text{Доказательство.} \text{ Используя (1), имеем } x_k^{**} &= \sum_{s=0}^{N-1} x_s^* \xi^{-sk} = \sum_{s=0}^{N-1} \left( \sum_{r=0}^{N-1} x_r \xi^{-rs} \right) \xi^{-sk} = \\ &= \sum_{s=0}^{N-1} x_r \sum_{s=0}^{N-1} \xi^{-s(r+k)} = N x_{-k}, \end{aligned}$$

ввиду известной (и широко применяемой) формулы  $\sum_{s=0}^{N-1} \xi^{-sk} = \begin{cases} N, & k = 0 \\ 0, & k \neq 0 \end{cases}$ .

Доказанное предложение позволяет разложить линейное пространство  $V$  в прямую сумму двух подпространств, на которые  $L^2$  действует скалярным образом.

*Предложение 2.*  $V = V^+ \oplus V^-$ , где  $V^+$  состоит из векторов  $x$ , у которых  $x_k = x_{-k}$ , а  $V^-$  состоит из векторов  $x$ , у которых  $x_k = -x_{-k}$ . На  $V^+$   $L^2 = N$ , а на  $V^-$   $L^2 = -N$ .

*Доказательство.* Из  $x_k = \frac{1}{2}(x_k + x_{-k}) + \frac{1}{2}(x_k - x_{-k})$  для произвольного вектора  $x \in V$  следует представление  $V = V^+ \oplus V^-$ . В то же время Предложение 1 показывает, что действие оператора  $L^2$  на  $V^+$  есть умножение на  $N$ , а действие на  $V^-$  – умножение на  $-N$ .

В свою очередь, подпространства  $V^+$  и  $V^-$  можно далее разложить в прямые суммы меньших подпространств, на которые уже  $L$  действует скалярно. Это обычный прием в линейной алгебре: если квадрат оператора  $M$  есть скаляр,  $M^2 = \lambda$ , то  $M^2 - \lambda = (M - \sqrt{\lambda})(M + \sqrt{\lambda})$  и пространство раскладывается в прямую сумму подпространств, на которых  $M = \sqrt{\lambda}$  и  $M = -\sqrt{\lambda}$ .

Таким образом, имеем  $V^+ = V^{++} \oplus V^{+-}$ ,  $V^- = V^{-+} \oplus V^{--}$ , и оператор  $L$  действует на слагаемые следующим образом: на  $V^{++}$   $L = \sqrt{N}$ , на  $V^{+-}$   $L = -\sqrt{N}$ , на  $V^{-+}$   $L = i\sqrt{N}$ , на  $V^{--}$   $L = -i\sqrt{N}$ ,  $i = e^{\frac{\pi}{2}}$ .

Остается подсчитать размерность этих собственных подпространств. Если обозначить размерности  $V^{++}$ ,  $V^{+-}$ ,  $V^{-+}$ ,  $V^{--}$  соответственно через  $a, b, c, d$ , ( $a > 0, b > 0, c > 0, d > 0$ ), то, очевидно,  $a + b = \dim V^+$  – размерность  $V^+$ , а  $c + d = \dim V^-$  – размерность  $V^-$ . Размерности  $V^+$  и  $V^-$  легко подсчитываются:  $\dim V^+ = \frac{N}{2} + 1$  при  $N$  четном (у векторов из  $V^+$  неза-

висимыми компонентами служат  $x_0, x_1, \dots, x_{\frac{N}{2}}$  и  $\dim V^+ = \frac{N+1}{2}$  при  $N$  нечетном. Размер-

ность же  $\dim V^- = N - \dim V^+$ . Дополнительные соотношения для  $a, b, c, d$  можно получить из

рассмотрения характеристического многочлена  $f(t) = (t - \sqrt{N})^a (t + \sqrt{N})^b (t - i\sqrt{N})^c (t + i\sqrt{N})^d$ , в котором коэффициент при  $t^{N-1}$  равен  $-a\sqrt{N} + b\sqrt{N} - c \cdot i\sqrt{N} + d \cdot i\sqrt{N}$ .

С другой стороны, этот коэффициент равен следу, взятому с обратным знаком, матрицы оператора  $L$  в любом базисе пространства  $V$ . Из представления (1) видно, что этот след равен  $Tr L = \sum_{s=0}^N \xi^{-s^2}$ . Определение точного значения этой суммы представляет собой тонкую

теоретико-числовую проблему, идущую от Гаусса. Ответ можно найти в книге Дирихле [4],

$$\text{и он таков: } Tr L = \begin{cases} \sqrt{N}, & N \equiv 1 (4) \\ 0, & N \equiv 2 (4) \\ -i\sqrt{N}, & N \equiv 3 (4) \\ (1-i)\sqrt{N}, & N \equiv 4 (4) \end{cases}.$$

Соотношения  $a + b = \dim V^+$ ,  $c + d = \dim V^-$  и  $-a\sqrt{N} + b\sqrt{N} - c \cdot i\sqrt{N} + d \cdot i\sqrt{N} = Tr L$  позволяют найти значения  $a, b, c, d$ . Приведем окончательный ответ.

$$N \equiv 1 (4): \quad a = \frac{N+3}{4}, b = \frac{N-1}{4}, c = \frac{N-1}{4}, d = \frac{N-1}{4}$$

$$N \equiv 2 (4): \quad a = \frac{N+2}{4}, b = \frac{N+2}{4}, c = \frac{N-2}{4}, d = \frac{N-2}{4}$$

$$N \equiv 3 (4): \quad a = \frac{N+1}{4}, b = \frac{N+1}{4}, c = \frac{N-3}{4}, d = \frac{N+1}{4}$$

$$N \equiv 0 (4): \quad a = \frac{N}{4} + 1, b = \frac{N}{4}, c = \frac{N}{4} - 1, d = \frac{N}{4}$$

Пример:  $N = 4 \quad \xi = e^{\frac{2\pi i}{4}} = i$ .

Вектор  $x = (x_0, x_1, x_2, x_3)$  принадлежит  $V^+$ , если  $x_1 = x_3$ , и вектор  $x = (x_0, x_1, x_2, x_3)$  принадлежит  $V^-$ , если  $x_0 = x_2 = 0$ ,  $x_1 = -x_3$ . Таким образом,  $\dim V^+ = 3$ , а  $\dim V^- = 1$ . Стандартная процедура нахождения собственных векторов и собственных значений оператора приводит к следующему результату:  $V^{++}$  состоит из линейных комбинаций векторов  $\vec{e}_1 = (2, 1, 0, 1)$  и  $\vec{e}_2 = (1, 0, 1, 0)$ . Это собственные векторы, отвечающие собственному значению 2. Размерность  $V^{++}$  равна 2. Пространство  $V^{+-}$  одномерно с базисным вектором  $\vec{e}_3 = (-1, 1, 1, 1)$ . Базисным вектором в  $V^-$  служит  $\vec{e}_4 = (0, 1, 0, -1)$ . Он соответствует собственному значению  $-2i$ , и таким образом  $V^{--} = (0)$ , а  $V^{-+} = V^-$ .

Собственно, на этом теория ДПФ и заканчивается. Можно добавить несколько «табличных» примеров, которые могут служить контрольными при проведении прикладных расчетов. Так, легко просчитать ДПФ от вектора  $x = (1, e^{i\tau}, e^{2i\tau}, \dots, e^{(N-1)i\tau})$  и получить

$$x_k^* = \frac{1 - e^{i\tau N}}{1 - e^{i\tau - \frac{2\pi}{N}k}}, \quad k \neq 0.$$

ДПФ для вектора  $x = (0, 1, 2, \dots, N-1)$  можно получить, продифференцировав приведенный выше результат по переменной  $\tau$ , поделив на  $i$  и положив затем  $\tau = 0$ . Это дает  $x_k^* = -\frac{N}{1 - e^{-\frac{2\pi i}{N}k}}$ ,  $k \neq 0$  и  $x_0^* = \frac{N(N-1)}{2}$ .

ДПФ не получило бы широкого распространения, если бы не бурное развитие цифровой техники, в основе которой лежит идея цифровой передачи сигналов. Как математический аппарат для описания процессов передачи сигналов ДПФ появляется следующим образом. Сигнал описывается функцией  $x(t)$  от времени  $t$ . В большинстве природных процессов время считается непрерывным, и сам процесс наблюдается конечный промежуток времени, например, от  $t = 0$  до  $t = T$ . Изменяя при необходимости, масштаб времени, можно считать  $T = 2\pi$ . Тогда  $x(t)$  можно описывать рядом Фурье (3):

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos kt + b_k \sin kt, \quad (3)$$

или, в комплексной форме,

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{ikt}, \quad (4)$$

где  $c_k = \frac{a_k - ib_k}{2}$ ,  $c_{-k} = \frac{a_k + ib_k}{2}$  ( $c_k = \overline{c_{-k}}$ ).

Экспонента  $e^{ikt}$  называется  $k$ -ой гармоникой,  $c_k$  – ее (комплексной) амплитудой. Коэффициенты  $c_k$  в (4) вычисляются по известной формуле (5):

$$c_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x(t) e^{-\frac{2\pi i}{T}kt} dt. \quad (5)$$

Равенство Парсеваля для (3) и (4) записывается в виде (6):

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (x(t))^2 dt = \frac{a_0^2}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k^2 + b_k^2) = \sum_{-\infty}^{\infty} |c_k|^2. \quad (6)$$

и истолковывается как равенство средней на периоде  $T$  энергии сигнала и суммы таковых же энергий, составляющих сигнал гармоник. При цифровой обработке сигнала задается не  $x(t)$  как функция непрерывного аргумента – времени (это так называемый, аналоговый сигнал), а только значения  $x_k = x(t_k)$  в дискретном множестве  $t_0, t_1, \dots, t_{N-1}$  моментов времени. Эти значения называются отсчётами в соответствующие моменты времени. Обычно ограничиваются равноотстоящими значениями времени и предполагают  $t_k = \frac{2\pi}{N}k$ ,  $k = 0, 1, \dots, N-1$ . Если использовать для приближенного вычисления интегралов в формулах (5) и (6) формулы прямоугольников, получим (7):

$$c_k \approx \frac{1}{N} \sum_{s=0}^{N-1} x_s \xi^{-ks}, \quad \xi = e^{\frac{2\pi i}{N}}, \quad (7)$$

т.е. результат  $x_k^*$  дискретного преобразования Фурье есть приближение с точностью до множителя  $\frac{1}{N}$  комплексной амплитуды  $k$ -ой гармоники в разложении Фурье сигнала  $x(t)$ .

Удивительно, но приближения интеграла и  $c_k$  в (6) приводит к точному равенству (8):

$$\sum_{k=1}^{N-1} |x_k|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |x_k^*|^2. \quad (8)$$

Если ввести тригонометрический полином  $F_N(t)$  равенством (9):

$$F_N(t) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m^* e^{imt}, \quad (9)$$

то из (4) следует, что  $F_N(t_k) = x_k = x(t_k)$ . Поскольку  $x(t)$  предполагается действительной, то и  $\operatorname{Re}(F_N(t_k)) = x(t_k)$ , т.е.  $\operatorname{Re}(F_N(t))$  является тригонометрическим (действительным) интерполяционным многочленом для  $x(t)$ .

Одним из главных вопросов в теории интерполяции является изучение поведения интерполяционного приближения при увеличении числа интерполяционных точек. Рассмотрим эту задачу для функции  $F_N(t)$  из (9). Для этого приведем другое выражение для  $F_N(t)$ .

*Предложение 1.*

$$F_N(t) = \frac{1}{N} (e^{iNt} - 1) \sum_{m=0}^{N-1} \frac{x_m e^{imt}}{e^{it} - e^{im}}. \quad (10)$$

В справедливости этого предложения легко убедиться, если заметить, что  $F_N(t)$  есть многочлен от  $e^{it}$ , а (10) это просто формула интерполирования Лагранжа для точек  $t = t_k$ ,  $k = 0, 1, \dots, N-1$ .

С помощью (10) доказывается весьма неожиданное утверждение.

*Предложение 2.*

В точках  $t = t_{k+\frac{1}{2}} = \frac{2\pi}{N} \left( k + \frac{1}{2} \right)$ ,  $k = 0, 1, \dots$   $\operatorname{Re}(F_N(t))$  принимает значение

$$\frac{1}{N} (x_0 + x_1 + \dots + x_{N-1}).$$

*Доказательство.*

Множитель  $e^{iNt} - 1$  в (10) при  $t = t_{k+\frac{1}{2}}$  равен  $-2$ . Под знаком суммы множитель

$$\frac{e^{imt}}{e^{it} - e^{im}} \text{ при } t = t_{k+\frac{1}{2}} \text{ преобразуется к виду } \frac{1}{e^{i\left(t_{k+\frac{1}{2}} - t_m\right)} - 1} = \frac{e^{-\frac{i}{2}\left(t_{k+\frac{1}{2}} - t_m\right)}}{e^{\frac{i}{2}\left(t_{k+\frac{1}{2}} - t_m\right)} - e^{-\frac{i}{2}\left(t_{k+\frac{1}{2}} - t_m\right)}} =$$

$$= \frac{e^{-\frac{i}{2}\left(t_{k+\frac{1}{2}} - t_m\right)}}{2i \sin\left(\frac{t_{k+\frac{1}{2}} - t_m}{2}\right)} \text{ и имеет действительную часть, равную } -\frac{1}{2}. \text{ В итоге и получаются для}$$

$\operatorname{Re}\left(F_N\left(t_{k+\frac{1}{2}}\right)\right)$  нужные значения.

*Следствие.* При  $N \rightarrow \infty$   $F_N(t)$  не стремится к  $x(t)$ .

В заключении приведем два иллюстрационных примера.

1. Рассмотрим функцию  $x(t) = t$  на интервале  $[0, 2\pi]$ . Фурье-разложение имеет вид

(11):

$$x(t) = \pi - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin nt. \quad (11)$$

При подсчете  $x_k^* = \sum_{s=0}^{N-1} x_m \xi^{-mk}$  используют ДПФ от вектора  $(0, 1, 2, \dots, N-1)$ , приведен-

ное в конце п.1, что дает при  $x_m = \frac{2\pi}{N} m$   $x_0^* = \pi(N-1)$ ,  $x_m^* = \frac{-2\pi}{1 - e^{\frac{2\pi im}{N}}}$ .

Интерполяционный многочлен согласно (9)  $F_N(t) = \pi \left(1 - \frac{1}{N}\right) - \sum_{m=1}^{N-1} \frac{2\pi}{1 - e^{\frac{2\pi im}{N}}} \cdot e^{imt} \cdot \frac{1}{N}$ .

Отделение в этом случае действительной части дает (12):

$$\operatorname{Re}(F_N(t)) = \pi \left(1 - \frac{1}{N}\right) - \sum_{m=1}^{N-1} \frac{\pi}{N \sin \frac{\pi m}{N}} \cdot \sin \left(t + \frac{\pi}{N}\right) m. \quad (12)$$

Энергия ненулевых гармоник в (11) равна  $\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2}{n}\right)^2 = \frac{\pi^2}{3}$ . Энергия же таковых в (12)

$\frac{1}{2} \sum_{m=1}^{N-1} \left(\frac{\pi}{N \sin \frac{\pi m}{N}}\right)^2$ . Непростое доказательство того, что выражение равно  $\frac{\pi^2}{6} \left(1 - \frac{1}{N^2}\right)$ , мы

опускаем.

Отметим, что при  $N \rightarrow \infty$  энергия гармоник в (12) становится вдвое меньше, чем энергия в (11). Это явление можно объяснить так, как будто мнимая часть  $\operatorname{Im}(F_N(t))$  «забирает» половину энергии гармоник в  $x(t)$ .

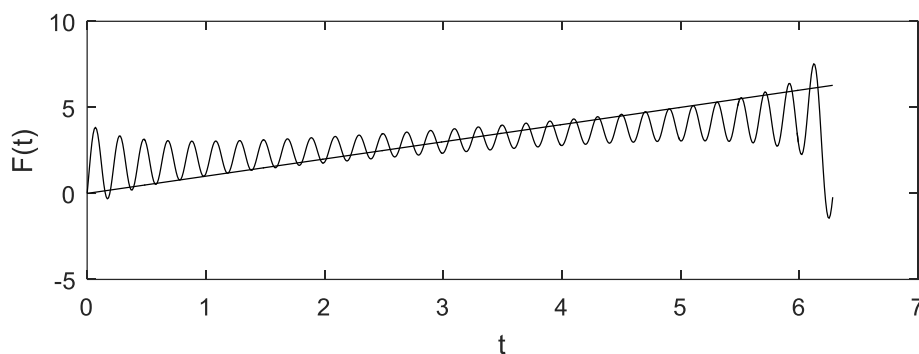
Более неприятное явление состоит в изменении спектрального состава  $x(t)$  при переходе  $\operatorname{Re}(F_N(t))$ , даже если компенсировать изменение энергии «усилением» сигнала  $\operatorname{Re}(F_N(t))$ . Действительно, амплитуда гармоник в  $x(t)$  пропорциональна  $\frac{1}{n}$ , а в  $\operatorname{Re}(F_N(t))$

они равны  $\frac{\pi}{N \sin \frac{\pi m}{N}}$  ( $m = 0, 1, \dots, N-1$ ). При  $N \rightarrow \infty$  и фиксированном  $n$  эти амплитуды

приближаются к  $\frac{1}{n}$ , но это не так, если  $n$  взять пропорциональным  $N$ , в частности, при

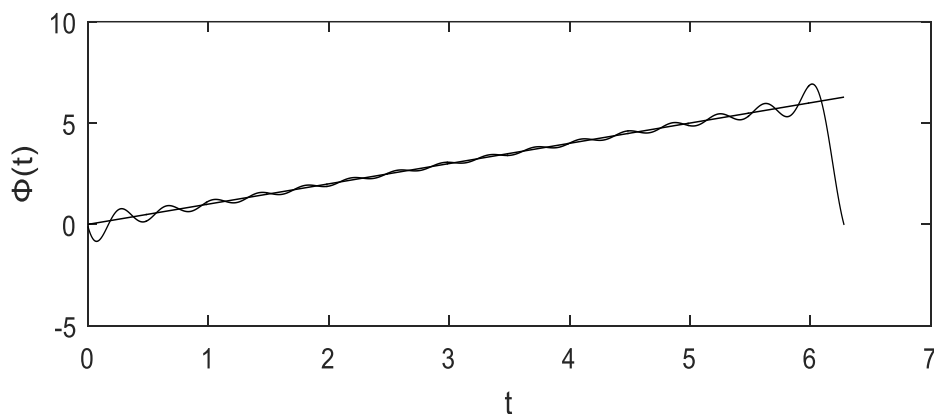
$n = N-1$  соответствующая амплитуда становится равной  $\frac{\pi}{N \sin \frac{\pi}{N}} \approx 1$ , а не  $\frac{1}{n}$ .

На рис.1 представлена действительная часть Фурье-разложения  $\operatorname{Re}(F_N(t))$ .

Рис. 1. Фурье-разложение функции  $x(t) = t$ Fig. 1. The Fourier decomposition of function  $x(t) = t$ 

Авторы рекомендуют вместо  $\text{Re}(F_N(t))$  взять действительную часть суммы  $\sum_{m=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} x_m^* e^{imt}$

(рис. 2). Оказывается, здесь наблюдается хорошее приближение к  $x(t)$ , но анализ этого явления мы приводить не будем.

Рис. 2. Фурье-разложение функции  $x(t) = t$ Fig. 2. The Fourier decomposition of function  $x(t) = t$ 

2. В [5] рассматривается пример разложения функции  $x(t) = e^{-t^2}$ ,  $t \in [-5, 5]$ ,  $N = 512$

. Компьютерные вычисления позволяют найти значения  $x_m^*$ . Так, оказывается,

$$x_0^* = 90.5724 + 0.0000i$$

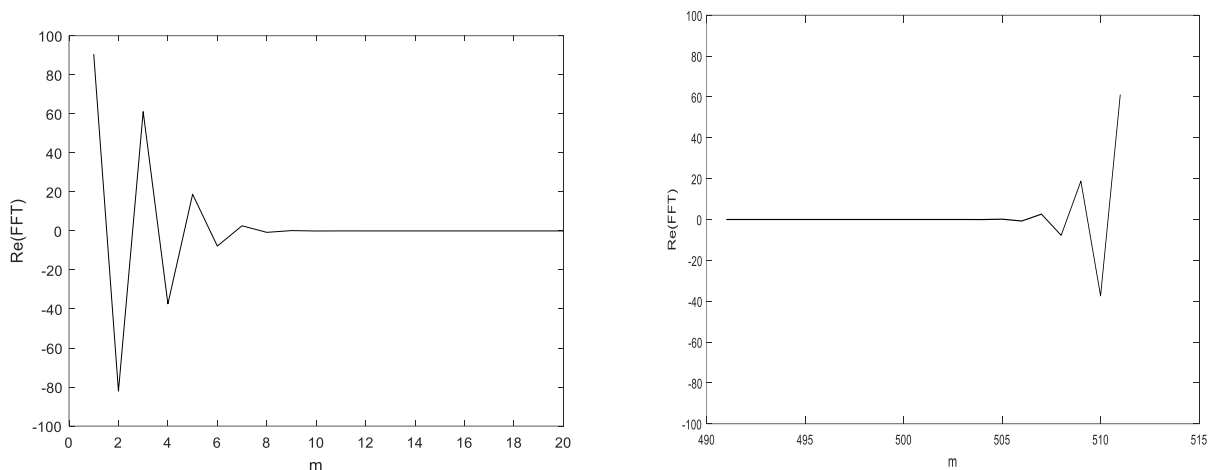
$$x_1^* = -82.0903 + 0.5037i$$

$$x_2^* = 61.1195 - 0.7501i$$

$$x_3^* = -37.3817 + 0.6882i$$

$$x_4^* = 18.7815 - 0.4611i$$

...



**Рис. 3. Действительная часть преобразования Фурье, построенная как функция номера**

**Fig. 3. The real part of the Fourier transform as a number function**

На рис. 3 обращает на себя внимание симметрия, которая является следствием равенства  $x_{N-m}^* = x_m^*$ , что следует из (7). Как и в предыдущем примере,  $\text{Re}(F_N(t))$  не стремится к  $x(t)$  при  $N \rightarrow \infty$ .

Таким образом, при применении дискретного преобразования Фурье следует учитывать следующие особенности. Во-первых, ошибочно полагать, что при увеличении числа отсчетов возрастает точность приближения. Во-вторых, один из примеров показывает, что для лучшей аппроксимации исходного сигнала вместо действительной части тригонометрического многочлена, составленного по коэффициентам, полученным с помощью дискретного

преобразования Фурье, можно взять действительную часть суммы  $\sum_{m=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} x_m^* e^{imt}$ .

Современный этап развития общества характеризуется интенсивным внедрением цифровых технологий в разные сферы жизни. Цифровые телесистемы создают возможность организации систем видеотелефонии, видеоконференцсвязи; существенно повышают качества передачи изображений и звука, цифрового сопряжения сетей с компьютерными Интернет-сетями. Актуальность цифровой трансформации на уровне целых отраслей экономики формирует нарастающий интерес к проблемам аналого-цифровых преобразований.

### Библиографический список

1. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. – М.: Бином, 2015. – 656 с.
2. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб., 2011. – 756 с.
3. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов / А. Оппенгейм, Р. Шафер. – М.: Техносфера, 2006. – 856 с.
4. Дирихле, П.Г.Л. Лекции по теории чисел / П.Г.Л. Дирихле. – М.: Книга по требованию, 2014. – 404 с.
5. Князев, Б.А. Дискретное преобразование Фурье – как это делается / Б.А. Князев, В.С. Черкасский // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2008. №3/4. С. 74-86.

Дата поступления  
в редакцию: 13.12.2019



---

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

---

УДК 621.038.538

DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_41

### ПРОГРАММА РАСЧЕТА УРОВНЕЙ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ОСТАНОВЛЕННОГО РЕАКТОРА

**Н.Г. Андреев**ORCID: 0000-0002-6670-0005 e-mail: [andreyev@mail.ru](mailto:andreyev@mail.ru)Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова  
*Нижний Новгород, Россия***В.Н. Вавилкин**ORCID: 0000-0002-5477-0022 e-mail: [v.vavilkin@yandex.ru](mailto:v.vavilkin@yandex.ru)Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова  
*Нижний Новгород, Россия*

Приводится описание кода *DOT-ACTIV* сквозного расчета активности и уровней гамма-излучения остановленного реактора. Применение данного кода позволяет повысить оперативность расчетов и достоверность полученных результатов при определении радиационных условий проведения работ. Код *DOT-ACTIV* включает комплексный расчет плотности потоков активирующих нейтронов при работе реактора, накопление продуктов активации конструкционных материалов и осколков деления в отработавшем ядерном топливе, расчет источников и уровней гамма-излучения после останова реактора. По результатам расчетов источников активационного гамма-излучения и гамма-излучения продуктов деления выполняется расчет плотности потока и функционалов гамма-излучения после останова реактора. При этом состав расчетной композиции может отличаться от композиции расчета плотности активирующих нейтронов при работе реактора, что позволяет моделировать различные состояния реактора. Опыт разработки программы позволяет создать аналогичные продукты для решения задач в трехмерной геометрии.

Выполнена апробация и тестирование кода *DOT-ACTIV* на различных платформах и конфигурациях операционных систем.

**Ключевые слова:** остановленный реактор, источники излучения, активационное гамма-излучение, гамма-излучения продуктов деления, радиационная безопасность.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Андреев, Н.Г. Программа расчета уровней гамма-излучения остановленного реактора / Н.Г. Андреев, В.Н. Вавилкин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 3. С. 41-48.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_41

### PROGRAM FOR CALCULATING THE GAMMA RADIATION LEVELS OF A SHUTDOWN REACTOR

**N.G. Andreev**ORCID: 0000-0002-6670-0005 e-mail: [andreyev@mail.ru](mailto:andreyev@mail.ru)Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering  
*Nizhny Novgorod, Russia***V.N. Vavilkin**ORCID: 0000-0002-5477-0022 e-mail: [v.vavilkin@yandex.ru](mailto:v.vavilkin@yandex.ru)Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** A description of the DOT-ACTIV code for an end-to-end analysis of the activity and gamma radiation levels in a shutdown reactor is given. Using this code increases the calculation speed and the validity of the results obtained when determining work conditions under radiation. The DOT-ACTIV code comprises the following components: a comprehensive calculation of the flow density of activating neutrons during reactor operation; the accumulation of products of activation in structural materials and fission products in the spent nuclear fuel; a calculation of the sources and gamma radiation levels after reactor shutdown. The results of calculating the sources of activating gamma radiation and the gamma radiation of fission products are used to calculate the flow density and the gamma radiation functionals after reactor shutdown. In so doing, the calculation composition components can differ from the composition used for calculating the density of activating neutrons during reactor operation. This makes it possible to simulate different reactor states. The expertise gained while developing the program enables creating similar products for solving three-dimensional geometry problems.

The results of evaluating and testing the DOT-ACTIV code on different platforms and configurations of operating systems are presented.

**Key words:** shutdown reactor, radiation sources, activation gamma radiation, gamma radiation of fission products, radiation safety.

**FOR CITATION:** Andreev N.G., Vavilkin V.N. Program for calculation the gamma radiation levels of a shutdown reactor. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. №3. P. 41-48.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_41

Одним из главных объектов обеспечения радиационной безопасности объектов использования ядерной энергии (ОИЯЭ) является остановленный реактор. Необходимость решения этой задачи существует как в процессе эксплуатации ОИЯЭ (осмотр, ремонт, замена оборудования), так и по ее завершении (вывод из эксплуатации, включая демонтаж, хранение или захоронение оборудования). Основными источниками, формирующими радиационные условия работ на остановленном реакторе, являются активационное гамма-излучение конструкционных материалов и излучение продуктов деления в составе отработавшего ядерного топлива.

Расчет уровней излучения остановленного реактора включает следующие составляющие (рис. 1):

- расчет плотности потоков активирующих нейтронов и накопления продуктов деления в топливе при работе реактора;
- расчет источников гамма-излучения после останова реактора;
- расчет уровней гамма-излучения.

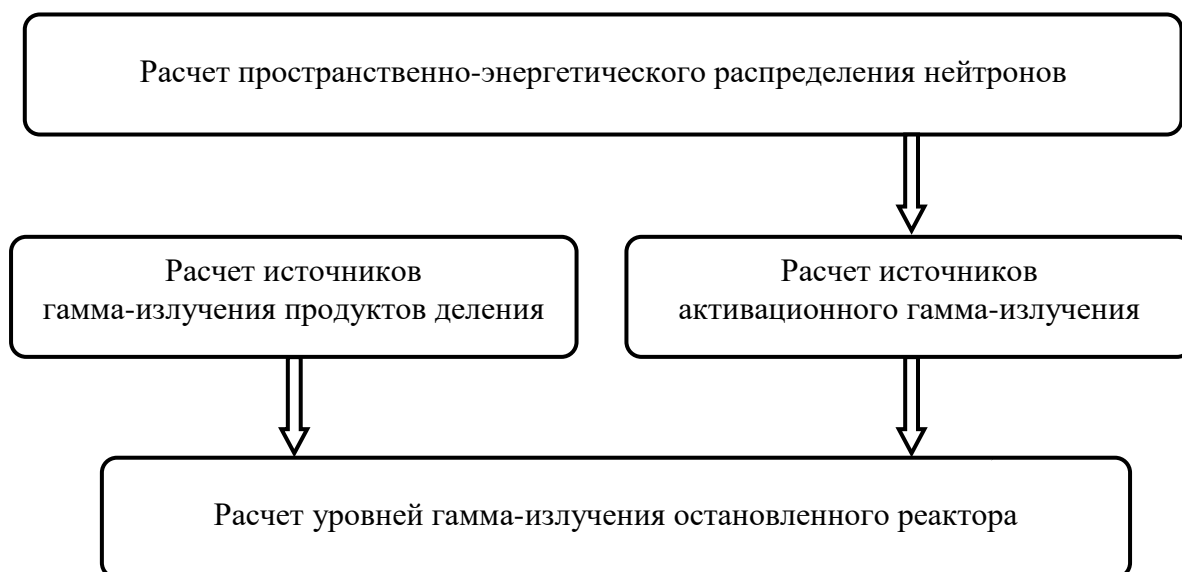


Рис. 1. Этапы расчета уровней излучения остановленного реактора

Fig. 1. Stages of calculating the radiation levels in a shutdown reactor

Существующие в настоящее время инженерные методы проектных расчетов предусматривают последовательные расчеты по каждому из перечисленных этапов с применением отдельных кодов и «ручной» передачей входных данных. Существенное повышение точности и сокращение времени расчетов достигается применением программного комплекса для сквозного расчета уровней гамма-излучения остановленного реактора. Программный комплекс *DOT-ACTIV* работает на базе кодов *DOT-III* [1], *DORT* [2, 3] с включением блоков расчета активности продуктов деления и активации, а также интенсивности их источников гамма-излучения.

### Расчет пространственно-энергетического распределения нейтронов

Расчет плотности потоков активирующих нейтронов выполняется в 2D-геометрии по кодам *DOT-III*, *DORT* с использованием библиотек констант *CASK-40* [4] или *BUGLE-96* [5]. Подготовка входных данных для расчетов, включая задание геометрической модели, материального состава расчетной композиции и распределения энерговыделения в активной зоне по результатам физического расчета, проводится по коду *DOT-GEOM*. При этом существует возможность изменения входных данных при расчетах уровней гамма-излучения остановленного реактора (удаление и добавление элементов конструкции, изменение состава пространственных зон и т.д.) без изменения расчетной сетки.

Код *DOT-GEOM* является универсальной интегрированной системой подготовки входных данных для расчетов биологической защиты реакторных установок. Основная задача кода *DOT-GEOM* состоит в сокращении времени и снижении вероятности ошибок при подготовке входных данных для проектных расчетов биологической защиты реакторных установок по кодам *DOT-III* и *DORT*. Многолетний опыт эксплуатации кода показал целесообразность его применения для решения широкого спектра задач, связанных с проектированием реакторных установок и расчетами в 2D-геометрии по кодам *DOT-III* и *DORT*. Благодаря коду *DOT-GEOM*, 2D коды *DOT-III* и *DORT* прочно вошли в практику проектных расчетов реакторных установок в АО «ОКБМ Африкантов».

### Расчет источников активационного гамма-излучения

Расчет источников гамма-излучения после останова реактора включает следующие основные этапы:

- импорт полей нейтронных потоков из выходных файлов кодов *DOT-III* или *DORT*;
- расчет источников активационного излучения на основе данных о модели эксплуатации, полях нейтронных потоков, материальном составе и геометрии элементов конструкции реакторной установки;
- подготовка входных данных для расчетов и расчеты плотности потоков гамма-излучения остановленного реактора с учетом возможного изменения геометрии и состава расчетной композиции – удаления технологических сред, элементов оборудования (например, теплоносителя, блоков биологической защиты, крышки реактора и т.д.) и включения нового оборудования (например, перегрузочной плиты или контейнера).

Плотность источников гамма-квантов продуктов активации конструкционных материалов рассчитывается по выражению (1):

$$q_n^a(r, T_a, t) = \sum_i A_i(r, T_a, t) \cdot \alpha_i^n, \quad (1)$$

где  $\alpha_i^n$  – выход гамма-квантов  $n$ -ой энергетической группы на распад  $i$ -того радионуклида,

$A_i(r, T_a, t)$  – удельная активность  $i'$ -ого радионуклида в точке  $r$  после времени активации  $T_a$  и времени выдержки  $t$ . Расчет удельной активности  $A_i(r, T_a, t)$  проводится по формуле (2):

$$A_i(r, T_a, t) = \rho_i \cdot \varepsilon_{i,i} \cdot F_{акм}^{i'}(r) \cdot \lambda_i \cdot [1 - \exp(-\lambda_i T_a)] \cdot \exp(-\lambda_i t), \quad (2)$$

где  $\rho_i$  – ядерная концентрация  $i$ -ого элемента в материале,  $\varepsilon_{i,i}$  – доля  $i'$ -того изотопа в  $i$ -ом элементе,  $\lambda_i$  – постоянная распада радионуклида, образовавшегося в результате активации  $i'$ -того изотопа,  $F_{акм}^{i'}(r)$  – относительная скорость активации  $i'$ -ого изотопа в точке  $r$ .

Относительная скорость активации  $i'$ -ого изотопа в точке  $r$  определяется следующим образом (3):

$$F_{акм}^{i'}(r) = \sum_{j=1}^N \Phi^j(r) \sigma_{акм i'}^j, \quad (3)$$

где  $\Phi^j(r)$  – плотность потока нейтронов  $j$ -той группы в точке  $r$ ,  $\sigma_{акм i'}^j$  – сечение активации  $i'$ -ого изотопа нейтронами  $j$ -ой группы,  $N$  – число энергетических групп нейтронов (22 группы для библиотеки *CASK-40* и 47 групп для библиотеки *BUGLE-96*).

Расчет удельной активности дочернего радионуклида, получающегося в результате распада материнского, образовавшегося в результате активации, проводится по формуле (4):

$$A_i^D(r, T_a, t) = \frac{\lambda_i^D}{\lambda_i^D - \lambda_i^M} \cdot A_i^M(r, T_a, t = 0) \cdot [\exp(-\lambda_i^M \cdot t) - \exp(-\lambda_i^D t)] + A_i^M(r, T_a = \infty, t = 0) \cdot \lambda_i^D \cdot \exp(-\lambda_i^D \cdot t) \cdot \left\{ \frac{1}{\lambda_i^D} \cdot [1 - \exp(-\lambda_i^D \cdot T_a)] + \frac{1}{\lambda_i^D - (\lambda_i^M + F_{обыз}^{iM})} \cdot [\exp(-\lambda_i^D \cdot T_a) - \exp(-(\lambda_i^M + F_{обыз}^{iM}) \cdot T_a)] \right\}. \quad (4)$$

Индекс «М» относится к параметрам материнского радионуклида, индекс «Д» – к параметрам дочернего. Величины  $A_i^M(r, T_a, t = 0)$  и  $A_i^M(r, T_a = \infty, t = 0)$  определяются из выражения (1).

### Расчет источников гамма-излучения продуктов деления

Плотность источников гамма-излучения продуктов деления в активной зоне определяется как (5):

$$q_n^{fp}(r, T_f, t) = \sum_i \lambda_i \cdot N_i(r, T_f, t) \cdot \alpha_i^n, \quad (5)$$

где  $N_i(r, T_f, t)$  – концентрация  $i$ -того нуклида после времени работы активной зоны  $T_f$  и времени выдержки  $t$ .

Изменение числа ядер-продуктов деления в любой момент времени обусловлено тремя основными процессами:

- образованием ядер непосредственно в результате деления;
- образованием ядер в результате распада радионуклидов-предшественников;
- убылью ядер за счет радиоактивного распада.

Накопление продуктов деления в топливе описывается следующей системой дифференциальных уравнений (6):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d N_1^T}{dt} = C_2 \cdot \alpha_1 - \lambda_1 \cdot N_1^T; \\ \dots \\ \frac{d N_i^T}{dt} = C_2 \cdot \alpha_i + \sum_{j=1}^{i-1} (\lambda_j \cdot f_{j \rightarrow i} \cdot N_j^T) - \lambda_i \cdot N_i^T, \end{array} \right. \quad (6)$$

где  $C_2 = 3,2 \cdot 10^{16} P$  – скорость деления  $^{235}\text{U}$ ,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\alpha_i$  – выход ядер радионуклида  $i$  при делении  $^{235}\text{U}$ , отн. ед.;

$f_{j \rightarrow i}$  – коэффициент ветвления радионуклида  $i$ , в цепочке радиоактивного распада (доля ядер радионуклидов  $j$ , переходящих в радионуклид  $i$ ), отн. ед.;

$\lambda_i$  – постоянная распада радионуклида  $i$ ,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\lambda_j$  – постоянная распада радионуклида  $j$ ,  $\text{с}^{-1}$ ;

$N_i^T$  – число ядер радионуклида  $i$  в топливе;

$N_j^T$  – число ядер радионуклида  $j$  в топливе;

$P$  – мощность реактора на расчетном интервале времени  $t_p$ , МВт;

$3,2 \cdot 10^{16}$  – число делений в секунду на 1 МВт.

Процессы выгорания продуктов деления не учитываются. Решение системы уравнений (6) проводится аналитическим методом для постоянного на интервале времени  $t_p$  уровня мощности. В качестве граничного условия принимается значение активности  $N_i^T(0)$  в начале расчетного интервала времени  $t_p$ . Решение системы уравнений для каждого расчетного интервала времени  $t_p$  находится в виде:  $N_i^T(t_p) = n_i^T + \sum_{j=1}^i n_{ij}^T \cdot \exp(-\lambda_j t_p)$ , где

$N_i^T(t_p)$  – число ядер радионуклида  $i$  на конец расчетного интервала времени  $t_p$ ,  $n_i^T$  и  $n_{ij}^T$  – постоянные коэффициенты.

### Расчет функционалов гамма-излучения остановленного реактора

Расчет плотности потоков и функционалов потока гамма-излучения остановленного реактора проводится с помощью кодов *DOT* или *DORT* с учетом возможного изменения геометрии и состава расчетной композиции. По результатам расчетов определяются необходимость организационных мероприятий и защитных средств, обеспечивающих радиационную безопасность работ с оборудованием остановленного реактора. Результаты расчетов активности радионуклидов активационного происхождения используются для определения категории элементов конструкции реакторной установки как радиоактивных отходов в соответствии с ОСПОРБ-99/2010 [6].

### Основные возможности программы DOT-ACTIV

Программа *DOT-ACTIV* позволяет создавать расчетные модели различных размеров по площади от  $\sim 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$  до  $2500 \text{ м}^2$  и более. Этот аспект создает определенные сложности в тестировании и апробации программы для столь широкого круга задач.

Дополнительные сложности создает прямоугольная расчетная сетка в программах *DOT* и *DORT*, которая плохо сочетается с реальной геометрией конструкций реакторных установок. Для ускорения ввода геометрии конструкций с границами, не параллельными ли-

ниям сетки, *DOT-ACTIV* содержит графические примитивы: многогранник, окружность, кольцо, а также их производные эллипс и эллиптическое кольцо. Также в составе программы имеются средства макро-редактирования геометрических моделей: обрезка, сдвиг, создание группы тепловыделяющих элементов круглого или шестигранного сечения с произвольными размерами и шагом. Ускорению разработки расчетных моделей способствует стандартизированный интерфейс программы, банк данных по материалам конструкций реакторных установок с возможностью его расширения для решения задач при проектировании биологической защиты различного назначения.

Одной из основных базовых функций программы является возможность изменения шага расчетной сетки как в отдельной геометрической зоне, так и в целом по расчетной композиции. При этом автоматически вносятся изменения во все связанные параметры, в том числе, в поля энерговыделения, без каких-либо действий пользователя, как в уже ранее созданной расчетной модели, так и во вновь создаваемой.

Для обеспечения принципа «сквозного» моделирования конструкций реакторных установок в программе поддерживается импорт полей энерговыделения или осколков деления из результатов физических расчетов активных зон. При этом поля энерговыделения и осколков деления объединяются в единый файл, который может содержать информацию по различным моментам кампании активной зоны, образуя своеобразный банк данных, содержащий полную информацию по полям одной активной зоны. Программа читает поля из файла и преобразует их от сетки физического расчета к сетке модели расчета биологической защиты, попутно проверяя правильность основных размеров активной зоны для исключения возможных ошибок.

Отдельно необходимо отметить, что программы *DOT* и *DORT* решают кинетическое уравнение Больцмана для частиц, движущихся по дискретным направлениям. При малом числе угловых направлений в слабо рассеивающих средах – таких, как воздух – возможен «выброс» потока частиц вдоль выбранных направлений, что приводит к ошибкам в интерпретации результатов расчетов. Поэтому в банке данных по параметрам расчетов *DOT-ACTIV* содержится широкий набор направляющих косинусов и квадратурных весов: от  $S_8$  до  $S_{512}$ , что соответствует 96 и 132 096 угловым направлениям. Такое решение является уникальным в практике расчета по программам *DOT* и *DORT*, поскольку ранее при расчетах использовался максимальный порядок  $S_{16}$  для симметричных угловых направлений. Для программы *DOT-ACTIV* был получен и применен ряд более высоких угловых квадратур, поскольку в конечном итоге большое число угловых направлений позволяет нивелировать эффект «выброса» потока, но прямо пропорционально увеличивает время решения задачи.

Программа *DOT-ACTIV* содержит средства блокировки от некорректного ввода данных и диагностику возможных ошибок, а также поддерживает два интерфейсных языка: английский и русский, что позволяет применять ее на разных платформах *WINDOWS*.

Результатом работы программы являются:

- статистика по объемам расчетных геометрических зон, что бывает необходимо при расчете средних удельных характеристик полей функционалов и для проверки правильности автоматически генерируемых объектов;
- максимальные и интегральные значения активности продуктов активации конструкционных материалов по геометрическим зонам расчетной модели;
- файл с полными входными данными для расчета по программам *DOT* или *DORT* с любой целевой библиотекой констант *CASK* или *BUGLE*.

В целом максимальные возможности программы следующие:

- размер вводимой композиции – 4 000 000 расчетных ячеек;
- количество режимов, различающихся мощностью и длительностью работы, в расчете источников продуктов деления и активации – 500;
- учитываются 82 реакции активации и 256 радионуклидов продуктов деления.

## Апробация и тестирование программы DOT-ACTIV

Апробация и тестирование программы *DOT-ACTIV* проводились практически на всех разработанных АО «Африкантов» проектах реакторных установок – от реакторной водородной установки плавучей АЭС КЛТ-40С до реакторной натриевой установки на быстрых нейтронах БН-1200, а также при обосновании радиационной безопасности оборудования для перегрузки реакторов и контейнеров при транспортировке отработавшего топлива и радиоактивных отходов, решения вопросов утилизации реакторных установок. Отдельно необходимо отметить успешное применение кода *DOT-ACTIV* студентами НГТУ им. Р.Е. Алексеева при обосновании безопасности и расчете вариантов конструкции нейтронного конвертера, что реализовалось во множестве курсовых работ, статьях в рецензируемых изданиях [7-10] и двух магистерских диссертациях [11, 12].

Применение кода *DOT-ACTIV* за пределами Российской Федерации позволило успешно проверить и отладить работоспособность программы на иностранных платформах с операционной системой *WINDOWS* без поддержки русского языка.

Апробация и тестирование программы проводилась на всех доступных авторам платформах и конфигурациях операционных систем – от *WINDOWS XP* до *WINDOWS 10*, ноутбуках и стационарных компьютерах различной мощности. Результаты расчетов проверялись по экспериментальным данным и сравнивались с расчетами по альтернативным кодам. Получено хорошее совпадение результатов расчетов по коду *DOT-ACTIV* и экспериментальных данных, а также с результатами расчетов по альтернативным кодам.

В целом необходимо отметить быстрое освоение программы студентами в рамках учебного процесса, широкое применение специалистами при обосновании радиационной безопасности технологических процессов и реакторных установок на всех этапах жизненного цикла, так же широкий функционал программы и точность результатов расчетов.

## Выводы

Код *DOT-ACTIV* включает комплексный расчет плотности потоков активирующих нейтронов при работе реактора, накопление продуктов активации конструкционных материалов и осколков деления в отработавшем ядерном топливе, расчет источников и уровней гамма-излучения после останова реактора.

Применение кода *DOT-ACTIV* позволяет повысить оперативность расчетов и достоверность полученных результатов при определении радиационных условий проведения работ на остановленном реакторе. Опыт разработки программы позволил создать аналогичные продукты для решения задач в трехмерной геометрии.

## Библиографический список

1. **Rhoades, W.A.** The DOT III Two Dimensional Discrete Ordinates Transport Code / W.A. Rhoades, F.R. Mynatt, ORNL/TM4280, 1973.
2. **Scott, W.H.** A User's Manual for MASH 1.0 – “A Monte Carlo Adjoint Shielding Code System” / W.H. Scott, J.A. Stoddard // Section 4.0 “DORT: A Two-Dimensional Discrete Ordinates”, ORNL/TM-1178. Marsh 1992.
3. DOORS3.2a “One, Two- and Three Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code System, CCC-650, Oak Ridge National Laboratory, October 2003.
4. CASK, 40 Groups Coupled Neutron and Gamma ray Cross Section Data. RSIC Data Library DLC23, 1973.
5. RSICC DATA LIBRARY COLLECTION, BUGLE-96 “Coupled 47 Neutron, 20 Gamma-Ray Group Cross Section Library Derived from ENDF/B-VI for LWR Shielding and Pressure Vessel Dosimetry Applications”, DLC-185, BUGLE-96, Oak Ridge National Laboratory, July 1999.

6. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. В редакции Изменений № 1, утвержденных Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 16.09.2013 № 43.
7. **Андреев, В.В.** Расчетно-теоретическое обоснование конструкции нейтронного конвертера / В.В. Андреев, Н.Г. Андреев, А.А. Кувшинова, С.Л. Леванов, И.С. Худяков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. №3 (122). 2018.
8. **Андреев, В.В.** Обоснование радиационной безопасности нейтронного конвертера на всех этапах жизненного цикла в рамках проектно-ориентированного обучения студентов НГТУ им. П.Е. Алексеева / В.В. Андреев, Н.Г. Андреев, К.Г. Галстян, С.Л. Леванов // Научно-технический вестник Поволжья. №3. 2019.
9. **Андреев, В.В.** Слюсарь. Расчетно-теоретическое обоснование оптимальной конструкции нейтронного конвертера / В.В. Андреев, Н.Г. Андреев, Ж.В. Гладкова, Е.В. Панина, В.В. // Научно-технический вестник Поволжья. №12. 2019.
10. **Сметанина, Т.Р.** Расчет конструкции лабораторного комплекса «Нейтронный конвертер» / Т.Р. Сметанина, Е.А. Гурьева, В.В. Андреев, Н.Г. Андреев // Научно-технический вестник Поволжья. №6, 2020.
11. **Галстян, К.Г.** Магистерская диссертация. 2019.
12. **Сметанин, Т.Р.** Магистерская диссертация. 2018.

*Дата поступления  
в редакцию: 20.05.2021*



УДК 621.038.538

DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_49

## РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ РЕАКТОРА ТИПА БН С СИСТЕМОЙ РАСХОЛАЖИВАНИЯ ЧЕРЕЗ МЕЖПАКЕТНОЕ ПРОСТРАНСТВО ТВС

**А.М. Анфимов**ORCID: 0000-0003-3030-9247 e-mail: [anfimov@okbm.nnov.ru](mailto:anfimov@okbm.nnov.ru)

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

*Нижний Новгород, Россия***И.Н. Кирилов**ORCID: 0000-0002-2946-7216 e-mail: [anfimov@okbm.nnov.ru](mailto:anfimov@okbm.nnov.ru)

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

*Нижний Новгород, Россия***Д.В. Кузнецов**ORCID: 0000-0002-3738-7902 e-mail: [anfimov@okbm.nnov.ru](mailto:anfimov@okbm.nnov.ru)

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

*Нижний Новгород, Россия***С.А. Рогожкин**ORCID: 0000-0001-5732-7934 e-mail: [rogozhkin@okbm.nnov.ru](mailto:rogozhkin@okbm.nnov.ru)

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

*Нижний Новгород, Россия*

Объектом исследования является система аварийного расхолаживания (САРХ) через межпакетное пространство (МПП) тепловыделяющих сборок (ТВС) активной зоны (а.з.) реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН). С целью обоснования эффективности отвода тепла от реактора САРХ через МПП проведены расчетные исследования с использованием аттестованного кода нового поколения СОКРАТ-БН. Создана нодализационная схема реактора БН с системой расхолаживания через МПП ТВС, позволяющая детально моделировать температурное состояние ТВС а.з. и их МПП. Разработка данной расчетной модели осуществлялась с учетом опыта верификации аттестованных на экспериментальных данных БН-600 и БН-800 кодов СОКРАТ-БН и HYDRA-IBRAE/LM1. С использованием разработанной нодализационной схемы выполнены расчеты двух режимов работы САРХ: режима готовности к расхолаживанию и режима расхолаживания. Определены температуры, расходы и направления течения натриевого теплоносителя в реакторе, а также температуры основных элементов реактора.

Анализ результатов расчетов показал, что в режиме расхолаживания циркуляция натрия в МПП ТВС вносит значительный вклад (~ 50 %) в теплоотвод от тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) а.з. реактора. Данный вывод свидетельствует о высокой теплоотводящей способности МПП ТВС, что позволяет рассматривать данный вариант конструкции САРХ в качестве альтернативного для разрабатываемого перспективного реактора БН.

**Ключевые слова:** активная зона, реактор с жидкометаллическим теплоносителем, система безопасности, нодализационная схема, расчетная модель, система аварийного расхолаживания, межпакетное пространство, СОКРАТ-БН.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Анфимов, А.М. Разработка расчетной модели реактора типа БН с системой расхолаживания через межпакетное пространство ТВС / А.М. Анфимов, И.Н. Кирилов, Д.В. Кузнецов, С.А. Рогожкин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 3. С. 49-56. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_49

## THE DEVELOPMENT OF THE COMPUTATIONAL MODEL OF A FAST-NEUTRON REACTOR WITH A SYSTEM FOR HEAT REMOVAL THROUGH THE FUEL ASSEMBLY INTERWRAPPER SPACE

**A.M. Anfimov**

ORCID: **0000-0003-3030-9247** e-mail: **anfimov@okbm.nnov.ru**

Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**I.N. Kirilov**

ORCID: **0000-0002-2946-7216** e-mail: **anfimov@okbm.nnov.ru**

Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**D.V. Kuznetsov**

ORCID: **0000-0002-3738-7902** e-mail: **anfimov@okbm.nnov.ru**

Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**S.A. Rogozhkin**

ORCID: **0000-0001-5732-7934** e-mail: **rogozhkin@okbm.nnov.ru**

Federal State Unitary Enterprise I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The object of investigation is the emergency cooldown system (ECDS) functioning through the interwrapper space (IWS) of fuel assemblies (FA) in the active zone (a.z.) of a fast-neutron (FN) reactor with a sodium coolant. To substantiate the effectiveness of heat removal from the reactor with the ECDS through the IWS, analytical studies were performed using a validated new-generation SOKRAT-BN code. A nodalization scheme was developed for a fast-neutron reactor with a heat removal system through the IWS of the FA. It enables to simulate in detail the heat condition of the active zone FA and their IWS. This computational model was developed based on the experience of verifying certified codes SOKRAT-BN and HYDRA-IBRAE/LM1 with the use of experimental data obtained on BN-600 and BN-800. The developed nodalization scheme was used for analyzing two ECDS operating conditions: the cooldown readiness condition and the cooldown condition. The temperatures, flow rates and flow directions of the sodium coolant in the reactor, as well as the temperatures of key reactor components were found.

Analysis of computational results demonstrated that in the cooldown condition sodium circulation in the IWS of the FA contributes substantially (appr. 50%) to heat removal from the fuel assemblies of the reactor active zone. This finding is indicative of the high heat removal capacity of the FA IWS, enabling to consider this ECDS design variant as an alternative one for the advanced FNR being designed.

**Key words:** active zone, reactor with a liquid metal coolant, safety system, nodalization scheme, computational model, emergency cooldown system, interwrapper space, SOKRAT-BN.

**FOR CITATION:** A.M. Anfimov, I.N. Kirilov, D.V. Kuznetsov, S.A. Rogozhkin. The development of the computational model of a fast-neutron reactor with a system for heat removal through the fuel assembly interwrapper space. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. №3. Pp. 49-56. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_49

### Введение

В аварийных режимах работы безопасность ядерного реактора обеспечивается, главным образом, за счет функционирования различного рода систем безопасности. Применительно к реакторным установкам типа БН ключевое место занимает *система аварийного расхолаживания – САРХ*. Она предназначена для аварийного отвода тепла от реактора при отсутствии возможности использования для этой цели систем нормального теплоотвода, а также для отвода остаточных тепловыделений от остановленного реактора в режимах нормальной эксплуатации (НЭ).

В настоящее время в АО «ОКБМ Африкантов» имеется опыт проектирования различных вариантов систем расхолаживания реакторов типа БН. Для РУ БН-600 и БН-800 расхолаживание реактора осуществляется через промежуточные теплообменники (ПТО) по схеме циркуляции теплоносителя, совпадающей с режимами НЭ. В проектируемом перспективном реакторе БН расхолаживание реактора осуществляется через встроенные в бак реактора автономные теплообменники (АТО), которые через обратный клапан и напорные трубопроводы в процессе выбега главного циркуляционного насоса первого контура (ГЦН-1) подключаются к основной трассе циркуляции теплоносителя. В некоторых зарубежных реакторных установках БН АТО не соединены с напорной камерой, а выходящий из АТО натрий сливается в верхнюю камеру смешения, откуда он может поступать во внутреннее пространство ТВС и МПП ТВС. Таким образом, расхолаживание осуществляется за счет циркуляции теплоносителя внутри ТВС и в их МПП. Вариант САРХ с расхолаживанием через МПП рассматривается для перспективного реактора БН с целью улучшения его технико-экономических характеристик. Принципиальная схема расхолаживания через МПП ТВС представлена на рис. 1.

Актуальность исследования определяется необходимостью оценки эффективности САРХ через МПП. Обоснование эффективности систем расхолаживания перспективного реактора типа БН выполняется с использованием аттестованного кода нового поколения СОКРАТ-БН [1-3].

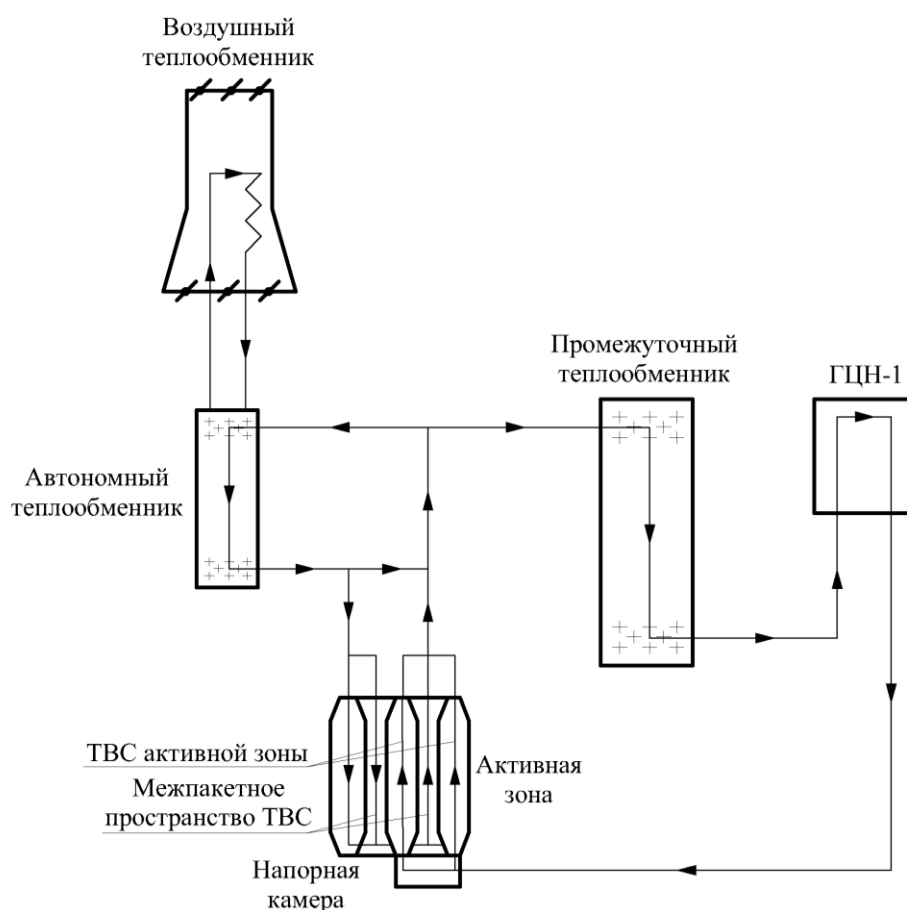


Рис. 1. Принципиальная схема расхолаживания через МПП ТВС

Fig. 1. Key diagram of the heat removal scheme through the FA IWS

### Краткое описание кода СОКРАТ-БН

Код СОКРАТ-БН предназначен для обоснования безопасности реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем в режимах НЭ, нарушений нормальной эксплуатации, проектных и запроектных аварий путем численного моделирования связанных нейтронно-физических, термомеханических и теплогидравлических процессов. Для проведения расчетных исследований в рамках данной работы использовался теплогидравлический модуль данного кода.

Теплогидравлический модуль кода СОКРАТ-БН позволяет описывать широкий спектр процессов, протекающих в различных типах теплоносителей (натрий, вода, воздух), на основе апробированных расчетных методик и физических моделей. Моделирование теплогидравлических процессов кодом СОКРАТ-БН осуществляется на основе численного решения системы уравнений, выражающей законы сохранения массы, энергии и количества движения (термически неравновесная гетерогенная двухжидкостная модель с равным давлением фаз), замыкающей термодинамическими соотношениями состояния теплоносителя и соотношениями, описывающими взаимодействия фаз со стенками каналов. Результаты верификации кода [1] на обширной экспериментальной базе отечественных и зарубежных реакторных установок подтвердили корректность моделирования режимов с естественной циркуляцией, что является определяющим фактором при расчете режимов расхолаживания с потерей принудительной циркуляции.

В результате верификации код СОКРАТ-БН аттестован (в том числе, версия, предназначенная для расчета тяжелых аварий) получены аттестационные паспорта [2, 3]. Также в составе данного кода, помимо одномерного, имеется двумерный теплогидравлический модуль [4], который позволяет в приближенной R-Z геометрии учитывать пространственные эффекты для одно- и двухфазного теплоносителя внутри ТВС. Возможность моделирования ТВС в 2D-приближении позволяет учесть теплоперенос от натрия внутри ТВС к натрию в МПП, что является важным аспектом при выполнении расчетов режимов расхолаживания.

Верификация 2-D теплогидравлического модуля осуществлялась на экспериментальных данных стендов *NSK* (Германия) и *SIENA* (Япония). Расчет теплогидравлических параметров натриевого теплоносителя выполнялся для 7-, 19-, 37- и 169-стержневых сборок. При сравнении результатов расчетов с экспериментальными данными было установлено, что двумерный модуль позволяет корректно описывать теплогидравлические параметры при течении натрия в межствольном пространстве ТВС [4].

### Расчетная схема реактора типа БН

Для проведения расчетных исследований теплогидравлических процессов была разработана нодализационная схема реактора типа БН с системой расхолаживания через МПП ТВС. При ее разработке использовался опыт верификации аттестованных на экспериментальных данных БН-600 [5] и БН-800 [6] кодов СОКРАТ-БН и *HYDRA-IBRAE/LM1*. Расчетная схема реактора (рис. 2) включает в себя следующие элементы: а.з.; верхнюю камеру смещения реактора; ПТО; АТО; сливные камеры ПТО; ГЦН-1 и их напорные трубопроводы; напорную камеру; нижнюю камеру реактора (объем ниже средней плиты опорного пояса); трассу охлаждения корпуса реактора; тепловые экраны; опорный пояс; центральную поворотную колонну; основной и страховочный корпус реактора.

Разработанная расчетная модель позволяет учитывать:

- основную и вспомогательные трассы течения теплоносителя в реакторе;
- теплообмен в основном оборудовании и между объемами теплоносителя, образованными внутриреакторными конструкциями, теплопередачу на корпус реактора;
- теплоемкость теплоносителя и внутриреакторных конструкций;
- неравномерность температурного состояния по высоте и радиусу а.з.;

- вынужденную и свободную конвекцию теплоносителя;
- тепловые потери с корпуса реактора;
- кипение и конденсацию натрия.

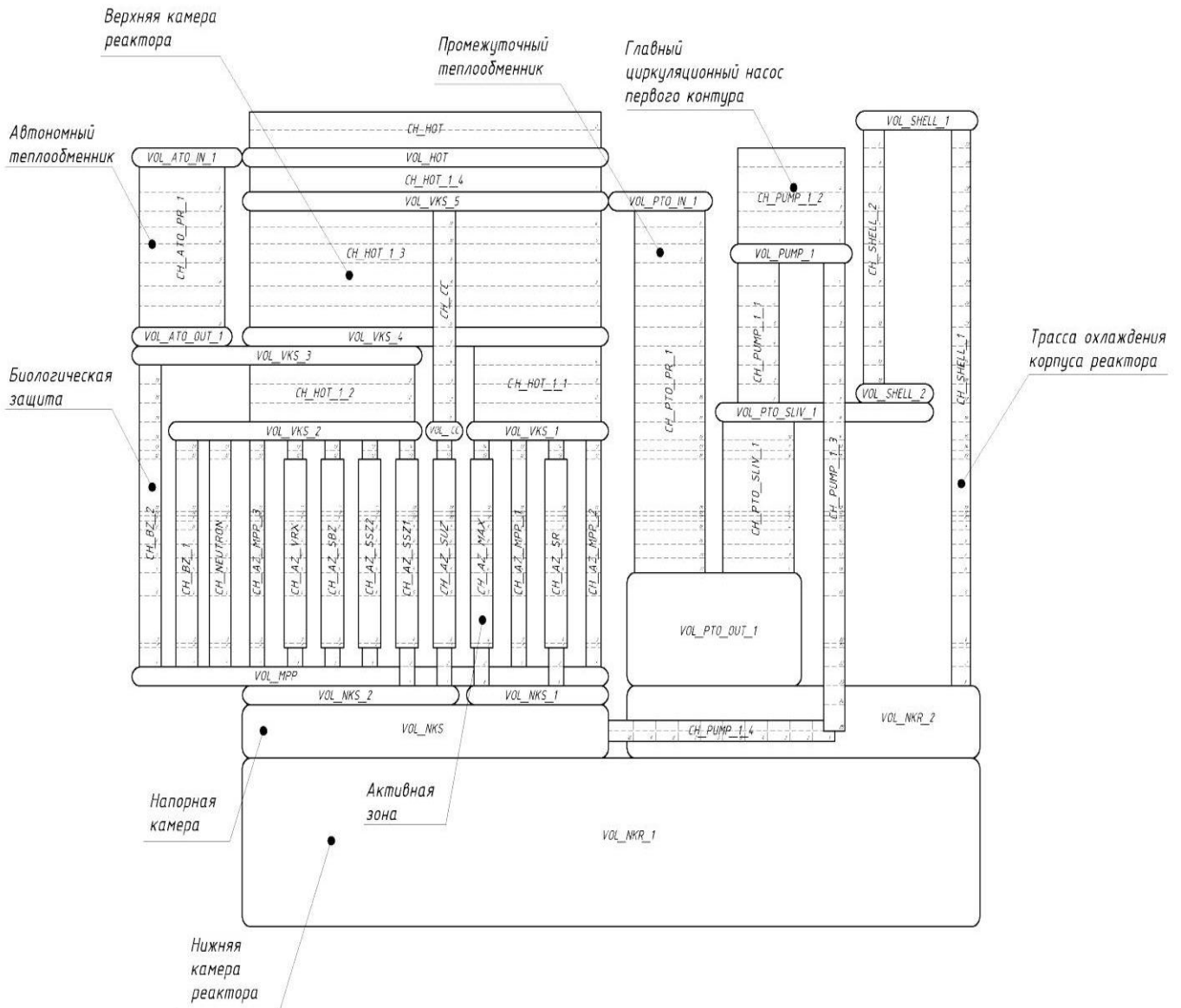


Рис. 2. Расчетная схема реактора

Fig. 2. Reactor design diagram

Межтвэльное пространство ТВС делится на несколько радиальных слоев. На рис. 3 представлена схема разбиения ТВС на радиальные слои. Количество твэл в каждом радиальном слое определяется по доле периметра твэл, смачиваемых в радиальном слое, от общего смачиваемого периметра твэл в ТВС. Главным отличием от ранее разработанных расчетных моделей реакторных установок БН является детализированное моделирование температурного состояния ТВС а.з. и их МПП.

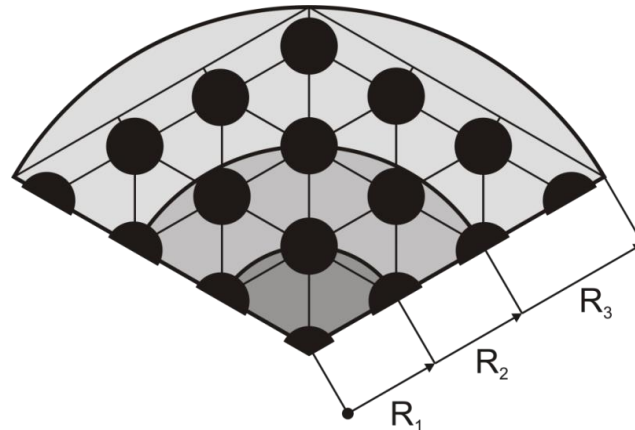


Рис. 3. Расчетная схема ТВС

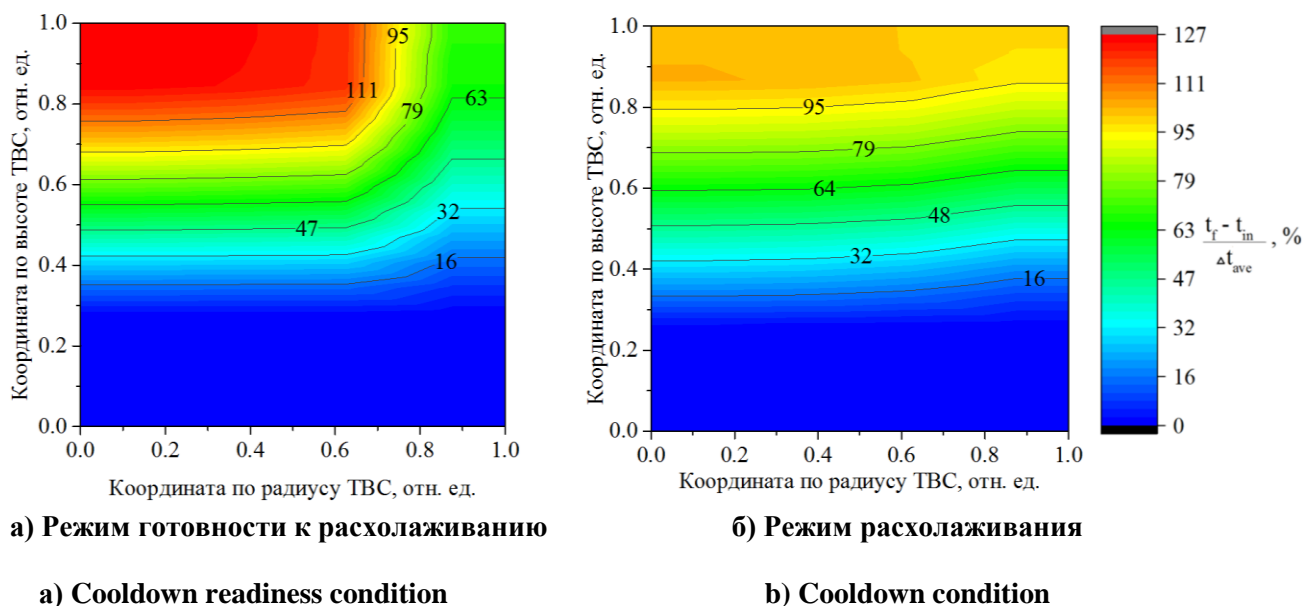
Fig. 3. Fuel assembly design diagram

### Расчеты режимов готовности к расхолаживанию и режима расхолаживания

Для выполнения расчетов в качестве граничных условий со стороны второго контура в ПТО задавались температура и расход натриевого теплоносителя второго контура. В АТО задавались температура и расход теплоносителя в промежуточном контуре САРХ. Для режима готовности к расхолаживанию задавались номинальные параметры, для режима расхолаживания мощность остаточных тепловыделений в а.з. принималась постоянной и составляла 1,6 % от номинального значения.

В результате расчетов были определены расходы и температуры натриевого теплоносителя, а также температуры основных элементов реактора. Для обоих режимов в центральных ТВС а.з. и их МПП реализуется подъемный участок трассы охлаждения, а через ПТО реализуется опускной участок, аналогично направлению течения при отводе тепла в режиме НЭ. В АТО реализуется опускное движение натриевого теплоносителя. Это объясняется захлаживанием натрия первого контура теплоносителем промежуточного контура САРХ. Принципиальным отличием данных режимов является характер течения натрия на выходе из АТО. В режиме готовности к расхолаживанию выходящий из АТО натрий смешивается с основным потоком теплоносителя и далее вдоль центральной поворотной колонны движется на вход ПТО и АТО. В режиме расхолаживания часть выходящего из АТО натрия сливается во внутреннее пространство сборок бокового экрана и их МПП, откуда поступает в МПП центральных ТВС а.з. Другая часть выходящего из АТО натрия движется аналогично режиму готовности к расхолаживанию.

Теплоотвод от твэл а.з. для обоих режимов осуществляется за счет теплопередачи к натрию внутри ТВС и к натрию между ТВС (к их МПП). При этом установлено, что для режима расхолаживания теплоотвод осуществляется в соотношении примерно 1:1, в то время как для режима готовности к расхолаживанию теплоотвод через чехол ТВС составляет менее 1 % мощности тепловыделений в твэл. Данный результат свидетельствует о значительном вкладе циркуляции натрия в МПП ТВС в теплоотвод от твэл в режиме расхолаживания. Распределение температуры натриевого теплоносителя в межтвэльном пространстве максимально напряженной ТВС для режима готовности к расхолаживанию (а) и режима расхолаживания (б) представлено на рис. 4. Для режима готовности к расхолаживанию наблюдается значительная неравномерность температуры натрия по сечению ТВС, в то время как для режима расхолаживания данное явление практически полностью отсутствует. Высокий уровень температур натриевого теплоносителя в периферийной части межтвэльного пространства ТВС для режима расхолаживания в существенной мере определяет значительный теплоотвод от твэл в МПП ТВС.



**Рис. 4. Температура теплоносителя в межтвэльном пространстве максимально напряженной ТВС (СОКРАТ-БН)**

**Fig. 4. Coolant temperature in the fuel assembly interwrapper space of a maximally stressed FA (SOKRAT-BN)**

### Заключение

Для исследования процессов расхолаживания перспективного реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем с использованием аттестованного кода СОКРАТ-БН разработана расчетная модель реактора с системой расхолаживания через МПП ТВС. С ее помощью выполнены расчеты режима готовности к расхолаживанию и режима расхолаживания. При проведении расчетов использовался двумерный теплогидравлический модуль кода СОКРАТ-БН, позволяющий учитывать неравномерность температуры натрия по сечению ТВС, что дает возможность корректно определить сток тепла через чехол ТВС и температурное состояние твэл. При анализе результатов расчетов было установлено, что в режиме расхолаживания циркуляция натрия в МПП ТВС вносит значительный вклад ( $\sim 50\%$ ) в теплоотвод от твэл активной зоны реактора.

Высокая теплоотводящая способность МПП ТВС в режимах расхолаживания позволяет рассматривать варианты конструкции САРХ с данным типом расхолаживания в качестве альтернативных применительно к разрабатываемому перспективному реактору БН.

После верификации разработанной расчетной модели с использованием экспериментальных данных реакторов с системой аварийного отвода тепла через МПП ТВС и кросс-верификации с *CFD* кодами планируется выполнение расчетов переходных и аварийных режимов перспективного реактора БН.

### Библиографический список

1. **Rtishchev, N.A.** Validation of SOCRAT-BN Code on the Base of Reactor Experiments / N.A. Rtishchev, R.V. Chaluy, V.N. Semenov, A.M. Fokin, A.E. Tarasov, S.F. Shepelev, S.L. Osipov, V.S. Gorbunov, A.M. Anfimov // Proceedings of the «10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS 10)», Okinawa, Japan, 14-18 Dec. 2014.
2. Аттестационный паспорт программного средства «Интегральный код для анализа режимов РУ БН. Версия 1.0» (СОКРАТ-БН/В1). Рег.№ 412 от 08.12.2016 г.

3. Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин «Интегральный код для анализа запроектных аварий на АЭС с РУ БН. Версия 2.0 (СОКРАТ-БН/В2)». Рег.№ 472 от 20.11.2019 г.
4. **Усов, Э.В.** Двумерный теплогидравлический модуль интегрального кода СОКРАТ-БН: математическая модель и результаты расчетов / Э.В. Усов, М.Е. Кузнецова, Н.А. Прибатурин, Р.В. Чалый, Н.И. Рыжов, А.Е. Киселев // Атомная энергия Т. 120 № 2. С. 95-100.
5. **Климонов, И.А.** Верификация теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 на основе экспериментов на БН-600 / И.А. Климонов, Э.В. Усов, Г.А. Дугаров, А.А. Бутов, И.Г. Кудашов, Е.Н. Иванов, Н.А. Мосунова, В.Ф. Стрижов, А.М. Анфимов, В.С. Горбунов, Д.В. Кузнецов, С.Л. Осипов, А.И. Бельтюков // Атомная энергия. Т. 122. № 5. С. 258-262.
6. **Анфимов, А.М.** Результаты анализа теплоотводной аварии РУ БН-800 с учетом данных, полученных на этапе ввода в эксплуатацию / А.М. Анфимов, И.Н. Кирилов, Д.В. Кузнецов // Сборник докладов «20-й Международной конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам» г. Подольск, 2018. – С. 118-126.

*Дата поступления  
в редакцию: 20.05.2021*



УДК 621.039

DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_57

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ  
ПРИСТЕННОЙ ОБЛАСТИ В КОЛЬЦЕВОМ ЗАЗОРЕ  
В СИСТЕМЕ «ВРАЩАЮЩИЙСЯ ВАЛ – ТЖМТ – СТЕНКА КРОНШТЕЙНА»**

**Т.А. Бокова**

ORCID: 0000-0002-7666-2866 e-mail: [tatabo@bk.ru](mailto:tatabo@bk.ru)

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

**П.А. Боков**

ORCID: 0000-0002-7805-6843 e-mail: [bokow\\_pavel@mail.ru](mailto:bokow_pavel@mail.ru)

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

**Н.С. Волков**

ORCID: 0000-0003-2256-0984 e-mail: [hortmetall@yandex.ru](mailto:hortmetall@yandex.ru)

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

**А.Р. Маров**

ORCID: 0000-0003-4398-5631 e-mail: [marov\\_2011@mail.ru](mailto:marov_2011@mail.ru)

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

**Л.В. Баранова**

ORCID: 0000-0002-9839-6036 e-mail: [lubanya12@list.ru](mailto:lubanya12@list.ru)

Государственный региональный центр стандартизации,  
метрологии и испытаний в Нижегородской области  
*Нижний Новгород, Россия*

Определены физико-химические и трибологические характеристики пристенного слоя тяжелого жидкометаллического теплоносителя (ТЖМТ). Представлены результаты экспериментальных трибологических исследований поверхностей трения системы «Вал – ТЖМТ – стенка кронштейна», проводимых на циркуляционном стенде со свинцовым теплоносителем. Исследования проводились применительно к условиям работы главных циркуляционных насосов установок малой и средней мощности с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых свинцовым теплоносителем с горизонтальными парогенераторами (БРС ГПГ). Работы выполнялись на стенде ЭТС-2018 при температуре свинцового теплоносителя 440-500 °С.

Спроектирован и построен экспериментальный стенд для установления структуры пристенной области ТЖМТ с использованием методики экспресс-замораживания для объективной фиксации состояния в кольцевом зазоре ТЖМТ. Установлено, что пристенная область при вращательном движении представляет собой многокомпонентную структуру, в состав которой входят: оксидное покрытие на поверхностях сталей, сцепленных с оксидным покрытием отложения частиц примесей твердой фазы, газовая (парогазовая) прослойка, слой частиц примесей в пограничном турбулентном слое, пропитанных теплоносителем и свободно с ним перемещающихся. Пристенный слой в контурах с ТЖМТ представляет собой систему, где дисперсной средой является теплоноситель, содержащий дисперсную твердую фазу частиц примесей и газовую (парогазовую) фазу, которые ограничены поверхностью раздела. При вращательном движении дисперсная система не имеет четких границ, представляя собой перемешанную дисперсную среду.

**Ключевые слова:** свинцовый теплоноситель, трибология, пристенный слой, экспресс-замораживание, примеси, оксиды свинца, микротвердость, экспериментальный стенд, вращение, кольцевой зазор.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Бокова, Т.А. Экспериментальное исследование состояния пристенной области в кольцевом зазоре в системе «Вращающийся вал – ТЖМТ – стенка кронштейна» / Т.А. Бокова, П.А. Боков, Н.С. Волков, А.Р. Маров, Л.В. Баранова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №3. С. 57-67.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_57

## **EXPERIMENTAL STUDY OF THE WALL AREA STATE IN ANNULAR GAP IN «ROTATING SHAFT – HLMC – BRACKET WALL» SYSTEM**

**T.A. Bokova**

ORCID: **0000-0002-7666-2866** e-mail: **tatabo@bk.ru**

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

**P.A. Bokov**

ORCID: **0000-0002-7805-6843** e-mail: **bokow\_pavel@mail.ru**

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

**N.S. Volkov**

ORCID: **0000-0003-2256-0984** e-mail: **hortmetall@yandex.ru**

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

**A.R. Marov**

ORCID: **0000-0003-4398-5631** e-mail: **marov\_2011@mail.ru**

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

**L.V. Baranova**

ORCID: **0000-0002-9839-6036** e-mail: **lubanya12@list.ru**

Nizhny Novgorod state regional standardization, metrology and investigations center  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Physical-chemical and tribological characteristics of the wall layer of a heavy liquid metal coolant (HLMC) are determined. Results of experimental tribological studies of friction surfaces of the «Shaft – HLMC – bracket wall» system carried out on a circulation stand with a lead coolant, are presented. The studies were carried out in relation to the operating conditions of the main circulation pumps of low- and medium-power installations with fast neutron reactors cooled by a lead coolant with horizontal steam generators (LFNR-HSG). The work was carried out at ETS-2018 at a temperature of lead coolant 440-500 °C.

A testbed was designed and built to establish the structure of wall area of HLMC using the express freezing technique for objective fixation of the state in the annular gap of HLMC. It is established that the wall area under rotational motion is a multicomponent structure which includes an oxide coating on surfaces of steels bonded to the oxide coating deposits of solid phase impurity particles, a gas (vapor-gas) interlayer, a layer of impurity particles in the boundary turbulent layer impregnated with a coolant and freely moving with it. The wall layer in contours with HLMC is a dispersed system in which the dispersed medium is a coolant containing a dispersed solid phase of impurity particles and a gas (vapor-gas) phase bound by interface. In case of rotational motion, the dispersed system has no clear boundaries representing a mixed dispersed medium.

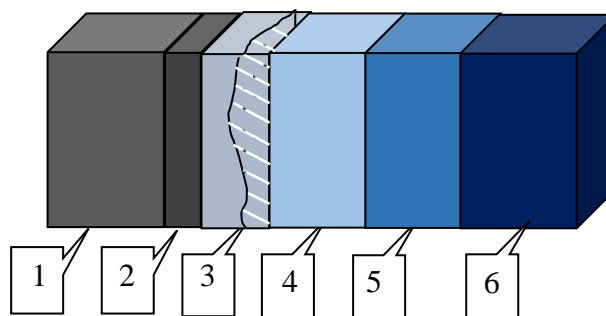
**Key words:** lead coolant, tribology, wall layer; express freezing, impurities, lead oxides; micro-hardness, experimental stand, rotation, annular gap.

**FOR CITATION:** Bokova T.A., Bokov P.A., Volkov N.S., Marov A.R., Baranova L.V. Experimental study of the wall area state in annular gap in «Rotating shaft – HLMC – Bracket wall» system. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. №3. Pp. 57-67. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_57

## Введение

В настоящее время Госкорпорация «Росатом» реализует проект «Прорыв», направленный на разработку, проектирование и реализацию замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) и включающий продвижение реакторов на быстрых нейтронах. Одним из ключевых направлений проекта является разработка реакторных установок (РУ) на быстрых нейтронах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями. Тяжелые жидкометаллические теплоносители (ТЖМТ), в частности – свинец и эвтектика «свинец-висмут», являются перспективными как для реакторов на быстрых нейтронах большой мощности, так и для энергетических установок малой и средней мощности, являющихся источниками независимого энергообеспечения. В России накоплен значительный опыт по исследованиям физико-химических свойств свинца и его эффективного безопасного применения в атомной энергетике [1]. Одним из важных аспектов является контактное взаимодействие расплава свинца в качестве теплоносителя с поверхностями конструкционных материалов в пристенном слое. Эффект взаимодействия расплавленного металла с поверхностью применяемых сталей, вызванный условиями образования и массопереноса частиц примесей твердой и легкой фазы, в случае длительного обслуживания контуров с ТЖМТ может спровоцировать ухудшение коррозионно-эрозионных, теплогидравлических, триботехнических и других эксплуатационных характеристик циркуляционных стендовых и реакторных контуров [2]. В связи с этим, работы, направленные на исследования физико-химических и триботехнических характеристик взаимодействия слоев в потоке ТЖМТ, являются актуальными.

Одним из основных элементов любой ЯЭУ является главный циркуляционный насос и сопутствующее оборудование. В результате проведенных ранее исследований определено, что трибологические характеристики зон контактного взаимодействия свинца в циркуляционных контурах существенно влияют на работоспособность контактной пары (например, элементы проточной части насоса или гидростатические подшипники, работающие в среде ТЖМТ) [3]. В настоящее время в литературе отсутствуют данные о влиянии пристенного слоя на конструкционные материалы в системе «вал – жидкометаллический теплоноситель».



**Рис. 1. Модель пристенной области взаимодействия поверхности конструкционного материала (стали) и расплава свинца**

- 1 – конструкционный материал; 2 – оксидное защитное покрытие;  
 3 – отложения компонентов примесей, пропитанных свинцом и слабо сцепленных со стенкой; 4 – прослойка «легкой фазы»;  
 5 – поток свинца, обогащенный дисперсными примесями; 6 – ядро поток свинца

**Fig. 1. Model of wall area of interaction of structural material (steel) surface and lead melt**

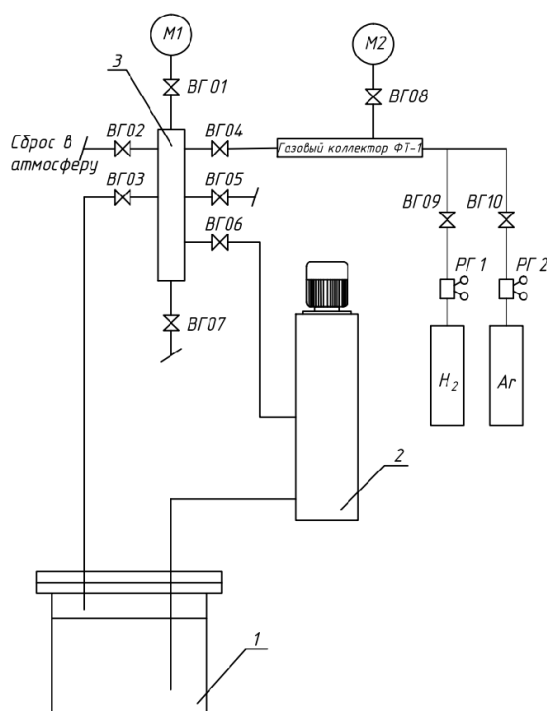
- 1 – structural material; 2 – oxide protective coating;  
 3 – deposits of impurity components impregnated with lead and weakly bonded to the wall;  
 4 – «light phase» interlayer; 5 – lead flow enriched with dispersed impurities; 6 – lead flow core

Трибологические характеристики свинцового и свинцово-висмутового теплоносителя изучаются в НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Получены и опубликованы результаты экспериментальных исследований характеристик пристенного слоя, выполняемых в приближенных к натурным условиям работы реакторной установки: материаловедческие испытания пристенной области расплава свинца с контактирующей с ним поверхностью сталей (рис. 1) [1], экспериментальные испытания процессов, возникающих в пристенной области при продольном возвратно-поступательном перемещении объектов в расплаве свинца [4], эксперименты, направленные на измерение потерь мощности при трении жидкого металла (свинца) о вращающийся вал насоса, а также параметров поверхности раздела фаз «свинец – газ» при вращении вала [5], трибологические параметры поверхности раздела фаз в среде теплоносителей и газовой подушки в ядерных реакторах на быстрых нейтронах АЭС [5-8].

Описанные в представленных работах результаты экспериментальных исследований не позволяют охарактеризовать процессы, происходящие в системе вращающегося с большой скоростью вала. Данная статья продолжает работы по исследованию состояния пристенной области в кольцевом зазоре в системе ВСК («вращающийся вал – расплав свинца – стенка кронштейна») экспериментального участка статического стенда со свинцовым теплоносителем при температуре до 500 °С.

### Описание экспериментального стенда и методика исследований

Экспериментальные испытания проходили в лаборатории «Реакторная гидродинамика» на кафедре «Атомные и тепловые станции» Института ядерной энергетики и технической физики НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Для проведения работ был изготовлен экспериментальный стенд ЭТС-2018, схема которого представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Принципиальная схема стенда ЭТС-2018**

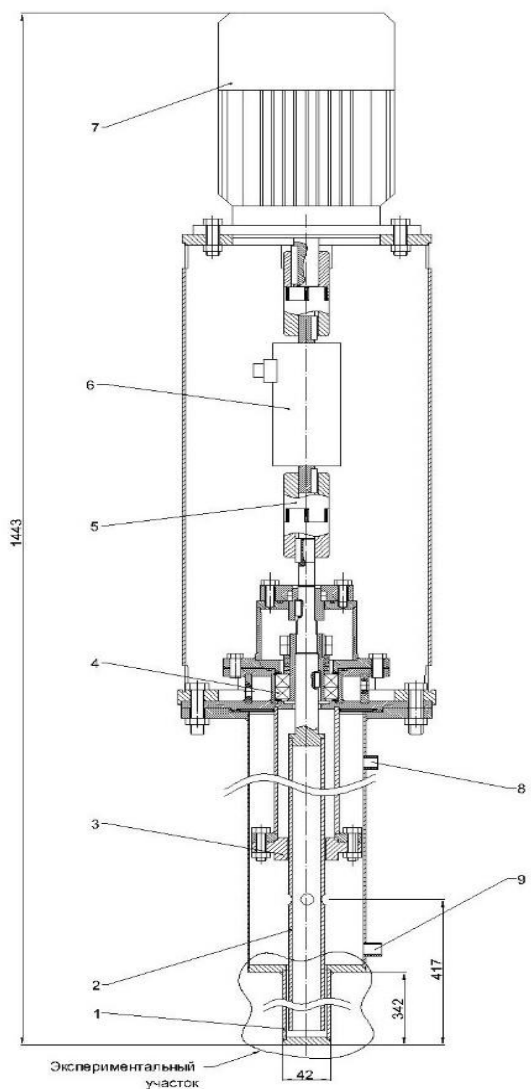
1 – бак плавильный; 2 – экспериментальный участок; 3 – коллекторы газовой системы

**Fig. 2. Schematic diagram of ETS-2018 testbed**

1 – melting tank; 2 – experimental section; 3 – gas system collectors

Стенд включает в себя следующие основные элементы:

- испытательная установка с размещенными в ней моделью вала насоса и цилиндром, имитирующим кронштейн ГЦН;
- система обогрева корпуса экспериментального участка с секциями из нихромовых электроспиралей;
- емкость для плавления свинца;
- элементы систем технологии теплоносителя, заполнения и слива теплоносителя;
- подсистема технологии и качества свинцового теплоносителя;
- КИП, входящие в систему, обеспечивающую контроль, сбор и переработку получаемой информации.



**Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки:**

*1 – гильза; 2 – вал; 3 – нижний подшипник; 4 – верхний подшипник;  
5 – муфта; 7 – электродвигатель; 8 – подвод газа; 9 – подвод свинца*

**Fig. 3. General view of experimental setup:**

*1 – sleeve; 2 – shaft; 3 – lower bearing; 4 – upper bearing;  
5 – coupling; 7 – electric motor; 8 – gas inlet; 9 – lead inlet*

Основные емкости, трубопроводы и экспериментальный участок изготовлены из стали марки 12Х18Н10Т. Обогрев стенда осуществляется с помощью электрических секций мощностью 2 кВт. Экспериментальная сборка, имитирующая вращение вала циркуляционного насоса, позволяет исследовать характеристики пристенного слоя при вращательном движении в кольцевом зазоре между валом и цилиндром-имитатором, а также определить характеристики поверхности примененного конструкционного материала. На рис. 3 изображен общий вид экспериментальной установки. Для получения данных о пристенном слое после 50 и 100 час вращения вала в среде свинца со скоростью 700 об/мин (две серии экспериментов, проводимых последовательно), осуществляется отключение питания электродвигателя; демонтируется быстросъемный чехол для обогрева цилиндра-имитатора; экспериментальный участок мгновенно опускается в емкость с охлажденной водой (с добавлением льда). Затем отделяется нижняя часть вала длиной около 10 см совместно с цилиндром-имитатором. После этого производится трибологический анализ полученного участка на лабораторном оборудовании кафедры.

### Результаты экспериментальных исследований

Как правило, в контурах с жидкометаллическим теплоносителем традиционно проводились материаловедческие исследования микротвердости участков конструкционного материала и его покрытий после удаления теплоносителя из анализируемых элементов или после остывания участка с жидким металлом за счет естественной конвекции (в атмосфере кислорода за длительный отрезок времени) [1]. Это не могло отразить полного и детального понимания структуры пристенной области «свинец – сталь». Приведенные далее результаты исследования экспериментального участка производились после мгновенной заморозки методом «экспресс-замораживания» в емкости с охлажденной водой с добавлением льда за кратковременный период.



Рис. 4. Кольцевой зазор «свинец-втулка» при 200-кратном увеличении ( $T=450^{\circ}\text{C}$ ,  $t=50$  ч,  $a=10^{-1}\text{-}10^0$ ,  $\gamma=700$  об/мин)

Fig. 4. «Lead-bushing» annular gap at 200x magnification ( $T = 450^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 50$  h,  $a=10^{-1}\text{-}100$ ,  $\gamma = 700$  rpm)

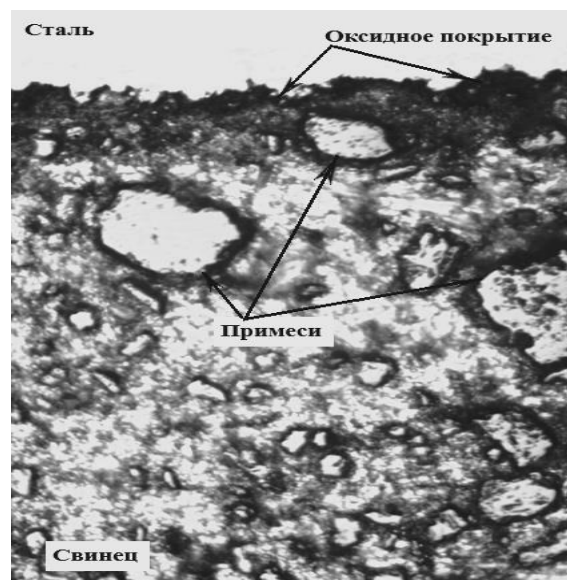


Рис. 5. Кольцевой зазор «свинец-втулка» при 400-кратном увеличении ( $T=450^{\circ}\text{C}$ ,  $t=100$  ч,  $a=10^{-1}\text{-}10^0$ ,  $\gamma=700$  об/мин)

Fig. 5. «Lead-bushing» annular gap at 400x magnification ( $T = 450^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 100$  h,  $a=10^{-1}\text{-}100$ ,  $\gamma = 700$  rpm)

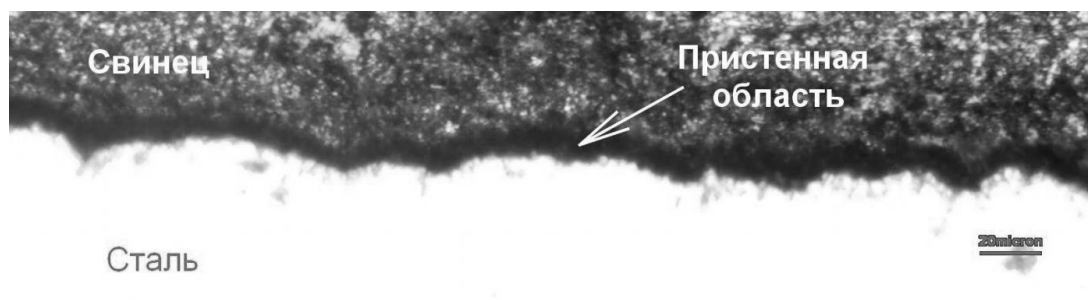


Рис. 6. Торцевая поверхность трубки экспериментального участка (увеличение 200 раз)

Fig. 6. End surface of tube of experimental section (200x magnification)

На рис. 4, 5 приведены фотографии поперечного шлифа образцов при 200- и 400-кратном увеличении после экспресс-замораживания циркулирующего ТЖМТ после первой ( $t = 50$  час) и второй ( $t = 100$  час) серии экспериментов соответственно при температуре свинцового теплоносителя  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  термодинамической активности кислорода в расплаве  $\text{Pb} - 10^{-1}-10^0$  и скорости вращения вала-имитатора  $700$  об/мин. На рис. 6 представлена фотография шлифа торцевой поверхности трубки экспериментального участка. В процессе экспериментальных исследований, проведенных коллективом авторов ранее, было отмечено, что на фотографиях шлифов можно заметить примеси, оседающие на поверхности конструкционного материала. В процессе описываемых испытаний на аналогичных шлифах можно отметить, что примеси (в том числе, газообразные) находятся в состоянии однородной перемешанной среды с теплоносителем, сконцентрированные ближе к поверхности конструкционного материала (стали). При этом размеры частиц примесей не имели заметной роли при перераспределении в перемешанной с теплоносителем среде, их месторасположение хаотичное.

Как было установлено ранее в процессе многочисленных исследований, толщина оксидных пленок на поверхности стали у образцов на первом этапе проведенных экспериментов ( $t = 50$  ч,  $a = 10^{-1}-10^0$ ) значительно тоньше, чем у образцов второго этапа ( $t = 100$  час,  $a = 10^{-1}-10^0$ ). Толщина оксидной пленки на поверхности влияла на процесс отделения застывшего свинца из стальных труб для создания образцов для материаловедческого анализа. Ранее были получены результаты экспериментальных исследований полей температур и скоростей в потоках свинцового и свинец-висмутового теплоносителей при контроле и регулировании содержания примесей, которые подтверждают предположение о том, что размер и перераспределение примесей в потоке свинцового теплоносителя напрямую зависит от характеристик и состояния циркуляционного контура со свинцовым теплоносителем. В процессе описываемых испытаний после проведения материаловедческих исследований были получены величины отложений примесей после второго этапа ( $t = 100$  час,  $a = 10^{-1}-10^0$ ) на отдельных участках около нескольких десятков мм.

После проведения материаловедческих испытаний и внешнего осмотра образцов, полученных на первом этапе испытаний, можно заметить области смачивания поверхности конструкционного материала (аустенитная сталь 08X18H10T) свинцом и начало развития коррозионно-эрозионного изнашивания в условиях проводимых исследований. Процесс изнашивания проявляется как растворение поверхностных слоев стали, а в дальнейшем – необратимая деформация кристаллической решетки с выносом атомов в пристенный слой жидкого металла (время работы –  $50$  час). Вариант, при котором поверхность стали и расплав свинца не контактируют в связи с наличием агента – газовой или парогазовой прослойки, состоящей из растворенных газообразных веществ и малого количества воды, исключает разрушение поверхности конструкционного материала. При этом происходит эффект несмачивания, что гарантирует стойкость конструкционных материалов в среде расплава свинца [1]. В ходе экспериментальных исследований были проведены измерения микротвердости. Они проводились по регламенту ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 «Металлы и сплавы.

Измерение твердости по Виккерсу. Часть 1. Метод измерения». Этот метод заключался в определении зависимости размера отпечатка стандартной пирамидки на исследуемом образце от величины усилия нажатия этой пирамидки на образец. Использовалось оборудование лаборатории «Реакторная гидродинамика» Shimadzu HMV-2T. Результаты измерений сведены в табл. 1. На рис. 7 представлены сравнительные результаты двух образцов, полученных в процессе исследования при вращении в кольцевом зазоре, и образцов, полученных при возвратно-поступательном движении.

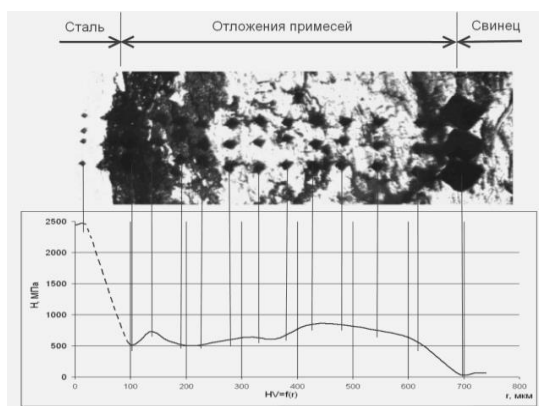
Таблица 1.

**Микротвердости пристенной области по Виккерсу**  
(условия получения образцов:  $t = 50$  час,  $T = 450$  °C,  $\gamma = 700$  об/мин)

Table 1.

**Vickers microhardness of wall area (conditions for sampling:  $t = 50$  h,  $T = 450$  °C,  $\gamma = 700$  rpm)**

HV1	HV2	HV3	HV4	HV5	HV6
213	201	205	207	198	208
220	228	239	220	232	227
6,64	9,1	11	8,31	11,1	9,48
6,9	8,12	8,19	8,3	8,3	8,32
6,56	9,23	8,76	8,3	8,21	8,3
6,27	8,04	7,16	8,3	8,15	8,15
7,56	8,12	7,58	8,5	8,29	7,55
8,07	7,54	10,4	9,47	8,32	8,3
8,11	9,04	9,55	10	10,3	8,89
224	204	198	218	234	259
220	198	197	213	242	218



а)



б)

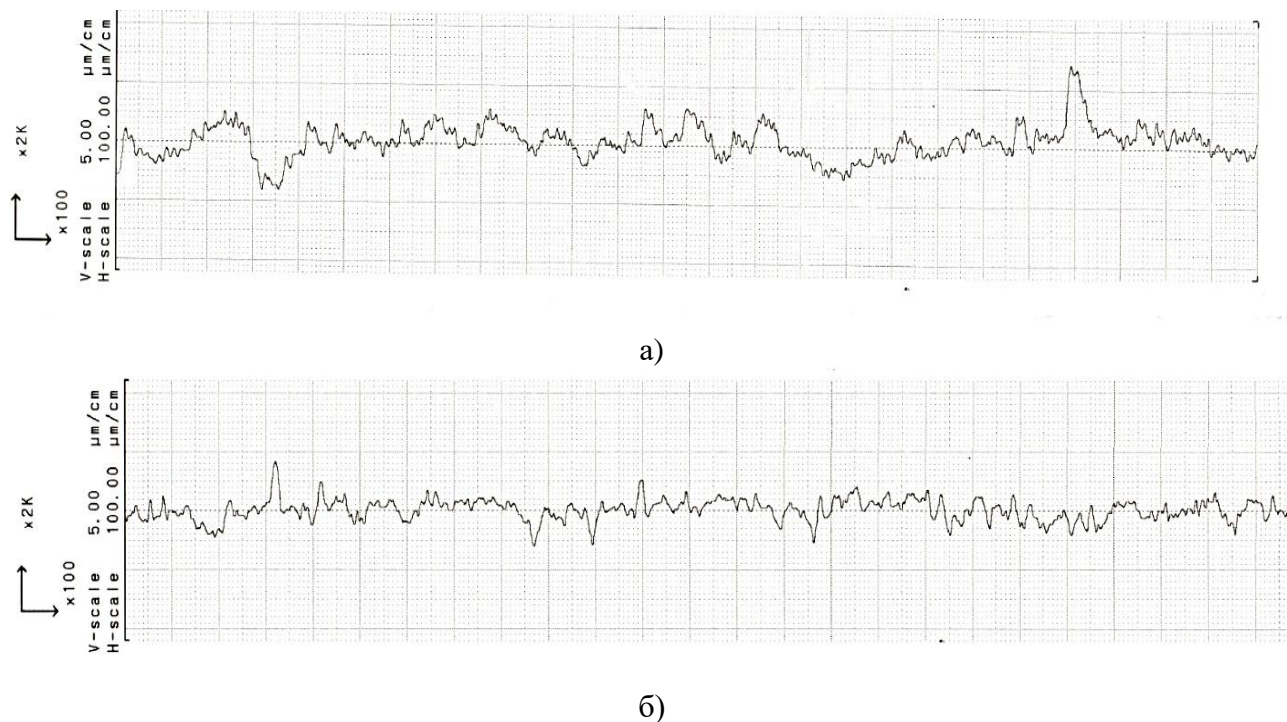
**Рис. 7. Микротвердость пристенной области**  
а) при циркуляции в трубопроводе; б) при вращении в кольцевом зазоре

**Fig. 7. Microhardness of wall area**  
а) when circulating in pipeline; б) when rotating in annular gap

Исследования профиля поверхности полученных образцов проводились в лабораториях «Реакторная гидродинамика» НГТУ на приборе TR220, а также в лаборатории ФБУ «Нижегородский ЦСМ» с помощью профилометра «Surftest SJ-410 MITUTOYO». По результатам были построены графические зависимости профилей поверхности и шероховатостей, примеры которых представлены на рис. 8. На рис. 8а представлены шероховатость и профиль поверхности образца 3.1, который выдерживался в контуре циркуляции свинцового теплоноси-



теля при температуре 450 °С в течение 50 час при значении активности кислорода, близкой к насыщению, образец отделен с внешней поверхности имитатора вала. На рис. 8б представлены шероховатость и профиль поверхности образца 4.1, который выдерживался в контуре циркуляции свинцового теплоносителя при тех же условиях проведения эксперимента, что и образец 3.1, но в течение 100 час отделенный от внутренней части гильзы, являющейся элементом экспериментальной емкости.



**Рис. 8. Результаты исследований профилей поверхности и шероховатостей образцов**  
*а) образец № 3.1; б) образец № 4.1*

**Fig. 8. Surface profiles and sample roughness research results**  
*a) sample No. 3.1; б) sample No. 4.1*

Можно заметить, что при работе контактной пары «поверхность конструкционного материала – пристенный слой потока ТЖМТ» наблюдается незначительный рост величины шероховатостей поверхностей сталей в сравнении с образцом той же марки стали, но не устанавливаемым в контур циркуляции, а выдержанным в течение того же периода времени при тех же температурах, что и образец, установленный в контур ТЖМТ и с исходным образцом, не участвовавшим в проведении экспериментов и взятым за «нулевой». Результаты экспериментальных исследований зависимости значений шероховатости от временного фактора показали, что при одинаковых условиях проведения исследований образцы, находившиеся в расплаве свинца разное время, имеют отличающиеся значения шероховатости. При увеличении времени выдержки в 2 раза с 50 до 100 час наблюдалась тенденция к уменьшению величин параметров Ra и Rz ответных поверхностей экспериментального участка. Этот факт можно объяснить тем, что при вращательном движении, организованном для элементов экспериментального участка в узком зазоре, происходит постоянное перемешивание слоев пристенной области в расплаве свинца. Также возможно, что на пристенный слой и на частицы примесей влияют центробежные и центростремительные силы. Это может приводить к снижению скорости подвода «свободного» кислорода к поверхностям сталей, а также перераспределению примесей в пристенной области, что, в свою очередь, может приводить к замедлению образования оксидной защитной пленки на поверхностях сталей. Доказано, что

разрушение и невозможность восстановления оксидной защитной пленки на поверхностях конструкционных материалов приводит к эффектам смачивания ТЖМТ поверхностей сталей и быстрому коррозионно-эрозионному их разрушению.

По результатам исследований шлифов под микроскопом было замечено наличие примесных частиц между трущимися поверхностями имитатора вала, расплава свинца и поверхностью гильзы (рис. 3) на всех этапах проведения исследования.

При проведении исследований шлифов образцов, взятых на этапе исследований методом «экспресс-замораживания», была подтверждена и построена модель пристенной области, которая состоит из пяти заметных слоев: слой 1 – стальной, слой 2 – защитное оксидное покрытие, слой 3 – крупинчатый, состоящий из разрозненных отложений, пропитанных расплавом свинца вследствие эффекта несмачиваемости, слой 4 – вихревой слой свинца, содержащий значительное количество примесей, слой 5 – основной поток свинца в котором заметны отдельные частицы примесей. Также в редких случаях можно было заметить каверны в единичных образцах, свидетельствующие о наличии газовой или парогазовой фазы и в пристенной области и в потоке расплава свинца.

### Заключение

Проведенные исследования подтверждают предложенную модель пристенной области при вращательном движении в узком кольцевом зазоре в среде расплава свинца. Ранее предполагалось, что пристенный слой состоит условно из шести слоев различной толщины: первый слой – конструкционный материал; второй слой – оксидное защитное покрытие; третий слой – отложения компонентов примесей, пропитанных свинцом и слабо сцепленных со стенкой; четвертый слой – прослойка «легкой фазы»; пятый слой – поток свинца, обогащенный дисперсными примесями; шестой слой – ядро потока свинца. Исследования образцов, полученных в результате проведенных экспериментов, подтвердили наличие подобных слоев в слое свинцового теплоносителя при вращении вала-имитатора в узкой щели. Четких границ вышеуказанных слоев в принятых условиях замечено не было, в сравнении с экспериментальными данными при возвратно-поступательном движении стального образца в узком зазоре со свинцовым теплоносителем в корпусе из стали. Было обнаружено образование почти однородной субстанции с отсутствием резких переходных зон между слоями.

При вращательном движении структура пристенной области меняется, что ведет к изменению шероховатости поверхности образцов сталей, контактирующих со свинцовым теплоносителем в узком щелевом зазоре. С ростом времени выдержки образцов в контуре с ТЖМТ в условиях эксперимента их шероховатость уменьшается. Это можно объяснить тем, что только со временем происходит образование защитной оксидной пленки, которая в условиях эксперимента образует более ровное покрытие по сравнению с поверхностью исходного (не использованного в эксперименте) металла, оксидное покрытие которого было образовано при производстве и дальнейшем хранении на воздухе. Этот эффект может повлиять на работу трущихся поверхностей, погруженных в расплав свинца (свинца-висмута) реакторных установок с ТЖМТ. Работоспособность узлов (гидростатические подшипники или трущиеся пары системы управления защиты, зубчатые зацепления и т.д.) в среде ТЖМТ зависит от наличия на поверхностях контактных пар защитных оксидных покрытий, с возможностью их восстановления в процессе работы.

Результаты представленных исследований могут быть интересны разработчикам и проектантам энергетических контуров с жидкометаллическим охлаждением.

**Библиографический список**

1. **Безносков, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАт. 2006. – 370 с.
2. **Безносков, А.В.** Экспериментальное исследование контактных пар трения в механизмах, работающих в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.И. Шумилков // Трибология – машиностроению: труды XI Международной научно-технической конференции. М.: Институт компьютерных исследований, 2016. С. 11-12.
3. **Безносков, А.В.** Экспериментальное исследование контактных пар трения в механизмах, работающих в ТЖМТ / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.И. Шумилков, Д.С. Забоева // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы 2016. № 4. С. 53-63.
4. **Баранова, Л.В.** Исследование структуры пристенного слоя при движении свинцового теплоносителя в кольцевом зазоре / Л.В. Баранова, А.Н. Белов, В.А. Гадетов, Р.А. Коротаев // XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки): материалы докладов. Нижний Новгород: Нижегородский государственный инженерно-экономический институт, 2018. С. 117-121.
5. **Безносков А.В.** Экспериментальные исследования по определению потерь мощности при трении расплава свинца о вал насоса, и геометрии его свободной поверхности при вращательном движении / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, Н.С. Лукичев, В.А. Гадетов, А.Г. Мелузов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. №1(120). С. 81-90.
6. **Безносков, А.В.** Исследование структуры пристенного слоя при движении свинцового теплоносителя в кольцевом зазоре / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, П.А. Боков, Н.В. Серов // Ядерные технологии: от исследований к внедрению – 2019: Сборник материалов научно-практической конференции. 2019. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2019. С. 78.
7. **Безносков, А.В.** Обоснование работоспособности гидростатического подшипника, в условиях реакторных контуров со свинцово-висмутовым теплоносителем при температурах 200-350°C / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.Р. Маров, Н.С. Лукичев // Будущее технической науки: сборник материалов XVIII Всероссийской молодежной научно-технической конференции. 2019. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2019. С. 297-298.
8. **Баранова, Л.В.** Определение пристенного слоя ТЖМТ в системе «вал-ТЖМТ-стенка» / Л.В. Баранова, П.А. Боков, В.А. Гадетов // Ядерные технологии: от исследований к внедрению – 2018: сборник материалов научно-практической конференции. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. С. 5.

*Дата поступления  
в редакцию: 15.12.2020*

## МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629. 336

DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_68

### РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СЛЕПЫХ ЗОН ДЛЯ КОММЕРЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**П.О. Береснев**ORCID: 0000-0002-7307-8381 e-mail: [pavel.beresnev@nntu.ru](mailto:pavel.beresnev@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***Д.Н. Зарубин**ORCID: 0000-0002-0092-3011 e-mail: [dmitry.zarubin@nntu.ru](mailto:dmitry.zarubin@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***Д.Ю. Тюгин**ORCID: 0000-0001-5598-3567 e-mail: [dmitry.tyugin@nntu.ru](mailto:dmitry.tyugin@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***В.П. Мишустов**ORCID: 0000-0003-0943-0800 e-mail: [v.mishustov@nntu.ru](mailto:v.mishustov@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***В.И. Филатов**ORCID: 0000-0001-9815-7169 e-mail: [valera.filatov@nntu.ru](mailto:valera.filatov@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***Д.М. Порубов**ORCID: 0000-0002-4873-6557 e-mail: [dmitry.porubov@nntu.ru](mailto:dmitry.porubov@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Представлен анализ рынка систем контроля слепых зон, помогающих водителям частично или полностью избежать столкновений при перестроении в соседнюю полосу движения. Проведен бенчмаркинг данных систем от различных производителей, выявлены их общие принципы и концептуальные ориентиры.

Разработана новая система контроля слепых зон, которая может быть установлена на транспортные средства сегмента легкого коммерческого транспорта, предложен алгоритм ее функционирования. Реализованы программная и аппаратная части системы, в основу которой легли микроволновые радары компании *Continental* и бортовой вычислительной базы компьютера *Nvidia Xavier*.

Проведены виртуальные испытания в компьютерном симуляторе *CARLA*, имитирующие реальные дорожные сценарии движения по многополосной дороге с обгоняющими и обгоняемыми вспомогательными транспортными средствами. Регистрировались срабатывание или несрабатывание предупреждений от системы, продольное и поперечное расстояние до вспомогательных транспортных средств, а также направление их дви-

жения, абсолютные и относительные скорости. Тесты в компьютерном симуляторе *CARLA* дали положительные результаты и работоспособность представленной системы.

**Ключевые слова:** система помощи водителю, контроль слепых зон, легкие коммерческие автомобили, слепая зона.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Береснев, П.О. Разработка системы контроля слепых зон для коммерческих транспортных средств / П.О. Береснев, Д.Н. Зарубин, Д.Ю. Тюгин, В.П. Мишустов, В.И. Филатов, Д.М. Порубов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №3. С. 68-80. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_68

## DEVELOPING A SYSTEM FOR CONTROLLING BLIND SPOTS FOR COMMERCIAL TRANSPORT VEHICLES

**P.O. Beresnev**

ORCID: **0000-0002-7307-8381** e-mail: **pavel.beresnev@nntu.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**D.N. Zarubin**

ORCID: **0000-0002-0092-3011** e-mail: **dmitry.zarubin@nntu.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**D.Yu. Tyugin**

ORCID: **0000-0001-5598-3567** e-mail: **dmitry.tyugin@nntu.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**V.P. Mishustov**

ORCID: **0000-0003-0943-0800** e-mail: **v.mishustov@nntu.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**V.I. Filatov**

ORCID: **0000-0001-9815-7169** e-mail: **valera.filatov@nntu.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**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*

**Abstract.** An analysis of the market of systems for monitoring blind spots is presented. These systems help drivers avoid collision partially or completely while changing traffic lanes. Systems made by different manufacturers were benchmarked, and their common principles and conceptual features were identified.

A new system for monitoring blind spots was developed. It can be installed on vehicles used in the segment of commercial light-duty transport. An algorithm of system functioning was also proposed. The software and hardware of the system was developed and built around microwave radars made by *Continental* and the *Nvidia Xavier*-based vehicle-borne computer.

Virtual tests were conducted on the *CARLA* computer simulator. These tests imitated actual traffic scenarios on a multilane road with overtaking and being overtaken auxiliary vehicles. The following parameters were recorded: response or no-response warnings from the system; alongside and crosswise distance to auxiliary vehicles and the direction of their travel; absolute and relative speeds. Tests on the *CARLA* computer simulator yielded positive results and confirmed the serviceability of the presented system.

**Key words:** driver assistance system, blind spot monitoring, light-duty commercial vehicles, blind spot.

**FOR CITATION:** P.O. Beresnev, D.N. Zarubin, D.Yu. Tyugin, V.P. Mishustov, V.I. Filatov, D.M. Porubov. Developing a system for controlling blind spots for commercial transport vehicles. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. №3. P. 68-80. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_68

## Введение

*BSM (Blind Spot Monitor)* – система помощи водителю, функцией которой является обнаружение и контроль транспортных средств (ТС) вокруг: например, приближающихся сбоку и сзади и находящихся в так называемой «слепой» зоне. При приближении ТС система *BSM* предупреждает водителя об их присутствии, используя звуковые или визуальные сигналы. Такие системы эффективны в ситуациях, когда водитель пытается сменить полосу движения или повернуть на полосу, занятую другим ТС, которое невозможно увидеть, потому что оно находится в слепой зоне. С помощью установленных сенсоров система контролирует слепые зоны автомобиля и способна различать несколько ТС-мишеней одновременно. Система *BSM* контролирует как наличие ТС в зонах действия сенсоров, так и их критическое сближение с ТС, на котором установлена система.

В настоящий момент системы *BSM* имеют несколько вариаций по компонентному составу основных сенсоров:

- использование видеокамер;
- использование радаров;
- комбинированные системы.

При этом весь рынок современных систем контроля слепых зон можно разделить на две следующие составляющие.

### 1. Системы, устанавливаемые на заводе.

Наиболее распространенным типом системы контроля слепых зон является та, которую производители автомобилей предлагают в стандартной комплектации или в качестве опции на определенных уровнях комплектации. Несмотря на то, что некоторые из производителей предлагают эти системы бесплатно, большинство продолжают резервировать их для более дорогих ТС. В результате они, как правило, настраиваются на заказ для конкретной модели. В табл. 1 представлены некоторые названия предлагаемых автопроизводителями систем мониторинга слепых зон, а также используемые в них сенсоры.

Таблица 1.

### Примеры систем мониторинга слепых зон различных автопроизводителей

Table 1.

#### Examples of systems for monitoring blind spots installed by different automobile manufacturers

Марка	Название	Сенсоры
Buick	Side blind zone alert	Радары
Ford	Blind spot information system (BLIS)	Радары
Mercedes-Benz	Blind spot assist	Радары
Mercedes-Benz	Active blind spot assist	Радары
Volkswagen	Blind spot monitor	Радары
Volvo	Blind spot information system	2 камеры

Так, например, система *Active Blind Spot Assist* от *Mercedes Benz* [1] при смене полосы движения может предупредить водителя, применив избирательное торможение к отдельным колесам и предотвратив возможное столкновение (рис. 1). Радарные датчики *Active Blind Spot Assist* контролируют дорожную сцену по бокам и позади автомобиля. Если ТС обнаружено в зоне слепого пятна, в соответствующем наружном зеркале появляется красный тре-

угольник. Если водитель не замечает предупреждение и указывает на сигнал смены полосы движения, индикатор начинает мигать, и звучит звуковое предупреждение. Если водитель пытается сменить полосу движения, несмотря на предупреждения, система может снова предупредить водителя с помощью ощутимых корректирующих тормозных действий. Если водитель по-прежнему не реагирует, система может помочь вывести автомобиль из опасной зоны.

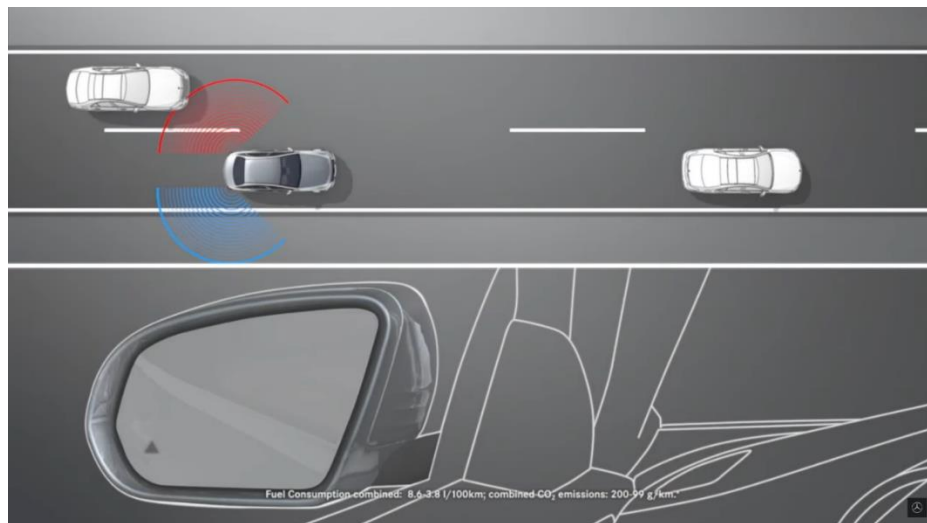


Рис. 1. Система «Active Blind Spot Assist (Mercedes Benz)» [2]

Fig. 1. Active Blind Spot Assist (Mercedes Benz) System [2]

*Active Blind Spot Assist* работает на скорости более 30 км/ч. Курс корректирующих тормозных вмешательств может быть произведен в диапазоне скоростей от 30 до 200 км/ч. Система *BLIS* от *FORD* [3], например, определяет в слепых зонах машины, но не пешеходов, велосипедистов или другие объекты (рис. 2).



Рис. 2. Система BLIS (Ford) [4]

Fig. 2. BLIS (Ford) System [4]

*Volvo* использует для работы системы две камеры [5], покрывающие зону 3 м в боковую сторону от зеркала заднего вида и 9,5 м назад. Они установлены под зеркалами заднего вида.

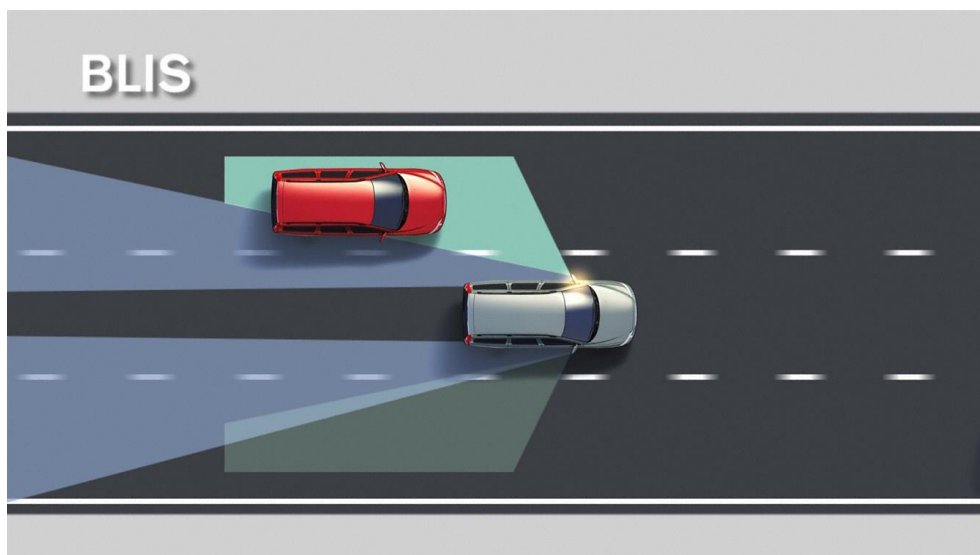


Рис. 3. Система Blind Spot Information System (Volvo) [6]

Fig. 3. Blind Spot Information System (Volvo) [6]

*Buick* использует два радара, установленных под задним бампером [7]; зона покрытия: 3,5 м вбок и 5 м назад. Скорость, при которой работает система, не регламентируется.



Рис. 4. Система Side blind zone alert (Buick) [8]

Fig. 4. Side blind zone alert (Buick) System [8]

## 2. Отдельные комплекты систем

Комплекты для мониторинга слепых зон послепродажного обслуживания составляют небольшой рынок, но он продолжает расти, так как все больше стартапов и крупных компаний, выпускающих автомобильные аксессуары, начинают предлагать комплекты по индивидуальному заказу для различных автомобилей. Многие из этих комплектов предназначены для почти универсального применения. С учетом вышесказанного, точность, как правило, меньше, чем у комплектов, установленных на заводе.

В качестве датчиков обнаружения используются различные технологии: камера, радар или ультразвуковые датчики. Как правило, в системах мониторинга слепых зон используют-



ся два или более датчиков для покрытия зон с разных сторон транспортного средства. Когда какой-либо объект входит в поле зрения датчика с определенной скоростью или выше, включается визуальный или звуковой индикатор. В качестве примера можно отметить систему *BS-D-01* от *Parkmaster* (рис. 5), в которой используется микроволновый радар в качестве сенсора.



Рис. 5. Система BS-D-01 (Parkmaster) [9]

Fig. 5. BS-D-01 (Parkmaster) System [9]

Одной из важнейших характеристик, несколько отличающейся в разных системах, является точность датчиков: насколько однозначно они могут игнорировать ложные срабатывания (объекты, которые не представляют опасности). Высококачественные датчики, как правило, обеспечивают более высокую точность, но для снижения частоты ложных срабатываний также требуется усовершенствованный контроллер, запрограммированный для максимально возможной дифференциации положительных и ложных срабатываний.

Применительно к легковому сегменту можно отметить малый интерес к системе контроля слепых зон в классе легких коммерческих автомобилей. Однако увеличение габаритных размеров ТС ведет к увеличению слепых зон автомобиля. Ввиду этого использование системы, способной контролировать слепые зоны ТС в задней части и помогать водителю при осуществлении перестроения в соседнюю полосу, является актуальной.

### Разработка системы контроля слепых зон

Проведен спектр работ по созданию системы контроля слепых зон, разработана и реализована как программная, так и аппаратная ее часть, в основу которой легли микроволновые радары компании *Continental* и бортовой вычислительная база компьютера *Nvidia Xavier*. Также проанализированы требования и документы, соответствием которым обязательно для подобных систем, например, набор стандартов, которым должен отвечать функционал любой разрабатываемой системы *BSM*: *SAE J2802* [10], *ISO 17387* [11] и *ГОСТ Р 58808* [12].

Согласно стандарту *ГОСТ Р 58808*, рабочей зоной *BSM* является область слева от транспортного средства между горизонтальными линиями В и С и вертикальными линиями F и G, и справа от транспортного средства между горизонтальными линиями В и С и вертикальными линиями К и L, где линии определены ниже (рис. 6):

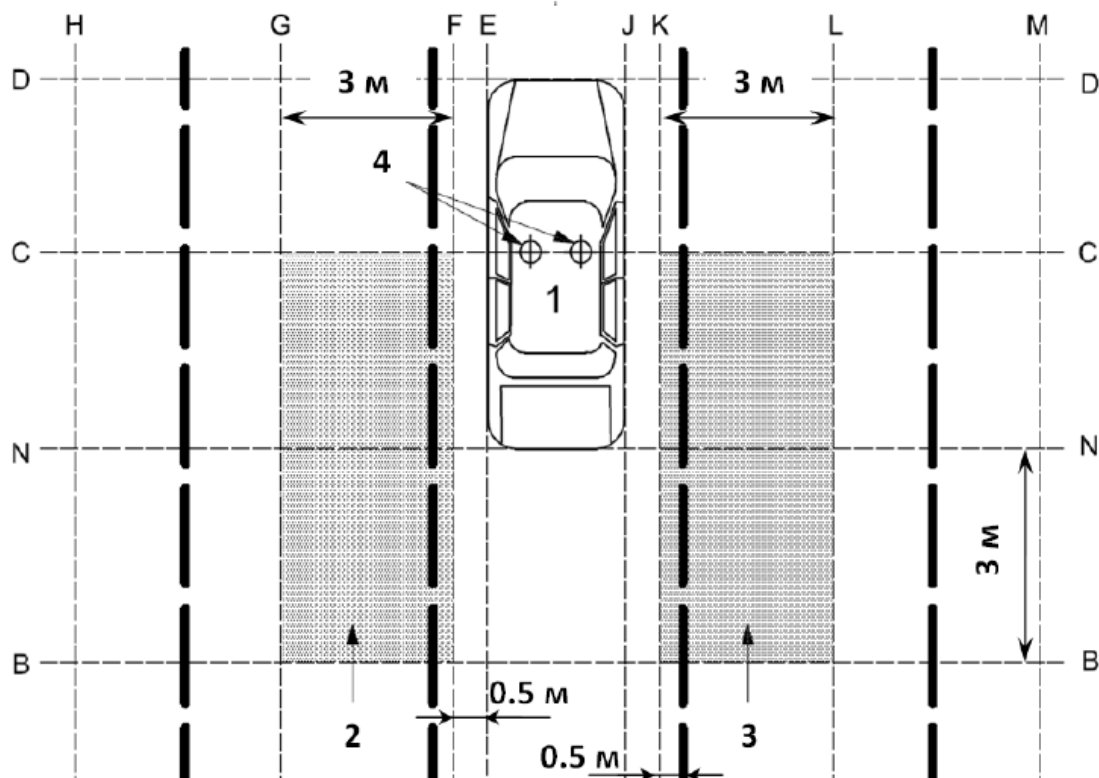


Рис. 6. Схема расположения слепых зон, покрываемых зонами действия радаров [12]

Fig. 6. Diagram of location of blind spots covered by radar coverage zones [12]

Также, согласно [12], *BSM* должна функционировать, когда ТС движется вперед со скоростью 10 км/ч и более. Допускается функционирование системы на более низких скоростях при движении вперед. Система не должна функционировать, когда включена передача заднего хода или режим парковки.

Система предупреждения водителя о транспортных средствах в «слепых» зонах состоит из следующих компонентов:

- задний левый радар;
- задний правый радар;
- блок управления *BSM*;
- сигнализаторы системы *BSM*;
- кнопка включения/выключения системы *BSM*.

Оба радара разрабатываемой системы установлены в заднем бампере так, чтобы в зоне их покрытия оказались зоны срабатывания системы *BSM*, а блок управления, сигнализаторы и кнопка включения/выключения системы находятся внутри салона транспортного средства.

При этом система *BSM* обеспечивает следующие функции:

- детектирование наличия объекта в слепой зоне транспортного средства;
- оценку относительной скорости движения используемого транспортного средства;
- визуальное и звуковое предупреждение водителя о возможном столкновении с ТС в слепой зоне;
- самодиагностику системы;
- визуальное представление водителю информации о статусе работы системы;
- визуальное представление водителю информации об ошибке работы системы.

Функциональная блок-схема *BSM* представлена на рис. 7.

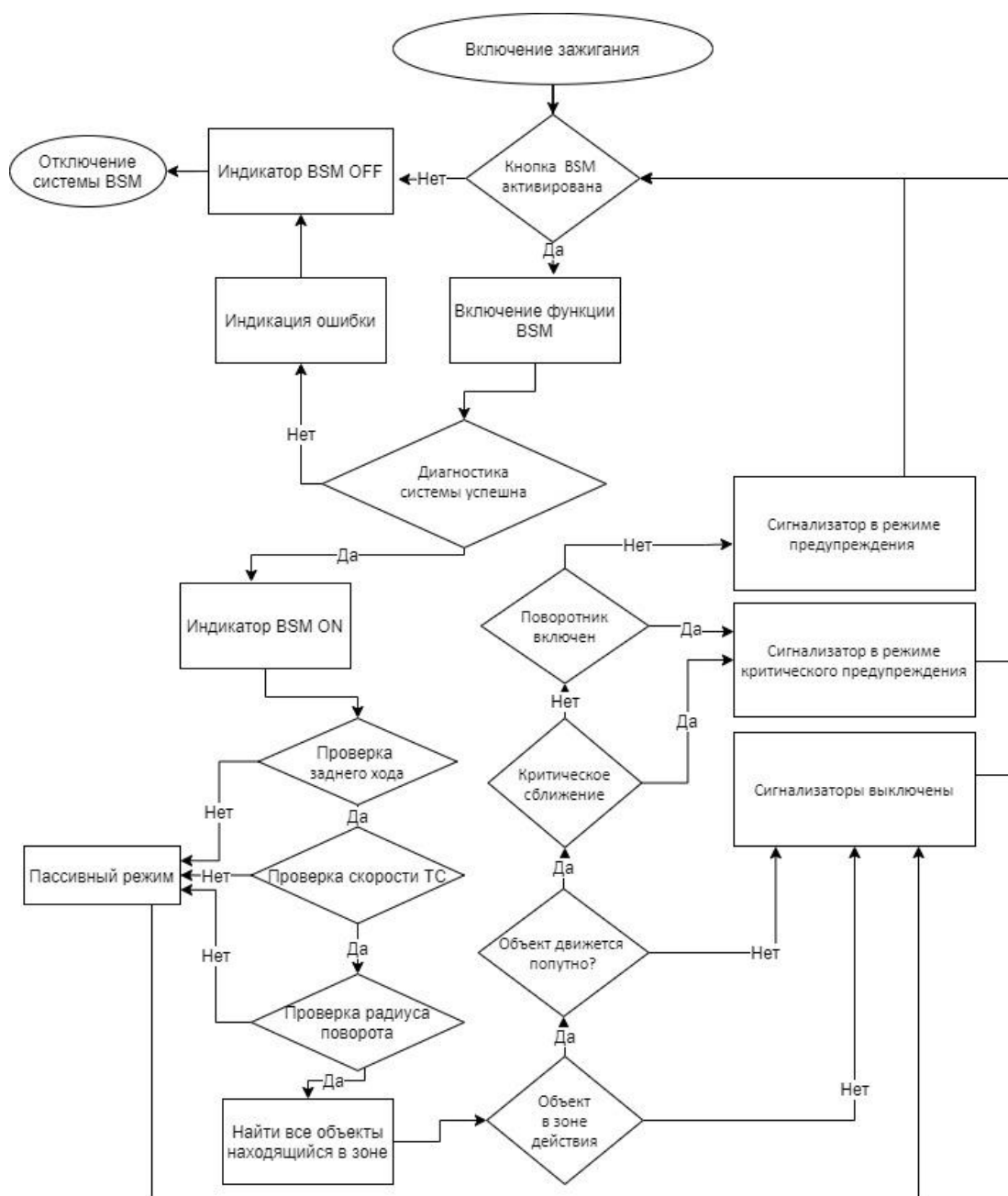


Рис. 7. Схема функционирования системы BSM

Fig. 7. BSM system operational scheme

Система *BSM* может находиться в двух режимах: активном и пассивном. В пассивный режим она переходит в том случае, если не выполняются все условия активного режима, а именно:

- включено зажигание;
- не включена задняя скорость;
- скорость ТС находится в интервале от 10 до 60 км/ч;
- радиус поворота, в движении по которому находится ТС, составляет менее 250 м;
- не загрязнены области бампера в месте установки радаров.

Если же все условия выполняются, система автоматически переходит в активный режим. Далее приведены шаги алгоритма функционирования, имеющие отражение в вышеуказанной схеме. При включении зажигания система автоматически переходит на стадию акти-

вазии и самодиагностики, при выполнении которой она произведет первоначальную диагностику всех компонент, необходимые для корректной работы:

- статус текущего состояния данных скорости транспортного средства;
- статус текущего состояния указателей поворота;
- статус текущего состояния визуальных индикаторов;
- статус текущего состояния системы звукового оповещения;
- статус текущего состояния радаров;
- статус текущего состояния передачи заднего хода.

При успешном прохождении самодиагностики система выполняет переход либо в активный, либо в пассивный режим.

*BSM* находит и фильтрует обнаруженные объекты с помощью радара по критериям:

- 1) вероятности существования объекта: 95-100 %;
- 2) размера: длина 2-2,5 м, ширина 0,7-0,9 м, высота 1,1-1,9 м.

Максимальное количество одновременно определяемых объектов составляет 45 единиц. При обнаружении объекта система определяет, в каком направлении движется этот объект. Разрабатываемая система подает визуальные и звуковые предупреждения, если в слепой зоне находится попутное ТС, и не подает сигналов, если в слепой зоне окажется припаркованное ТС или ТС, движущееся в противоположном направлении. Также система способна определить опасное сближение и оповестить об этом водителя, отследить статус указателей поворота. Если в зоне действия *BSM* определен объект (транспортное средство), и с определенной стороны сигнализатор находится в режиме предупреждения, то при включении соответствующего указателя поворота будет активирован сигнализатор в режиме критического сближения. При этом будет рассчитана скорость приближения транспортного средства, а сигнализатор в зеркальных элементах будет мигать. При этом, чем быстрее приближается транспортное средство, тем чаще мигает сигнализатор.

Если какое-либо ТС находится в слепой зоне и приближается в поперечном направлении по отношению к полосе движения к ТС с системой *BSM* менее чем на 1 м, то будет рассчитано расстояние между ТС, активируется сигнализатор в режиме критического сближения, сигнализатор будет мигать. Чем ближе ТС, тем чаще мигает сигнализатор. Допускается снижение показателей характеристик работы функции *BSM* при: наличии атмосферных осадков; загрязнении радаров; присоединении прицепа; затяжном повороте. Разработанный алгоритм работы *BSM* соответствует требованиям вышеописанных стандартов *SAE J2802* [10], *ISO 17387* [11] и *ГОСТ Р 58808* [12].

### Моделирование испытаний системы

Для проверки достоверности элементов разработки системы было принято решение использовать виртуальный симулятор *CARLA* [13]. Использование виртуального симулятора позволяет упростить процесс, поскольку с его помощью возможно проводить испытания на каждой стадии, выявляя недостатки и ошибки разрабатываемой системы. Данный виртуальный симулятор является продуктом с открытым доступом, служащим для разработки автоматических систем вождения. В нем имитируется городская среда со зданиями, пешеходами, автомобилями и другими объектами, а также меняющаяся погода.

Для моделирования необходимых кейсов были использованы данные о скорости ТС, положения угла колес и данные радаров, расположенных на автомобиле. Для симулятора был разработан модуль, позволяющий имитировать сигналы радаров системы *BSM*. Он был интегрирован в симулятор *CARLA*. В качестве ТС с установленной системой *BSM* был использован стандартный автомобиль (схожий с ТС легкого коммерческого класса), используемый в симуляторе (рис. 8).



**Рис. 8.** Пример испытания системы *BSM* в симуляторе *CARLA*

**Fig. 8.** Example of testing the *BSM* system on the *CARLA* simulator

Испытания представляли собой движения по многополосной дороге с обгоняющими и обгоняемыми вспомогательными ТС, имитируя реальные дорожные сценарии. В каждом случае регистрировалось срабатывание или несрабатывание предупреждений от системы, продольное и поперечное расстояние до вспомогательных ТС, абсолютные и относительные скорости, а также направление движения вспомогательных ТС. Затем полученные результаты сопоставлялись с кейсами специально разработанной программы и методики проведения испытаний.

На рис. 9 приведен пример проведения испытаний в компьютерном симуляторе *CARLA* для сценария, когда вспомогательное ТС опережает ТС с системой *BSM*, находясь в соседней полосе движения.

Анализировались следующие параметры:

- 1) включенная передача заднего хода;
- 2) скорость ТС с системой *BSM*;
- 3) скорость и направление движения вспомогательного ТС;
- 4) скорость сближения ТС;
- 5) продольное и поперечное расстояние между ТС во время проведения тестов;
- 6) пересечение вспомогательным ТС слепой зоны.

На рис. 10 представлены графики состояния системы *BSM* во время проведения виртуального испытания.

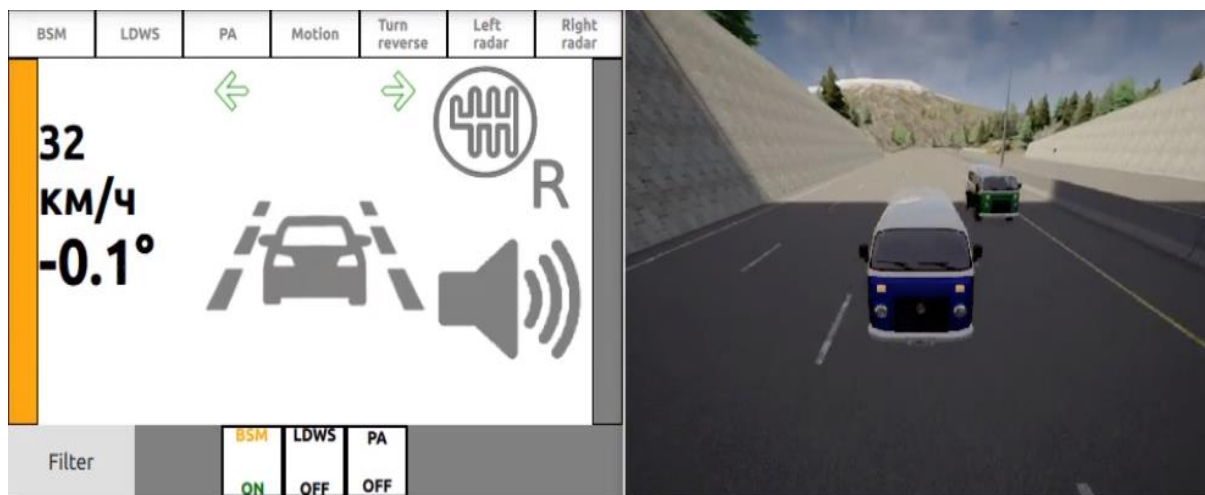


Рис. 9. Расположение объектов в момент поступления предупреждения

Fig. 9. Location of objects at the moment of arrival of warnings

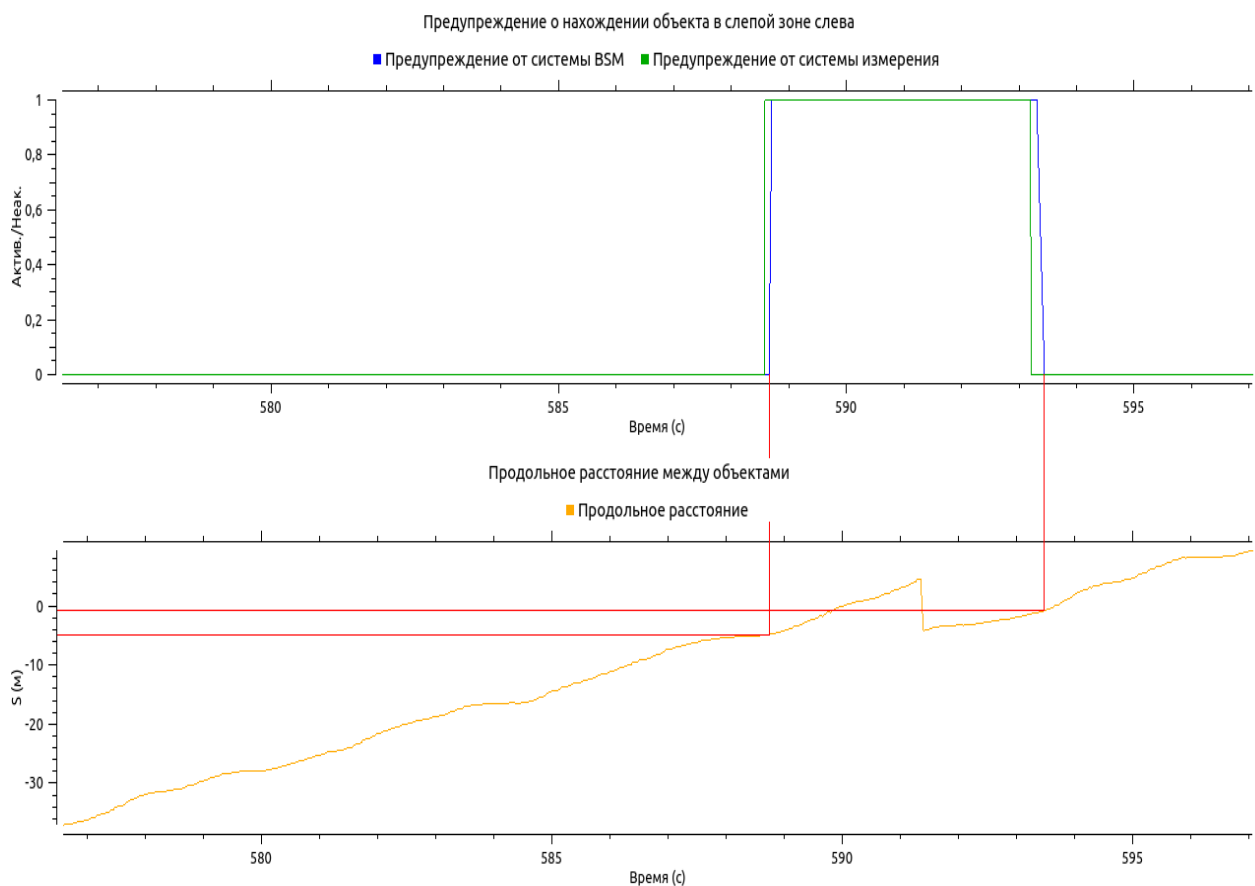


Рис. 10. Графики состояния системы BSM и продольное расстояние между ТС

Fig. 10. BSN system state graphs and alongside distance between vehicles

Синим цветом отображается предупреждение от системы BSM, зеленым – от системы измерения. Значение 0 соответствует отсутствию предупреждения, 1 – наличию сигнала предупреждения. При появлении сигнала предупреждения продольное расстояние между объектами равно 5 м. Результаты проведения испытания представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Соотношение нормативных и фактических значений работы системы

Table 2.

Relationship between standard and actual system operational parameters

Параметр	Нормативное значение	Фактическое значение
Скорость ТС с BSM	30 ±3 км/ч	30 ±3 км/ч
Скорость вспомогательного ТС	40 ±3 км/ч	40 ±3 км/ч
Продольное расстояние между ТС в начале испытания	30 м	36 м
Продольное расстояние до вспомогательного ТС при подаче сигнала	5 м	5 м
Условия прекращения подачи сигнала	Вспомогательное ТС вышло из слепой зоны	Вспомогательное ТС вышло из слепой зоны

Согласно табл. 2, система считается выдержавшей испытание. Испытания по определению попутных транспортных средств в слепых зонах, а также тестирование на ложные срабатывания были успешно пройдены системой *BSM*. Система во всех случаях активного режима подала сигнал о наличии движущегося попутно ТС в слепой зоне, а также не подала ложных срабатываний, в том числе, в пассивном режиме.

### Выводы

Проведен анализ рынка систем контроля слепых зон, составлен бенчмаркинг систем различных производителей, а также сделаны выводы об общих подходах, применяемых в таких системах. Разработана и предложена собственная система контроля слепых зон, которая в дальнейшем может быть установлена на транспортные средства сегмента легкого коммерческого транспорта. Описаны общие подходы используемые при создании системы контроля слепых зон. Проведены тесты в компьютерном симуляторе CARLA, которые показали положительные результаты и доказали работоспособность разработанной системы.

Дальнейшие исследования будут связаны с проведением полевых испытаний системы контроля слепых зон в реальных условиях на специально подготовленном участке полигона группы ГАЗ. Также планируется реализация и адаптация системы контроля слепых зон для семейства автомобилей Группы ГАЗ.

*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).*

### Библиографический список

1. MERCEDES-BENZ [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.la.mercedes-benz.com/en/passengercars/mercedes-benz-cars/models/gla/gla-suv/explore.pi.html/mercedes-benz-cars/models/gla/gla-suv/explore/intelligent-technologies/parking-pilot>, свободный.
2. MERCEDES-BENZ (YouTube) [Электронный ресурс]: [сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=wc2H6IbVtGg>, свободный.
3. FORD [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.ford.com/technology/driver-assist-technology/enhanced-active-park-assist/>, свободный.
4. Columbine Ford [Электронный ресурс]: [сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.columbineford.com/ford-blis-technology/>, свободный.

5. VOLVO [Электронный ресурс]: [сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.volvocars.com/ru-am/support/manuals/v60/2014/podderzhka-voditelya/blis-sistema-bezopasnosti/blis-blind-spot-information-system-ispolzovanie>, свободный.
6. Volvo Cars [Электронный ресурс]: [сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.media.volvocars.com/global/en-gb/media/photos/8152>, свободный.
7. BUICK [Электронный ресурс]: [сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.auto123.com/en/news/side-blind-zone-alert-in-buick-lacrosse/21661/>, свободный.
8. [Электронный ресурс]: [сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: [https://media.buick.com/media/us/en/buick/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2010/Apr/0407\\_si\\_deblind.html](https://media.buick.com/media/us/en/buick/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2010/Apr/0407_si_deblind.html), свободный.
9. Parkmaster [Электронный ресурс]: [сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://www.parkmaster.ru/catalog/auto/bs-d-01/>, свободный.
10. SAE J2802-2015. Blind Spot Monitoring System (BSMS): Operating Characteristics and User Interface.
11. ISO 17387-2008. Intelligent transport systems — Lane change decision aid systems (LCDAS) — Performance requirements and test procedures.
12. ГОСТ Р 58808-2020. Автотранспортные средства. Системы мониторинга слепых зон. Общие технические требования и методы испытаний
13. Виртуальный симулятор CARLA [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Электрон. дан. Режим доступа: <https://carla.org/>, свободный.

***Дата поступления  
в редакцию: 19.01.2021***



УДК 629.36.042.2

DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_81

## ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СРЕДСТВ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ КАБИН И ОБИТАЕМЫХ ОТСЕКОВ

**С.Б. Верещагин**

ORCID: 0000-0003-4588-8368 e-mail: sbver@yandex.ru

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

*Москва, Россия*

Изложены концептуальные основы конструирования теплозащищенной кабины, позволяющей обеспечить относительно комфортные условия водителя и экипажа в условиях жары без использования кондиционера. Определены углы позиционирования солнца на территории вероятной эксплуатации техники от юга Краснодарского края до Мурманской области. Наиболее опасные значения, при которых на кабину воздействует максимальная тепловая радиация, наблюдаются в исследуемых регионах с 1 мая по 20 сентября с 10<sup>00</sup> до 16<sup>00</sup>. По итогам расчетов установлены параметры пассивной тепловой защиты (размеры окон кабины, углы отрицательного отклонения стекол, конфигурации солнцезащитных козырьков и панелей). Эффективным средством тепловой защиты крыши кабины является горизонтальный экран. При его разработке и использовании большое значение имеет воздушная прослойка между самим экраном и крышной панелью кабины. Необходим учет предполагаемой скорости воздуха, протекающего при движении и стоянке между крышной панелью и теплозащитным экраном.

**Ключевые слова:** температура, кабина, угол затенения, остекление, козырек, солнечная радиация.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Верещагин, С.Б. Основы проектирования средств тепловой защиты кабин и обитаемых отсеков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №3. С. 81-85. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_81

## BASICS OF DESIGNING MEANS FOR THERMAL PROTECTION OF CABINS AND CREW MODULES

**S.B. Vereshchagin**

ORCID: 0000-0003-4588-8368 e-mail: sbver@yandex.ru

Moscow Automobile and Road Transport State Technical University

*Moscow, Russia*

**Abstract.** The conceptual framework of designing a thermally protected cabin is presented. The design should ensure relatively comfortable conditions for the driver and crew in hot outdoor conditions without using an air conditioner. The solar position angles were found for the territory of probable vehicle operation ranging from the south of the Krasnodar Territory to the Murmansk Region. The most hazardous conditions, when the cabin is subjected to maximum thermal radiation, occur in these regions from May 1 to September 20 from 10 a.m. to 4 p.m. Designing has established the parameters of passive thermal protection (cabin windows sizes, angles of negative deviation of the glazing, and the configurations of solar protection windscreen visors and panels). A horizontal screen is an effective means of thermal protection of the cabin roof. During its design and use, of critical importance is the air gap between the screen itself and the cabin roof panel. It is necessary to account for the assumed velocity of the airflow between the roof panel and the thermal protection screen during driving and standstill.

**Key words:** temperature, cabin, shading angle, glazing, visor, solar radiation.

**FOR CITATION:** S.B. Vereshchagin. Basics of designing means for thermal protection of cabins and crew modules. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 3. Pp. 81-85. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_81

В последние десятилетия выросли требования к обитаемости кабин и обитаемых отсеков транспортно-технологических и специальных колесных и гусеничных машин. Главной проблемой является обеспечение комфортного состояния водителя и экипажа в условиях

летней жары. Проблема обеспечения климатических условий при низких температурах в основном решена.

Основным способом обеспечения оптимальных климатических условий в кабинах и обитаемых отсеках в условиях жары в настоящее время является установка системы кондиционирования. Техническое решение вопроса оказывается дорогостоящим. Если рассматривать обеспечение теплом и холодом, с учетом стоимости систем и стоимости их обслуживания, тепло в кабине транспортного средства стоит в 7... 10 раз дешевле, чем холод. К этому следует добавить увеличение расхода топлива двигателем от увеличения сопротивления вращения компрессора при его включении, что снижает полезную мощность на коленчатом валу двигателя и увеличивает стоимость эксплуатации машины. При этом на машинах, изначально не подготовленных для установки системы кондиционирования, такую установку бывает смонтировать трудно, а иногда невозможно. Необходимо изыскать место для установки всех агрегатов системы кондиционирования. Наибольшие проблемы возникают при установке компрессора, испарителя и конденсатора; не менее важно и обеспечение привода компрессора кондиционера. Из конструкторского опыта можно сказать, что на специальных колесных и гусеничных машинах, на которых установлены весьма распространенные и часто используемые двигатели, обеспечить привод компрессора кондиционера практически невозможно. На автомобилях семейства УАЗ в моторном отсеке нет достаточного места для установки компрессора соответствующей мощности, и обеспечение его привода также остается под большим вопросом. Использование электрического привода для обеспечения работы компрессора также не дает требуемый эффект, так как компрессор кондиционера потребляет значительную мощность, а мощности стандартного генератора в этом случае не хватает. Даже если есть возможность установить более мощный генератор, мощности которого будет достаточно для обеспечения работы компрессора, то в зимнее, осеннее и весеннее время, когда кондиционер не используется, излишняя электрическая мощность может выводить из строя агрегаты и элементы электрооборудования и сокращает ресурс аккумуляторных батарей.

Единственным выходом является создание конструкции кабины, не нуждающейся в кондиционере или в использовании кондиционера минимальной мощности, например, термоэлектрического, подсоединяемого к электросети машины. Это требует создание конструкции кабины максимально защищающей внутренний обитаемый объем от проникновения солнечной радиации. На территории России севернее Ростовской области средняя дневная температура редко превышает  $+23...+25$  °С [1]. Максимальная температура, при которой водитель может безопасно функционировать составляет  $+27...+28$  °С [2-5].

### **Исследование конструктивных параметров тепловой защиты кабин**

Проведенные исследования показывают, что основной причиной повышения температуры внутри кабины является солнечная радиация, проникающая через остекление (60...70 %) [6]. Второй по значимости причиной является нагрев крыши (20...25 %), третьей – нагрев стенок кабины (5...15 %). Если конструкторы гражданских легковых и грузовых автомобилей при проектировании кабин и обитаемых отсеков ограничены дизайном и характеристиками аэродинамика, мешающими спроектировать теплозащищенную кабину, то конструкторы транспортно-технологических и специальных машин, имеющих относительно небольшие скорости движения, могут спроектировать кабину, наиболее отвечающую требованиям теплозащищенности и эргономики. При ее проектировании для определения размеров стекол, угла отклонения ветрового стекла, размеров и выноса солнцезащитных козырьков, размера солнцезащитного экрана крыши важно знать углы высоты позиционирования солнца в жаркое время года в широтах вероятной эксплуатации техники. Для расчета систем кондиционирования принято рассчитывать нагрев кабины в дневное время в промежутке между  $11^{00}$  и  $15^{00}$  [7, 8], так как в это время солнечная радиация наиболее интенсивна. Проведенные

ранее исследования [6] показывают, что солнечная радиация в ранние часы и более поздние может повлиять на повышение температуры в кабине. По этой причине необходимо расчетное время определения интенсивности солнечной радиации сдвинуть на час назад и на час вперед. В этом случае расчетная временная зона солнечного воздействия будет равна 6 часам: с 10<sup>00</sup> до 16<sup>00</sup>. Вероятная территориальная зона эксплуатации колесной и гусеничной машины может простирается от юга Краснодарского края (45° 02' северной широты) до юга Мурманской области (59° 57' северной широты). Расчетное время года наибольшей солнечной радиации принимается с 1 мая по 20 сентября. Данные углов позиционирования солнца в интересующее нас время года на исследуемых территориях [9-11] отражены в табл. 1.

Таблица 1.

Углы позиционирования солнца в зависимости от времени года и времени дня

Table 1.

## Solar position angles vs. time of the year and day

## Мурманская область (59° 57' С.Ш.)

Число / месяц	Время		
	10.00	12.00	16.00
1 мая	40°	45°	28°
20 июня	48°	53°	36°
20 сентября	28°	32°	16°

## Московская область (55° 45' С.Ш.)

Число / месяц	Время		
	10.00	12.00	16.00
1 мая	44°	50°	29°
20 июня	51°	58°	36°
20 сентября	32°	36°	17°

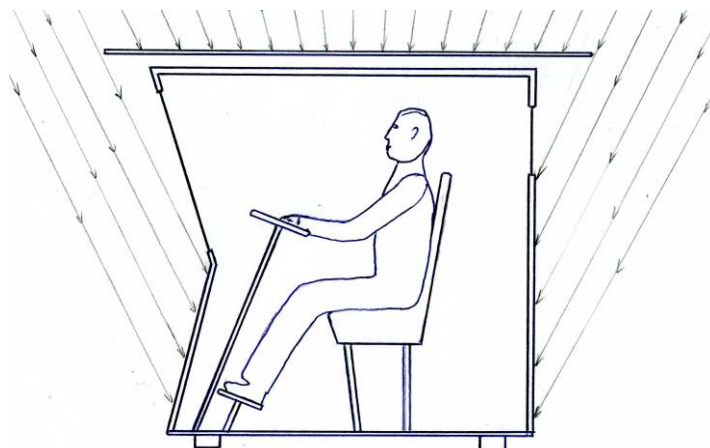
## Краснодарский край (45° 02' С.Ш.)

Число / месяц	Время		
	10.00	12.00	16.00
1 мая	51°	60°	32°
20 июня	58°	68°	38°
20 сентября	40°	47°	21°

Проанализировав данные углов позиционирования солнца, можно заключить, что рациональные углы затенения, способные оптимально с соблюдением норм компоновки и эргономики кабины обеспечить ее максимальную теплозащиту, составляют 40°...50°. Исходя из этих значений, можно проектировать размеры окон, углы наклона ветрового стекла, конфигурацию и размеры солнцезащитных козырьков.

## Исследование параметров проектирования солнцезащитных экранов

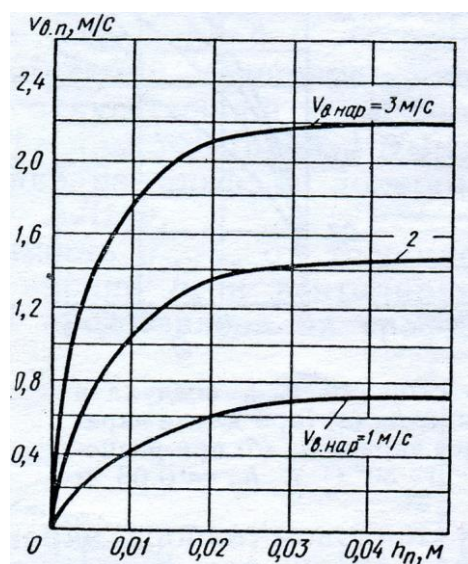
При проектировании горизонтальных солнцезащитных экранов (рис. 1) стараются добиться двух целей: предотвратить или снизить нагрев крышной панели кабины и обеспечить затенение стекол и стенок кабины. При этом для обеспечения максимальной эффективности экрана важны его площадь, конфигурация и толщина воздушной прослойки между экраном и панелью крыши. Величину оптимальной толщины воздушной прослойки между панелью крыши и солнцезащитным экраном можно определить, проанализировав характеристики эффективности протекания воздуха между крышной панелью и солнцезащитным экраном при движении машины с различной скоростью и соответственно различной скоростью набегающего воздушного потока (рис. 2) [12].



**Рис. 1. Вариант установки горизонтального солнцезащитного экрана на крыше кабины специальной машины**

**Fig. 1. Variant of installing the horizontal solar protection screen on the roof of a special vehicle**

С точки зрения обеспечения максимальной теплозащиты кабины, при соблюдении требований к ее эргономике и компоновке оптимальной толщиной воздушной прослойки между панелью крыши и солнцезащитным экраном будет 40...50 мм. Натурные исследования показали, что при правильном выборе конструкции солнцезащитного экрана и величины воздушной прослойки между экраном и крышной панелью достаточная эффективность теплозащиты сохраняется и тогда, когда машина стоит на месте и скорость протекания воздушного потока в прослойке равна нулю. При правильном конструировании солнцезащитного экрана можно отказаться от внутренней теплоизоляции панели крыши.



**Рис. 2. Зависимость скорости воздуха между крышной панелью и солнцезащитным экраном  $V_{в.п.}$  от толщины воздушной прослойки  $h_n$  между ними и скорости набегающего наружного воздуха  $V_{в.нар.}$  (при длине экрана 1...1,5 м) [12]**

**Fig. 2. Velocity of air flowing between the roof panel and the solar protection screen  $V_{a.g.}$  vs. air gap thickness  $h_g$  between them and the velocity of the incoming outdoor air  $V_{a.out.}$  (with a screen length of 1-1.5 m) [12]**

### Выводы

1. При правильном проектировании и расчете углов затенения от солнца козырьков и экранов можно ожидать понижения температуры в кабине до приемлемых величин без использования систем кондиционирования.

2. Горизонтальный солнцезащитный экран может обеспечивать эффективную теплозащиту при воздушной прослойке между ним и верхней панелью крыши, равной 40...50 мм.

### Библиографический список

1. ГОСТ 16350-80 Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. 1981г.
2. **Варламов, В.А.** Что надо знать водителю о себе / В.А. Варламов. – М.: «Транспорт» 1990г. - 192 с.
3. **Багиров, Б.Г.** Человек в жарком климате / Б.Г. Багиров. – Ашхабад: 1977. – 64 с.
4. **Вайсман, А.И.** Гигиена труда водителей автомобилей / А.И. Вайсман. – М.: Медицина, 1988.
5. **Кошечев, В.С.** Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека в условиях высоких температур / В.С. Кошечев, Е.А. Кузнец. –М.: Медицина, 1986. – 255 с.
6. **Верещагин, С.Б.** Обеспечение климатических условий в кабинах и обитаемых отсеках специальных колёсных и гусеничных машин: монография / С.Б. Верещагин; МАДИ. – М, 2014. – 100 с.
7. **Лях, Г.Д.** Кондиционирование воздуха в кабинах транспортных средств и кранов / Г.Д. Лях, И.М. Смола. – М.: Metallurgia, 1982. – 128 с.
8. ГОСТ Р 50993-96 Автотранспортные средства. Системы отопления, вентиляции и кондиционирования. Требования к эффективности и безопасности, 1996.
9. **Бартенева, О.Д.** Режим естественной освещенности на территории СССР / О.Д. Бартенева, Е.А. Полякова, Н.П. Русин. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1971. – 240 с.
10. **Сивков, С.И.** Методы расчета характеристик солнечной радиации / С.И. Сивков. – Л.: Гидрометеиздат, 1968.
11. **Шаронов, В.В.** Таблицы для расчета природной освещенности и видимости / В.В. Шаронов. – М.: Изд-во АН СССР, 1945.
12. **Михайлов, М.В.** Микроклимат в кабинах мобильных машин / М.В. Михайлов, С.В. Гусева. – М.: Машиностроение, 1977. – 230 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 09.02.2021*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ АВТОБУСОВ КАТЕГОРИИ М<sub>3</sub> НА ОСНОВЕ ЗАГОРОДНЫХ ЕЗДОВЫХ ЦИКЛОВ

**С.А. Горожанкин**

ORCID: 0000-0001-7093-881X e-mail: [s.a.gorozhankin@donnasa.ru](mailto:s.a.gorozhankin@donnasa.ru)

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры  
*Макеевка, Донецкая Народная республика*

**Н.В. Савенков**

ORCID: 0000-0003-3803-9528 e-mail: [n.v.savenkov@donnasa.ru](mailto:n.v.savenkov@donnasa.ru)

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры  
*Макеевка, Донецкая Народная республика*

Представлены результаты исследования топливной экономичности и скоростных свойств пригородных и междугородных автобусов категории М<sub>3</sub> при их эксплуатации в загородных условиях в соответствии с ГОСТ Р 54810-2011. В качестве критериев для оценки эффективности процесса движения автобусов большого класса выбран средний массовый путевой расход топлива в условиях магистральных ездовых циклов и соответствующая средняя скорость. Повышение топливной экономичности обусловлено увеличением общего КПД двигателя и трансмиссии за счет рационального согласования характеристик и режимов работы этих агрегатов.

Исследование выполнено на примере автобусов марки НЕФАЗ-5299 классов II и III. Результаты получены путем численного моделирования процесса движения с помощью разработанных компьютерных программ. Для исследуемых моделей пригородных автобусов рациональный выбор режимов дает возможность уменьшить путевой расход топлива на 8-10 % в сравнении с оптимизацией по средней скорости прохождения ездового цикла. Для междугородных автобусов соответствующее улучшение может составлять 6-7 %. Полученные результаты могут быть использованы для рационального комплектования перспективных силовых агрегатов современных автобусов большого класса, а также при конструировании и настройке трансмиссий с автоматическим управлением.

**Ключевые слова:** путевой расход топлива, время движения, ездовой цикл, неустановившийся режим, передаточное число, численное моделирование, оптимизация, двигатель внутреннего сгорания, трансмиссия.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Горожанкин, С.А. Оптимизация движения автобусов категории М<sub>3</sub> на основе загородных ездовых циклов / С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №3. С. 86-98. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_86

## OPTIMIZATION OF CATEGORY M<sub>3</sub> BUS MOVEMENT BASED ON EXTRA-URBAN DRIVING CYCLES

**S.A. Gorozhankin**

ORCID: 0000-0001-7093-881X e-mail: [s.a.gorozhankin@donnasa.ru](mailto:s.a.gorozhankin@donnasa.ru)

Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture  
*Makeevka, Donetsk People's Republic*

**N.V. Savenkov**

ORCID: 0000-0003-3803-9528 e-mail: [n.v.savenkov@donnasa.ru](mailto:n.v.savenkov@donnasa.ru)

Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture  
*Makeevka, Donetsk People's Republic*

**Abstract.** The results of investigating the fuel efficiency and the speed properties of suburban and interurban category M<sub>3</sub> buses during their service in extra-urban conditions according to GOST P 54810-2011 are presented. The criteria for assessing the effectiveness of movement of large-sized class busses were the average driving fuel mass consumption in conditions of motorway driving cycles and the corresponding average speed. The fuel efficiency is in-

creased by increasing the overall efficiency of the engine and the power train due to an effective coordination of the characteristics and the duty of these units.

The investigation was conducted by the example of NEFAZ-5299 buses class II and III. The results were obtained by numerical simulation of the movement process with the help of developed computer programs. For the models of the suburban buses being investigated, an effective choice of their duties enables reducing the driving fuel consumption by 8-10 % as compared to that of optimization by the average speed of the driving cycle. For interurban buses, the corresponding improvement can be 6-7%. The results can be used for effective completing of perspective power plants in large-sized modern buses, as well as for designing and setting-up of power trains with automatic control.

**Key words:** driving fuel consumption, running time, driving cycle, unsteady conditions, transmission gear ratio, numerical simulation, optimization, internal combustion engine, power train, bus.

**FOR CITATION:** S.A. Gorozhankin, N.V. Savenkov. Optimization of category M<sub>3</sub> bus movement based on extra-urban driving cycles. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 2. Pp. 86-98.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_2\_86

На рынке грузовых автоперевозок в настоящее время идет жесткая конкурентная борьба за клиента, практически повсеместно предложение превышает спрос. В сфере между-городных и пригородных пассажирских перевозок конкуренция, к сожалению, проявляется не столь отчетливо. В еще большей мере это относится к массовым перевозкам в населенных пунктах. Рынок пассажирских перевозок располагает потенциальными ресурсами, но ему еще предстоит пройти определенные этапы становления. В перспективе можно предполагать, что потребитель (потенциальный пассажир) будет самостоятельно выбирать услуги по перевозкам в соответствии со своими финансовыми возможностями, соотношением цены и качества услуг.

Благодаря ряду преимуществ перед другими видами сообщений, автобусный транспорт получил значительное распространение. Традиционные автобусные перевозки пассажиров широко применяются в Российской Федерации, соответствующее их распределение по видам сообщений имеет следующую структуру: городские – 67 %, пригородные – 28 %, междугородные – 5 % [1]. В подавляющем большинстве малых городов и поселков городского типа автобус является основным видом массового пассажирского транспорта, а в сельской местности, как правило, единственным. Внутриобластные и сельские пассажирские перевозки обеспечивают связи малых населенных пунктов с магистральными видами транспорта дальнего сообщения. Автомобильный транспорт обслуживает также длительные перевозки пассажиров в районах, не имеющих развитых железнодорожных, воздушных и речных коммуникаций. Пригородные и междугородные маршруты имеют свои закономерности распределения пассажиропотоков по участкам маршрутов. Для пригородных маршрутов характерно постепенное нарастание, либо убывание пассажиропотоков по направлениям движения относительно города в зависимости от времени суток и дня недели; для междугородных отмечаются относительно постоянные пассажиропотоки. Для перевозчиков в условиях конкуренции, наряду с технико-технологическими, актуальными являются задачи экономической направленности: снижение себестоимости перевозок и обеспечение надлежащего качества услуг по обслуживанию пассажиров.

Соответственно, основная часть вопросов, рассматриваемых в настоящей работе, направлена на поиск путей улучшения топливно-экономичных эксплуатационных свойств автобусов на пригородных и междугородных маршрутах. Эти свойства определялись путем численного моделирования процесса движения автотранспортных средств на примере современных автобусов большого класса НЕФАЗ-5299 вагонной компоновки, доля которых в общем парке автобусов Российской Федерации и стран СНГ непрерывно растет [2].

Таким образом, основной целью работы является исследование топливной экономичности пригородных и междугородных автобусов категории M<sub>3</sub> при их эксплуатации в загородных условиях.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- разработана математическая модель движения автобуса с учетом характеристик его трансмиссии и установленного ДВС в условиях магистрального ездового цикла;
- на основе уравнения тягового баланса и разработанных вариантов моделей обоснована методика расчета параметров движения автобусов в таких циклах;
- выполнены расчеты топливной экономичности автобусов для движения в магистральных циклах на дороге в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54810-2011 [3].

Экономическая эффективность эксплуатации подавляющего большинства автотранспортных средств (АТС), оснащенных тепловыми двигателями, главным образом, определяется затратами на топливо, которые для коммерческих АТС составляют в среднем 51-64 % от общих эксплуатационных финансовых расходов [4]. Средний путевой расход топлива выражается, как правило, объемом или массой топлива, затраченного на единицу пути при строго определенных условиях движения.

Известные направления по снижению путевого расхода топлива учитываются при проектировании как АТС, так и их двигателей, трансмиссии и вспомогательных агрегатов. Как правило, это сопровождается возрастанием их стоимости. Так, например, уменьшение собственной массы автомобиля требует применения новых конструкционных материалов (чаще всего, более высокой стоимости) и соответствующих технологических процессов их обработки. Необходимость повышения КПД современных ДВС обычно предполагает применение дополнительных агрегатов и механизмов, специальных систем комплексного управления силовой установкой и других устройств. Все это влияет на экономическую эффективность эксплуатации. На топливную экономичность АТС, помимо конструктивных параметров и внешних условий, существенное влияние оказывают также эксплуатационные факторы, к которым следует отнести его техническое состояние, а также дорожные, режимные, погодноклиматические и другие условия эксплуатации (в том числе, стиль, опыт водителя и манера вождения). В Российской Федерации, в соответствии с требованиями ГОСТ 20306-90, устанавливаются следующие показатели и характеристики топливной экономичности АТС: расход топлива при заданных скоростях движения, расход топлива в магистральном цикле на дороге, расход топлива в городском цикле на дороге, топливная характеристика установившегося движения, контрольный расход топлива.

В настоящей работе представлены результаты возможности повышения топливной экономичности пригородных и междугородных автобусов большого класса при их движении за счет увеличения общего КПД двигателя и трансмиссии путем рационального согласования характеристик и режимов работы этих агрегатов. В качестве критерия для оценки топливной экономичности автобусов выбран средний массовый путевой расход топлива в условиях магистральных ездовых циклов на дороге [5], который может быть определен как в ходе стендовых, так и дорожных испытаний. В мировой практике данный критерий является наиболее распространенным поскольку дополнительно учитывает неустановившиеся режимы, характерные для нормальных условий эксплуатации – разгон, торможение двигателем, режим холостого хода. Соответственно, для различных АТС в одинаковых ездовых циклах выбранный критерий становится достоверной характеристикой их совершенства, количественная оценка которого может быть определена суммарной массой топлива, израсходованного АТС в установленном ездовом цикле.

Рассматриваемое в данном исследовании направление по повышению топливной экономичности, фактически представляет собой задачу оптимизации, которая требует соответствия и строгого соблюдения параметров работы двигателя и трансмиссии с режимами движения автобуса на дороге – его скорости и продольного ускорения. Это предполагает необходимость использования методов математического моделирования как процесса движения автобуса на всех исследуемых режимах, так и вычислений частичных скоростных и нагрузочных характеристик двигателя, а также учета параметров трансмиссии. Результаты подобных вычислений не всегда дают однозначные решения вследствие наличия сложных связей между вышеперечисленными параметрами. Выбор вида ездового цикла зависит от категории



и класса исследуемого АТС и определяется государственными стандартами. В Российской Федерации для расчетов параметров циклов автотранспортных средств принят ГОСТ Р 54810-2011. Исследуемые в данной работе пригородные и междугородные автобусы относятся к категории М<sub>3</sub>. Для автобусов классов II (пригородные) и III (дальнего следования) принято движение в магистральных циклах на дороге (рис. 1).

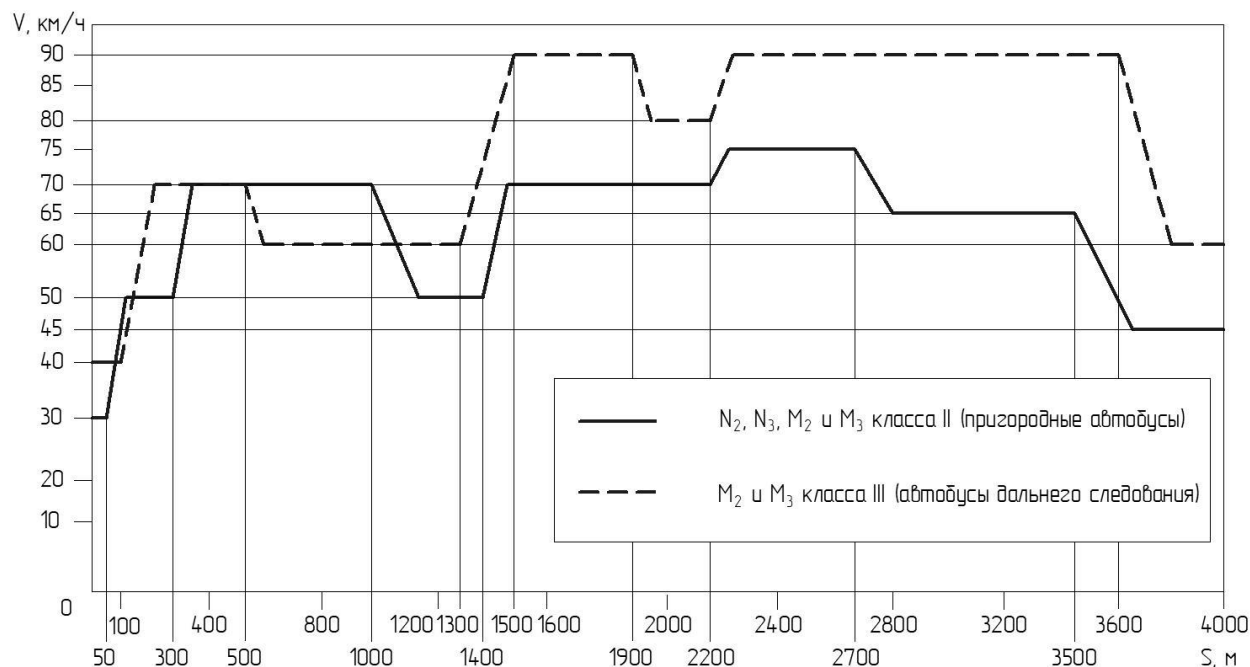


Рис. 1. Схема магистральных циклов на дороге для автобусов II и III классов

Fig. 1. Diagram of motorway driving cycles for class II and III buses

В ГОСТ Р 54810-2011, как и в ранее введенном ГОСТ 20306-90, не установлено время движения на отдельных участках ездового цикла, а также номера включенных передач. Соответственно, расчеты движения АТС по этому циклу являются в значительной мере ориентировочными, поскольку стандартом также не регламентированы значения их ускорений и замедлений. Отсутствие требований к номеру передачи и скорости движения при переключениях передач позволяет варьировать ускорениями и замедлениями, а также предусматривать возможность оценки других вариантов движения с целью оптимизации какого-либо из его параметров. При этом в качестве целевой функции критерия, кроме расхода топлива в ездовом цикле, становится возможным принимать и другие – время движения, среднюю скорость и т.д.

Проведенное рассмотрение материалов из источников информации дает возможность провести исследование на примере пригородных и междугородных автобусов марки НЕФАЗ-5299 большого класса, выпускаемых ПАО «НЕФАЗ», входящем в группу предприятий ПАО «КАМАЗ». Автобусы производятся на базе нескольких типоразмеров шасси и включают городские, пригородные и междугородные модификации, работающие как на газообразном, так и на дизельном топливе и соответствующие экологическим классам Евро-4 и Евро-5.

Ввиду значительного разнообразия мощности и характеристик двигателей, широкого диапазона передаточных чисел коробок передач (КП) и главной передачи, для проведения исследований выбраны современные модели автобусов, основные параметры которых представлены в табл. 1.

Таблица 1.

**Основные параметры исследуемых моделей  
междугородных и пригородных автобусов «НЕФАЗ 5299»**

Table 1.

**Basic parameters of investigated models of interurban and suburban buses NefAZ 5299**

Модель автобуса	Колесная формула	Снаряженная масса автобуса, кг	Количество мест для сидения	Пассажировместимость, чел.	Полная масса автобуса, кг	Тип ДВС, номинальная мощность, кВт	Коробка передач	Передаточное число главной передачи	Размер шин	Максимальная скорость, км/ч
междугородные										
НефАЗ-5299-17-33	4×2	12720	43 (45)	54	16900	КамАЗ-740.62-280, 206 кВт	ZF 6S 1200BO КамАЗ-144	5.11	11/70R22,5	90
НефАЗ-5299-37-52	4×2	12360	42 (44)	71 (69)	17900	Cummins ISB6.7e4 250B, 175 кВт	ZF 6S 1310BO	5.11	11/70R22,5	110
пригородные										
НефАЗ-5299-11-33	4×2	11340	45	77	16900	КамАЗ-740.62-280, 206 кВт	ZF 6S 1200BO КамАЗ-144	5.11	11/70R22,5	90
НефАЗ-5299-11-52	4×2	10980	45	45 (89)	17900	Cummins ISB6.7e4 250B, 175 кВт	ZF 6S 1310BO	5.11	11/70R22,5	110

Основные параметры двигателей КамАЗ-740, применявшихся и применяемых в автобусах НЕФАЗ-5299, приведены в табл. 2. В зависимости от периода разработки, двигатели КамАЗ-740 имеют разные экологические нормы: от Евро-0 до Евро-5.

В трансмиссии автобусов применяются как пятиступенчатые механические ступенчатые КП без делителя с ручным управлением (модели КамАЗ-141 и КамАЗ-144, передаточные числа соответственно: 5.62; 2.89; 1.64; 1; 0.742 и 7.82; 4.03; 2.5; 1.53; 1.00), так и шестиступенчатые автоматические (модель ZF 6S 1200 BO и ZF 6S 1310 BO, передаточные числа: 6.75; 3.87; 2.36; 1.47; 1.00; 0.83). В качестве ведущих мостов устанавливаются модели Raba A-209 и Raba A-718 с передаточными числами главной передачи 4.3, 5.117 или 6.194.

Таблица 2.  
Основные параметры ДВС для пригородных и междугородных автобусов ПАО «НЕФАЗ»

Table 2.

Basic ICE parameters for PJSC NEFAZ interurban and suburban buses

Модель ДВС	Номинальная мощность, кВт (л.с.), при частоте вращения, мин <sup>-1</sup>	Макс. крутящий момент, Н·м	Диаметр цилиндра, ход поршня, мм	Степень сжатия	Рабочий объем, л	Мин. удельный расход топлива (по ВСХ), г/кВт·ч (г/л.с.·ч)
740.11-240	176 (240), 2200	834	120x120	н/д	10,85	207 (152)
740.30-260	191 (260) 2200	1078	120x120	16.5	10,85	207 (152)
740.31-240	176 (240), 2200	980	120x120	16	10,85	н/д
740.62-280	206 (280), 1900	1177	120x130	16.8	11,76	205(151)
740.65-240	176 (240), 1900	981	120x130	16.8	11,76	205(151)

Внешние скоростные характеристики (ВСХ) двигателей группы КамАЗ-740.6, приводимые заводом-изготовителем, представлены на рис. 2а.

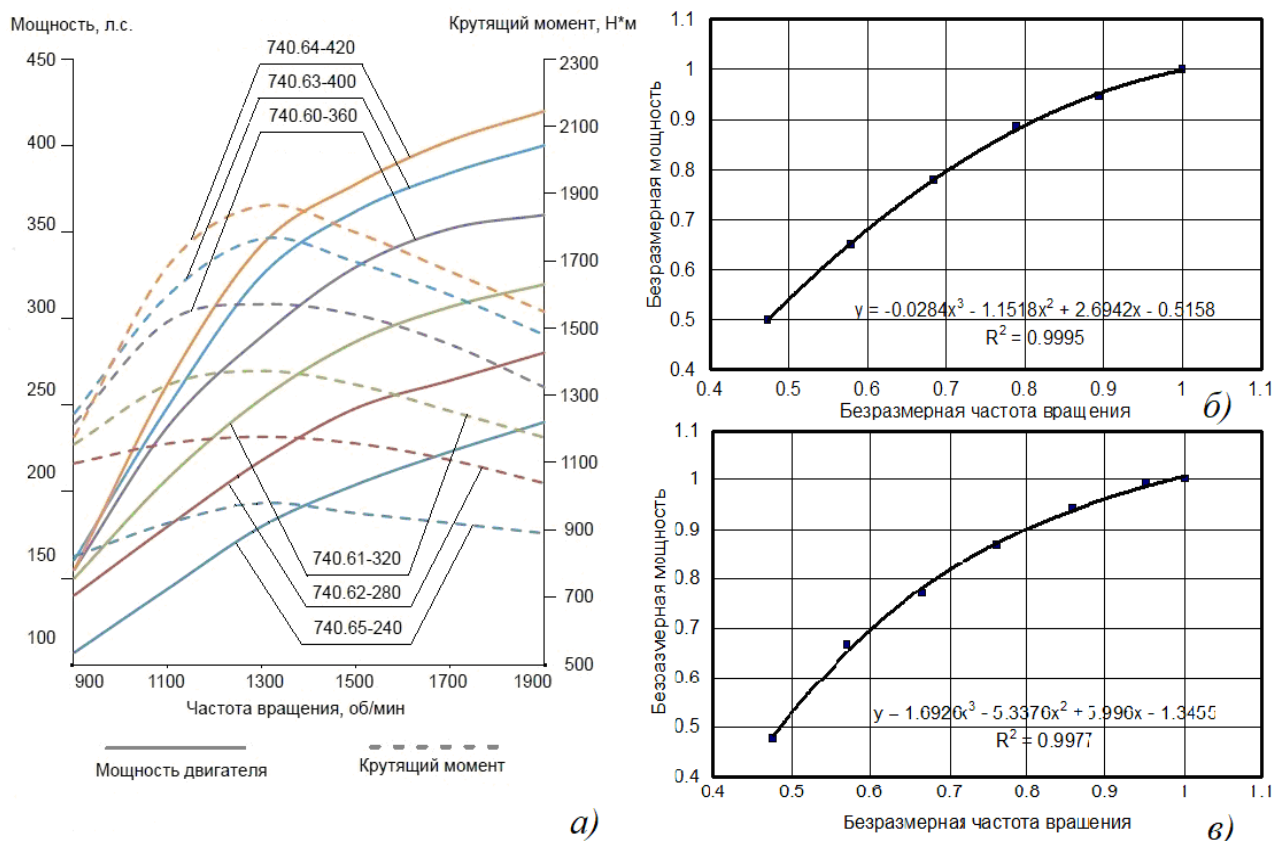


Рис. 2. Внешние скоростные характеристики двигателей:

- а) ДВС группы КамАЗ-740.6;
- б) аппроксимация ВСХ двигателя КамАЗ-740.62-280 (коэффициент корреляции 0.9995);
- в) аппроксимация ВСХ двигателей Cummins (коэффициент корреляции 0.9977)

Fig. 2. Full-load curves of engines:

- a) ICE of the KamAZ-740.6 group;
- b) approximation of the full-load curve (FLC) of the KamAZ-740.62-280 engine (correlation index 0.9995);
- c) approximation of the FLC of the Cummins engines (correlation index 0.9977)

Для расчета внешних и частичных скоростных характеристик ДВС в исследовании применена полиномиальная зависимость (1):

$$N_e = f(k, n) = k \cdot N_{e \max} \cdot \left[ -0.0284 \cdot \left( \frac{n}{n_N} \right)^3 - 1.151 \cdot \left( \frac{n}{n_N} \right)^2 + 2.6942 \cdot \left( \frac{n}{n_N} \right) - 0.5158 \right], \quad (1)$$

где:  $n$ ,  $n_N$  – текущее и номинальное значение частоты вращения коленчатого вала ДВС соответственно,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $N_{e \max}$  – эффективная мощность на номинальном режиме, кВт;  $k$  – коэффициент использования мощности ДВС.

Коэффициенты выражения (1) получены на основании безразмерной ВСХ – рис. 2б. Диапазон изменений частоты вращения коленчатого вала принят в интервале от  $750 \text{ мин}^{-1}$  до  $1\ 900 \text{ мин}^{-1}$  (номинальной). Расчет эффективного удельного расхода топлива при полных и частичных нагрузках двигателя выполнен с использованием универсальной зависимости, предложенной И.С. Шлиппе [6], которая для дизельного двигателя КамАЗ-740.62-280 принимает вид (2):

$$g_e = f(k, n) = 240 \cdot (1.55 - 1.55 \cdot k + k^2) \cdot \left[ 1.7 - 2.62 \cdot \frac{n}{n_N} + 1.92 \cdot \left( \frac{n}{n_N} \right)^2 \right], \text{ г/(кВт}\cdot\text{ч)} \quad (2)$$

Аналогичные вычисления проведены для двигателей Cummins 6 ISBe 270B, Cummins ISB6.7e4 270B и Cummins ISB6.7e4 250B. Их внешние скоростные характеристики [4] приведены на рис. 2в. Отличительной особенностью этих ДВС является более высокая номинальная частота вращения ( $2100 \text{ мин}^{-1}$ ), а расчетный диапазон от  $850 \text{ мин}^{-1}$  до  $2\ 100 \text{ мин}^{-1}$ .

Рассмотрение уравнения процесса движения автобуса при любых внешних условиях приводит к необходимости введения в него большого числа параметров как собственно автомобиля, так и его двигателя, коробки передач (КП), главной передачи, колес и шин. В общем случае процесс движения автобуса по горизонтальной дороге можно представить в виде уравнения баланса мощности (3):

$$N_K = N_D + N_B + N_I, \quad (3)$$

где  $N_K$  – тяговая мощность автобуса (на ведущих колесах);

$N_D$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления качению;

$N_B$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления воздуха;

$N_I$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сил и моментов инерции.

Потребная мощность двигателя  $N_e$  определяется также с учетом дополнительных потерь в трансмиссии. При этом уравнение (3) для горизонтального участка дороги при движении со скоростью  $V$  и продольным ускорением  $j$  в общем случае приобретает вид (4):

$$N_e(V, J) = \frac{1}{\eta_t} \left( V(\psi \cdot m_a \cdot g + W \cdot V^2 + m_a \cdot j) + (J_K \cdot n_k + J_T \cdot U_{ГП}^2 + J_M \cdot U_n^2 \cdot U_{ГП}^2) \frac{j \cdot V}{r_k^2} \right), \quad (4)$$

где  $\psi$  – коэффициент сопротивления качению колес автобуса;

$m_a$  – испытательная масса автобуса;

$W$  – фактор обтекаемости кузова;

$J_K$  – момент инерции колеса;

$n_k$  – количество колес на автобусе;

$J_T$  – момент инерции маховых масс трансмиссии, приведенной к оси карданной передачи;

$J_M$  – момент инерции ДВС;

$U_{ГП}$  – передаточное число главной передачи,

$U_n$  – передаточное число КП при включенной передаче с номером  $n$ ;

$r_k$  – радиус качения ведущего колеса.

Коэффициент полезного действия трансмиссии  $\eta_t$  в проведенных расчетах принят равным 0,913 в соответствии с рекомендацией для двухосных шасси грузовых автомобилей [7].

После группировки констант формулы (4) получаем уравнение баланса мощности (5):

$$N(V, J) = K_V \cdot V + K_{VJ} \cdot V \cdot J + K_{V3} \cdot V^3. \quad (5)$$

В полученном уравнении коэффициенты  $K_V$ ,  $K_{VJ}$ ,  $K_{V3}$  определяются для любой модели автомобиля. В дальнейшем, в сочетании с нагрузочно-скоростными характеристиками двигателя, выражение (5) принято при расчете параметров ездового цикла для рассматриваемых моделей автобусов. Таким образом, уравнение движения автобуса (5) в любом ездовом цикле на дороге предполагает формирование соответствующей целевой функции, которая детально описывает параметры его движения на всех участках этого цикла. Эта целевая функция большого числа аргументов является математической зависимостью (обычно неявной), необходимой для решения задачи оптимизации. В качестве критерия оптимизации могут выступать многие параметры движения, либо силового агрегата. Таковым может быть принят и комплекс из нескольких параметров.

Для проведения расчетов (достаточно многочисленных) режимов движения автобусов в условиях ездовых циклов и оптимизации соответствующих параметров авторами составлены соответствующие компьютерные программы, которые позволяют на основе баланса мощности (5) вычислять удельный расход топлива ДВС на каждом нагрузочно-скоростном режиме, а также расход топлива по участкам цикла и за цикл в целом. Программы составлены на языке программирования TurboC++, их работа на ПЭВМ осуществляется с применением программного обеспечения BorlandC++. Алгоритм этих программ позволяет в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54810-2011 для всех участков циклов определять текущие значения скорости, ускорения, пройденного пути, частоты вращения ДВС, его мощности и удельного расхода топлива. В целом это позволяет имитировать динамику движения автобуса на загородных дорогах.

Для строгого выполнения всех условий движения автобусов классов II и III по ездовым циклам разработанные программы имеют следующие ограничения:

- 1) длина каждого участка должна соответствовать требованиям стандарта; часть участка с ускоренным или замедленным движением может быть либо меньше длины всего участка, либо равной этой длине;
- 2) расчетная скорость в конце каждого участка должна строго соответствовать требованиям стандарта;
- 3) максимальная тяговая мощность  $N_k$  с учетом КПД трансмиссии определена для номинальной мощности двигателя при номинальной частоте вращения;
- 4) частота вращения двигателя автобуса на любом из режимов не должна превышать номинальное значение;
- 5) коэффициент использования мощности двигателя  $k$  на любом из режимов движения должен принадлежать диапазону  $[0 \leq k \leq 1]$ .

Движение автобусов класса II в магистральном ездовом цикле предусматривает изменение его скорости в пределах от 30 до 75 км/ч [3]. Поскольку в процессе движения номера включаемых передач КП каждом из участков цикла стандартом не установлены, то скорости движения, при которых осуществляются переключения (их может быть несколько даже для одного участка) могут существенно отличаться. Кроме того, от участка к участку таких переключений может и не быть. Это характерно именно для магистральных циклов.

При моделировании движения автобусов категории М3 классов II и III становится возможным разделение отдельных участков ЕЦ на отдельные элементарные участки, движение в пределах которых осуществляется без переключения передач. Определяющими величинами являются параметры зависимости (5). В процессе расчета и оптимизации режимов движения становится возможным устанавливать практически любое число расчетных участков. Приводимые в литературных источниках рекомендации по выбору режимов движения АТС [7] указывают на необходимость обеспечения запаса мощности около 30 %, причем частота вращения двигателя при этом не должна превышать  $0.6n_{\max}$ . Для автобусов большого

класса эти рекомендации практически недостижимы ввиду относительно небольшой энерговооруженности. Это в большей мере проявляется при движении на затяжных подъемах или ускорениях при скорости выше 60 км/ч.

В испытательных магистральных циклах остановки автобусов не предусмотрены, однако для них характерны участки движения с замедлением. Если частота принудительного вращения двигателя при этом превышает установленное значение, в расчетах учитывается переход системы питания ДВС на режим принудительного холостого хода. При моделировании движения автобуса на нейтральной передаче работа двигателя рассматривается в режиме холостого хода, поскольку остановка ДВС опасна с позиции снижения эффективности систем рулевого и тормозного управления. Частота вращения коленчатого вала при этом поддерживается несколько выше минимальной устойчивой. Вследствие этого, в расчетные уравнения движения автобуса вводятся зависимости для расхода топлива на режимах холостого хода. Время переключения передач принято 2 с.

В качестве оптимизируемых величин разработанные программы дополнительно позволяют выделить следующие параметры движения.

1. Минимальное время прохождения автобусом суммарного отрезка пути ездового цикла (4 000 м), что соответствует прохождению цикла с максимально возможной средней скоростью. При таком движении работа двигателя сопряжена с максимальными нагрузками, коэффициент использования мощности достигает единицы ( $k = 1$ ). Второй характерной особенностью такого режима является также возрастание на отдельных участках частоты вращения двигателя до номинальной. Общий расход топлива за цикл в этом случае значителен, ресурс двигателя снижается. Вследствие этих причин такой режим не может быть рекомендован для длительной эксплуатации автобусов.

2. Минимальный средний путевой расход топлива за весь ездовой цикл. Это соответствует прохождению всех фиксированных стандартом отрезков цикла с минимальным расходом топлива по участкам. При движении на таком режиме двигатель работает при  $k = 0,6 \dots 0,8$ , что примерно соответствует минимальному удельному расходу топлива. Водителю в процессе движения поддерживать такой режим затруднительно, однако современные системы управления принципиально позволяют это осуществлять.

Для обоих приведенных вариантов можно рассматривать и сравнительно сложные законы изменения параметров движения в процессе прохождения цикла на дороге. Так, например, можно рассматривать движение на участках разгона автобуса с ограничениями по значениям продольных ускорений, а также с переменными значениями этих ускорений на участках разгона в цикле. Такие исследования в настоящее время ведутся, однако задачи оптимизации в этом случае существенно усложняются.

К другим вариантам следует отнести комплексы режимов, обеспечивающих нахождение экстремального значения «комплексного» параметра. К таковому, в качестве примера, можно отнести и комбинацию их ранее рассмотренных показателей, а именно: пару «средняя скорость – расход топлива» с соответствующими «весовыми» коэффициентами.

## Результаты исследований для автобусов класса II

Исследования режимов движения автобусов НЕФАЗ-5299-11-33 с КП КамАЗ-144, задним мостом Raba с передаточным числом (ПЧ) 4,3, а также с двигателем КамАЗ-740.62-280 мощностью 206 кВт показали, что мощности такой силовой установки недостаточно для движения АТС с полной массой (16 900 кг) со строгим соблюдением отрезков пути магистрального цикла для автобусов II класса (рис. 1). Определено, что все требования цикла в полном объеме обеспечиваются лишь при массе автобуса 14 120 кг. Расчетная максимальная скорость при этом не превышает 80 км/ч. Этого явно недостаточно. Практически такие автобусы могут использоваться только с целью перевозки детей, где скорость ограничена величиной 60 км/ч. Замена КП на этом же автобусе на модель КамАЗ-141 с тем же двигателем и

задним мостом Raba с ПЧ 5.11 дает возможность расширить возможности АТС при работе на пригородных маршрутах – максимальная скорость повышается до 90 км/ч, что соответствует паспортным данным. При такой конфигурации силовой установки обеспечивается выполнение всех требований магистрального цикла для автобусов класса II. Соответствующие результаты расчетов и оптимизации параметров движения в магистральном цикле для этого автобуса приведены на рис. 3а.

Установлено, что оптимизацию целесообразно осуществлять по минимальному путевому расходу топлива. Преимущества такой оптимизации для автобусов категории М<sub>3</sub> класса II проявляются более отчетливо, чем, например, для грузовых автомобилей. Такой вывод следует из сравнения с результатом оптимизации по минимальному времени прохождения цикла, как это следует из графиков (рис. 3а). Уменьшение путевого расхода топлива (при оптимизации именно по этому расходу) весьма существенно и составляет от 9,5 % до 11 % в зависимости от загрузки автобуса. Средняя скорость движения в цикле при этом снижается незначительно – на 2,5-4 %.

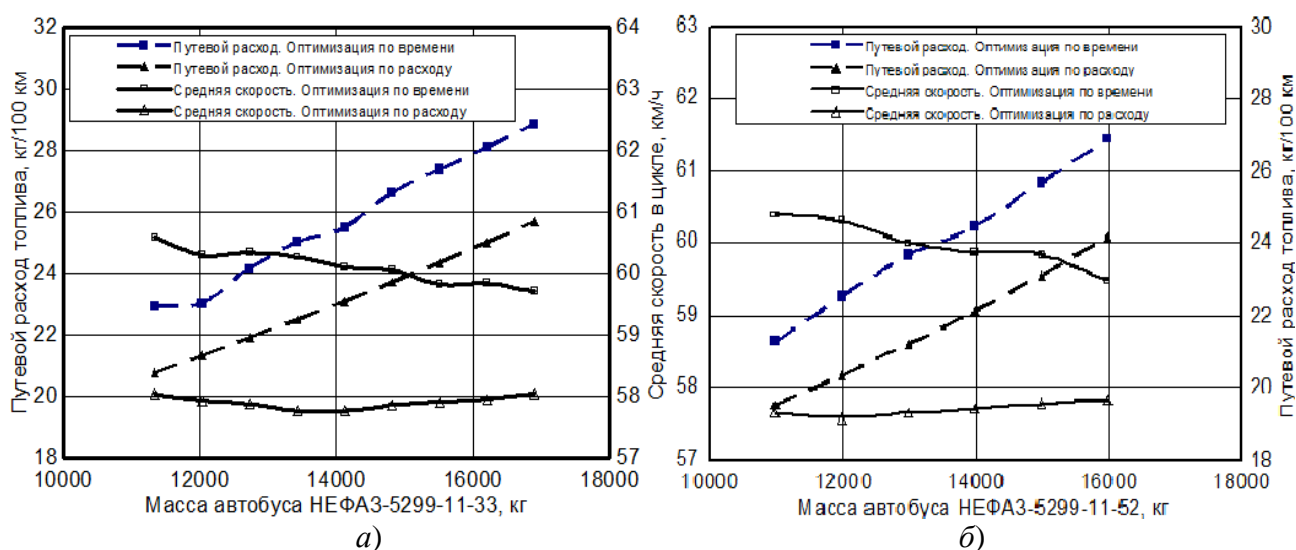


Рис. 3. Путевой расход топлива и средняя скорость автобусов категории М<sub>3</sub> II класса при движении в условиях магистрального ЕЦ:

- а) НЕФАЗ-5299-11-33 с двигателем мощностью 206 кВт;
- б) НЕФАЗ-5299-11-52 с двигателем Cummins ISB6.7e4 250В мощностью 175 кВт

Fig. 3. Driving fuel consumption and average speed of buses category M<sub>3</sub> class II while driving in conditions of a motorway driving cycle:

- a) NEFAZ-5299-11-33 with a 206 kW engine;
- b) NEFAZ-5299-11-52 with a 175 kW Cummins engine ISB6.7e4 250B

Аналогичный комплекс исследований проведен для пригородного автобуса НЕФАЗ-5599-11-52 с КП ZF 6S 1310BO, задним мостом Raba с ПЧ 4.3 и двигателем Cummins ISB6.7e4 250В мощностью 175 кВт. Расчеты показали, что мощности этого двигателя также недостаточно для движения автобуса с полной массой (17 900 кг) в магистральном цикле при соблюдении всех длин отрезков пути. Вычисления позволили установить, что все требования ЕЦ в полном объеме обеспечиваются лишь при массе АТС до 16 000 кг. В то же время следует отметить, что максимальная расчетная скорость автобуса с указанной трансмиссией благодаря использованию 6-й передачи составляет 113 км/ч, что соответствует паспортным данным. На рис. 3б представлены графики изменений путевого расхода топлива и средней скорости прохождения магистрального цикла в зависимости от массы этого автобуса.

Снижение путевого расхода топлива при оптимизации составляет от 8,5-10 % в зависимости от массы автобуса (рис. 3б). Средняя скорость движения в ЕЦ при этом уменьшает-

ся также на 2,5-4,5 %. Расчеты показали, что при применении двигателя *Cummins ISB6.7e4* 270В мощностью 188 кВт становится возможным соблюдение всех требований по динамике в магистральном цикле для автобусов класса II.

### Исследования для автобусов класса III

Первая группа расчетов движения в цикле для автобусов дальнего следования выполнена для режимов движения автобуса НЕФА3-5299-17-33 с КП КамАЗ-141, задним мостом *Raba* с ПЧ 5.117 и двигателем КамАЗ-740.62-280 мощностью 206 кВт. Результаты показали, что такой ДВС не обеспечивает движение автобуса в магистральном цикле для автобусов класса III даже со снаряженной массой 12 720 кг. На данный автобус для выполнения всех требований движения в ЕЦ с полной массой следует устанавливать двигатель с номинальной мощностью не менее 280 кВт, а для движения со снаряженной массой – не менее 221 кВт.

Таким образом, установлено, что современные междугородные автобусы большого класса НЕФА3-5299 обладают еще меньшей энерговооруженностью, чем пригородные, с точки зрения обеспечения движения их в магистральном цикле. Так, например, расчетная максимальная скорость автобуса НЕФА3-5299-17-33 с вышеприведенной трансмиссией составляет 91 км/ч, что соответствует паспортным данным, но явно недостаточно для уверенного выполнения разгонов в цикле до скорости 90 км/ч и длительного движения с этой скоростью. Сходные результаты получены при исследованиях движения автобусов НЕФА3-5299-37-52, оснащенных КП ZF 6S 1310BO, задним мостом *Raba* с ПЧ 4.3 и двигателем *Cummins ISB6.7e4* 250В мощностью 175 кВт. Для этой модели с полной массой 17 900 кг с целью обеспечения строгого выполнения ездового магистрального цикла требуемая номинальная мощность двигателя должна быть не менее 308 кВт. Достоинством данного силового агрегата является возможность движения автобуса с расчетной максимальной скоростью 113 км/ч.

Полученные результаты приводят к необходимости рассмотреть два пути в оценке топливной экономичности автобусов категории М<sub>3</sub> класса III.

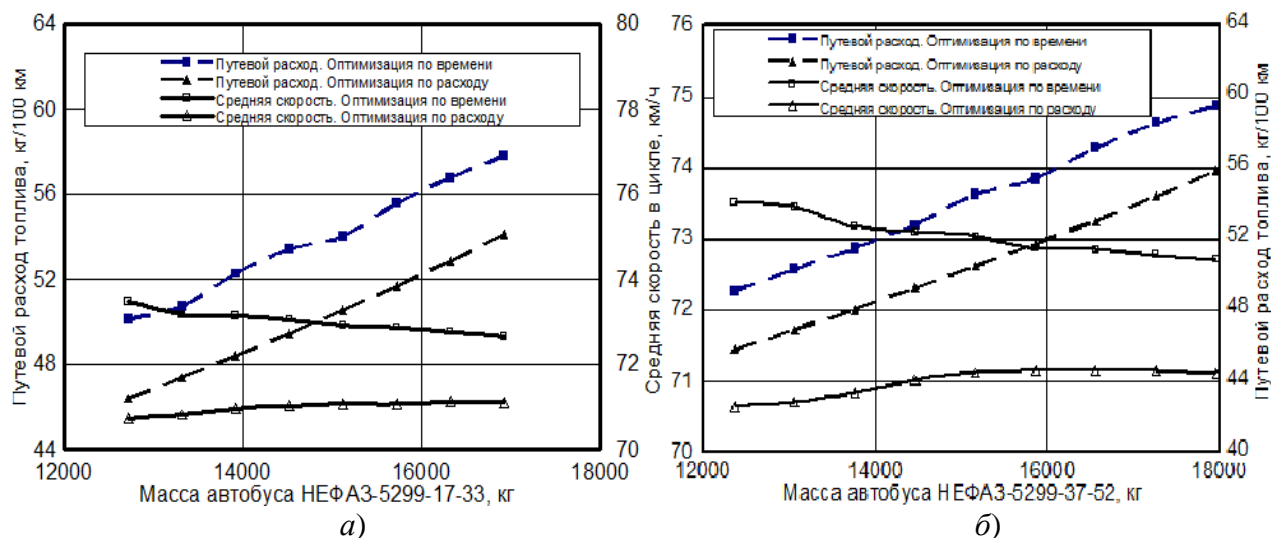
Первый путь предусматривает аналитическое вычисление минимального значения номинальной мощности ДВС, соответственно – выбор его трансмиссии, обеспечивающих строгое выполнение всех требований движения в стандартизованном магистральном цикле. Такая операция выполняется сравнительно простым путем, но полученный результат (требуемая номинальная мощность двигателя) может оказаться завышенным. Этот подход и позволил установить вышеуказанные мощности двигателей (280 кВт и 308 кВт) для исследуемых моделей автобусов.

Второй путь – метод модификации магистрального цикла на дороге для автобусов исследуемого класса. «Модифицированный магистральный цикл для автобусов» может быть предложен и для оценки топливной экономичности автобусов класса III. Для реализации такого цикла предлагается увеличить суммарную длину кинематически подобного магистрального цикла до 8 000 м. При этом остальные условия движения остаются неизменными, поскольку основные требования стандарта не нарушены. Это позволяет выполнить количественную оценку и провести сравнительный анализ параметров движения различных моделей автобусов. Операционная карта движения незначительно видоизменяется – длины отрезков пути удваиваются. На рис. 3.6 представлены графические зависимости путевого расхода топлива и средней скорости прохождения «модифицированного магистрального цикла для автобусов» в зависимости от массы автобуса НЕФА3-5299-17-33. Расчеты показали, что мощности двигателя и в этом случае недостаточно для движения с соблюдением всех параметров движения, она должна быть увеличена до 216 кВт.

Снижение путевого расхода топлива при оптимизации по этому расходу в таком цикле меньше, чем для пригородных моделей автобусов и составляет 6,5-7 %, а средняя скорость движения снижается при этом на 2-3,5 %. Для такого ездового цикла проявляется влияние



значительных (по своим длинам) участков движения с постоянными скоростями, что характерно для загородных дорог.



**Рис. 4. Путевой расход топлива и средняя скорость автобусов класса III при движении в модифицированном магистральном ездовом цикле:**  
 а) НЕФА3-5299-17-33 с двигателем мощностью 216 кВт;  
 б) НЕФА3-5299-37-52 с двигателем Cummins ISB6.7e4 250В мощностью 234 кВт

**Fig. 4. Driving fuel consumption and average speed of buses class III while driving in conditions of a modified motorway driving cycle:**  
 а) NEFAZ-5299-17-33 with a 216 kW engine;  
 б) NEFAZ-5299-37-52 with a 234 kW Cummins engine ISB6.7e4 250B

Аналогичные результаты получены для наиболее современного автобуса дальнего следования НЕФА3-5299-37-52. Его полная масса составляет 17 900 кг, что на 1 000 кг больше, чем у предыдущей модели. Поэтому расчетная требуемая мощность двигателя для этого автобуса выше и составляет уже 234 кВт. Результаты приведены на рис. 4б. Уменьшение путевого расхода топлива при оптимизации по путевому расходу в таком модифицированном магистральном цикле лежит в пределах 6-6,5 %, а средняя скорость движения в ЕЦ при этом снижается на 2-3,5 %.

### Выводы

1. Прогресс в развитии конструкций рассмотренных моделей автобусов ПАО «НЕФА3» позволяет констатировать, что в настоящее время существует возможность снизить их расход топлива в условиях магистрального ездового цикла в соответствии с ГОСТ Р 54810-2011. При этом существенный интерес представляет повышение энерговооруженности АТС, определяемой мощностью двигателя. Соответствующая оптимизация процессов движения нескольких вариантов комплектации автобусов классов II и III позволила выработать рекомендации для рационализации режимов их движения.

2. Определено, что пригородные автобусы модели НЕФА3-5299-11-33, оснащенные двигателями КамАЗ-740.62-280 и КП модели КамАЗ-144 не обеспечивают выполнение требований магистрального цикла для автобусов класса II категории М<sub>3</sub>. Их максимальная скорость движения составляет 80 км/ч. Автобусы НЕФА3-5299-11-33 с тем же двигателем и КП обеспечивают строгое выполнение требований магистрального цикла для автобусов класса III категории М<sub>3</sub> при массе до 16 000 кг. Междугородные автобусы НЕФА3-5299-17-33 и НЕФА3-5299-37-52 также не обеспечивают выполнение требований магистрального цикла

для автобусов класса III категории М3. Вследствие этого для сравнений параметров обосновано применение «модифицированного» магистрального цикла для автобусов класса III категории М3, составлена соответствующая карта параметров их движения по участкам такого цикла.

3. Подтвержден принцип оптимизации параметров движения в магистральных циклах для автобусов по минимальному путевому расходу топлива, в соответствии с которым для исследуемых моделей пригородных автобусов возможность уменьшения путевого расхода топлива составляет 8-10 % в сравнении с оптимизацией по средней скорости ездового цикла, а для междугородных автобусов – соответственно 6-7 %, что объясняется большей осредненной нагрузкой их двигателей в сравнении с двигателями пригородных автобусов.

4. Результаты работы могут быть применены в процессе рационального комплектования перспективных силовых агрегатов современных пригородных и междугородных автобусов большого класса, а также при конструировании и настройке трансмиссий с автоматическим управлением.

### Библиографический список

- 1 **Ларин, О.Н.** Организация пассажирских перевозок: учебное пособие / О.Н. Ларин. – Челябинск: Изд-во Южно-уральского государственного университета, 2005. – 104 с.
- 2 Российский рынок автобусов 2019. Первая дюжина / Режим доступа: <https://st-kt.ru/articles/rossiiskii-rynok-avtobusov-2019-pervaya-dyuzhina/>, свободный. – (дата обращения: 18.02.2020).
- 3 ГОСТ Р 54810-2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. – М.: Стандартиформ, 2012. – 23 с.
- 4 Грузовые автомобили и автобусы КАМАЗ / Режим доступа: [https://kamaz.ru/upload/printed\\_catalogs/new/katalog-kamaz-gruzovye-avtomobili-i-avtobusy-na-russkom-yazyke-2019.pdf](https://kamaz.ru/upload/printed_catalogs/new/katalog-kamaz-gruzovye-avtomobili-i-avtobusy-na-russkom-yazyke-2019.pdf) - (дата обращения: 18.12.2020).
- 5 **Горожанкин, С.А.** Оптимизация режимов работы силового агрегата автомобиля в городском цикле / С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. - Донецк 2019, №1. – С.73-78.
- 6 **Горожанкин, С.А.** Расчет тягово-скоростных и топливно-экономических свойств автомобилей в современных эксплуатационных условиях / С.А. Горожанкин, А.Д. Бумага, Н.В. Савенков. – Макеевка, 2019. -245 с.
- 7 **Бортницкий, И.П.** Тягово-скоростные качества автомобилей / И.П. Бортницкий, В.И. Задорожный. – Киев: Вища школа, 1978. – 176 с.

**Дата поступления  
в редакцию: 29.05.2021**

УДК 630.377

DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_99

## РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ КОЛЕСНОЙ ВАЛОЧНО-СУЧКОРЕЗНО-РАСКРЯЖЕВОЧНОЙ МАШИНЫ НА ОПРОКИДЫВАНИЕ

**В.Е. Клубничкин**ORCID: 0000-0002-1231-8185 e-mail: [vklubnichkin@gmail.com](mailto:vklubnichkin@gmail.com)Московский государственный технический университета им. Н.Э. Баумана  
*Москва, Россия***Е.Е. Клубничкин**ORCID: 0000-0002-4086-1011 e-mail: [klubnichkin@mgul.ac.ru](mailto:klubnichkin@mgul.ac.ru)Московский государственный технический университета им. Н.Э. Баумана  
*Москва, Россия***А.Б. Карташов**ORCID: 0000-0003-0160-6293 e-mail: [kartashov@bmstu.ru](mailto:kartashov@bmstu.ru)Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
*Москва, Россия***И.О. Наказной**ORCID: 0000-0001-5295-4031 e-mail: [nakaznoy@bmstu.ru](mailto:nakaznoy@bmstu.ru)Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
*Москва, Россия*

Представлен расчет устойчивости колесной валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины на опрокидывание. Приведены расчетные схемы, проанализированы предельные режимы работы по устойчивости на опрокидывание. Определены значения моментов манипулятора, не приводящих к опрокидыванию колесной валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины. Даны варианты компоновок машины для увеличения устойчивости к опрокидыванию. Полученные результаты могут быть использованы для эффективного проектирования и принятия мер, действительно расширяющих безопасный диапазон режимов работ валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин при выполнении технологических операций.

**Ключевые слова:** колесная валочно-сучкорезно-раскряжевочная машина, манипулятор, харвестерная головка, центр тяжести, устойчивость, опрокидывание, ведущий мост.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Клубничкин, В.Е. Расчет устойчивости колесной валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины на опрокидывание / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, А.Б. Карташов, И.О. Наказной // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №3. С. 99-106. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_99

## CALCULATING THE RESISTANCE AGAINST OVERTURNING OF A WHEELED FELLER-DELIMBER-SLASHER MACHINE

**V.E. Klubnichkin**ORCID: 0000-0002-1231-8185 e-mail: [vklubnichkin@gmail.com](mailto:vklubnichkin@gmail.com)Moscow State Technical University named after N.E. Bauman  
*Moscow, Russia*

**E.E. Klubnichkin**

ORCID: **0000-0002-4086-1011** e-mail: **klubnichkin@mgul.ac.ru**  
 Moscow State Technical University named after N.E. Bauman  
 Moscow, Russia

**A.B. Kartashov**

ORCID: **0000-0003-0160-6293** e-mail: **kartashov@bmstu.ru**  
 Moscow State Technical University named after N.E. Bauman  
 Moscow, Russia

**I.O. Nakaznoy**

ORCID: **0000-0001-5295-4031** e-mail: **nakaznoy@bmstu.ru**  
 Moscow State Technical University named after N.E. Bauman  
 Moscow, Russia

**Abstract.** The calculation of the resistance against overturning of a wheeled feller-delimber-slasher machine (FDSM) is presented. The calculation schemes are given and the ultimate operating conditions with resistance to overturning are analyzed. The values of manipulator moments are found, which do not result in overturning of the wheeled FDSM. Variants of machine layout are given to increase resistance against overturning. The results obtained can be used for effective design and for taking measures to actually extend the safe limits of FDSM functioning while executing technological operations.

**Key words:** wheeled feller-delimber-slasher machine, manipulator, harvester end, centre of gravity, resistance, overturning, driving axle.

**FOR CITATION:** V.E. Klubnichkin, E.E. Klubnichkin, A.B. Kartashov, I.O. Nakaznoy. Calculating the resistance against overturning of a wheeled feller-delimber-slasher machine. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. №3. Pp. 99-106. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_99

**Введение**

При неправильных режимах работы валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины (ВСПМ) на различных углах опорного основания и при разных положениях манипулятора есть вероятность потери устойчивости к опрокидыванию [1-6]. В данной работе проводится анализ предельных режимов работы по устойчивости на опрокидывание [7-10]. Расчетные схемы представлены на рис. 1 и 2.

При повороте манипулятора координаты центра тяжести манипулятора, харвестерной головки и груза относительно нулевого положения (манипулятор направлен вперед) будут изменяться согласно формулам (1-3):

$$x_{ci} = (x_{c0i} + x_1) \cdot \cos(\beta) - x_1, \quad (1)$$

$$y_{ci} = y_{c0i} + (x_{c0i} + x_1) \cdot \sin(\beta), \quad (2)$$

$$z_{ci} = z_{c0i}. \quad (3)$$

где  $x_{ci}$ ,  $y_{ci}$ ,  $z_{ci}$  – координаты центров тяжести подвижных элементов (манипулятор, харвестерная головка, груз) при различных значениях угла поворота манипулятора  $\beta$ ;  $x_{c0i}$ ,  $y_{c0i}$ ,  $z_{c0i}$  – координаты центров тяжести подвижных элементов при нулевом значении угла поворота манипулятора  $\beta$ ;  $x_1$  – координата  $x$  оси вращения манипулятора,  $x_1 = 1333$  мм;  $z_1$  – расстояние между центром моста и опорным основанием,  $z_1 = 768$  мм.

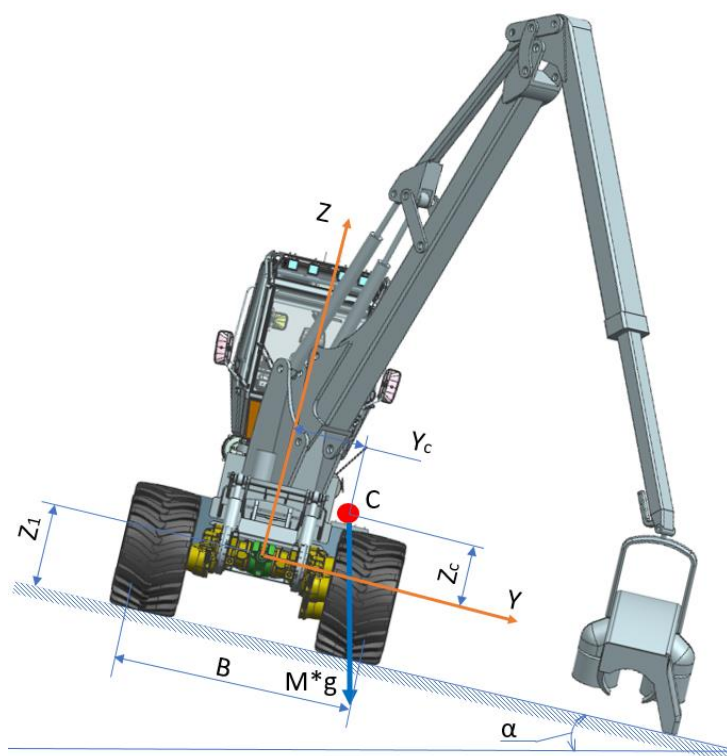


Рис. 1. Расчетная схема, вид спереди

Fig. 1. Calculation scheme, front view

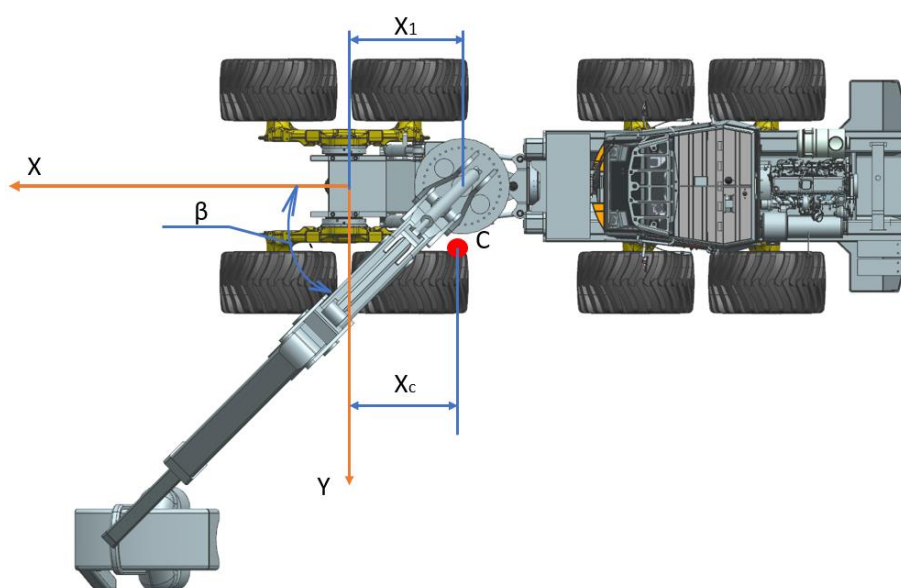


Рис. 2. Расчетная схема, вид сверху

Fig. 2. Calculation scheme, top view

### Расчет устойчивости колесной валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины

ВСРМ будет иметь устойчивое положение, когда будет соблюдаться неравенство (4):

$$y_c + (z_c + z_1) \cdot \tan \alpha \leq \frac{B}{2}, \quad (4)$$

где  $y_c, z_c$  – координаты центра тяжести всей ВСРМ,  $B$  – ширина опорного основания ( $B = 2482$  мм).

Коэффициент запаса по опрокидыванию (5):

$$k_{\text{опр}} = \frac{B}{2(y_c + (z_c + z_1) \cdot \tan \alpha)} \quad (5)$$

### Результаты расчетов

Результаты проведенных расчетов занесены в табл. 1 и 2.

Таблица 1.

#### Массовые характеристики при повороте манипулятора

Table 1.

#### Mass characteristics during manipulator swinging

Наименование весового комплекта (В. К.)	ВЕС (кгс)	Координаты Ц. Т. В. К.			
		OX см	OY см	OZ см	
Неподвижная часть ВСРМ (ВСРМ полной массы без учета манипулятора, головки и груза)					
ИТОГО	16 273	-262,93	0,00	28,09	
Подвижные части ВСРМ					
Манипулятор при:	3895	$\beta = -90^\circ$	-133	-274	323
		$\beta = -45^\circ$	61	-194	
		$\beta = 0^\circ$	128	0	
		$\beta = 45^\circ$	61	194	
		$\beta = 90^\circ$	-133	274	
Головка при:	1380	$\beta = -90^\circ$	-133	-400	40
		$\beta = -45^\circ$	150	-283	
		$\beta = 0^\circ$	267	0	
		$\beta = 45^\circ$	150	283	
		$\beta = 90^\circ$	-133	400	
Груз при:	4020	$\beta = -90^\circ$	-133	-400	30
		$\beta = -45^\circ$	150	-283	
		$\beta = 0^\circ$	267	0	
		$\beta = 45^\circ$	150	283	
		$\beta = 90^\circ$	-133	400	
Итого подвижные части при:	9295	$\beta = -90^\circ$	-133	-342.1	154,3
		$\beta = -45^\circ$	109	-241.9	
		$\beta = 0^\circ$	208	0	
		$\beta = 45^\circ$	109	241.9	
		$\beta = 90^\circ$	-133	342.1	
ВСРМ полной массы					
Итого ВСРМ полной массы при:	25 568	$\beta = -90^\circ$	-215,8	-126,3	73,96
		$\beta = -45^\circ$	-127,9	-87,9	
		$\beta = 0^\circ$	-91,4	0,00	
		$\beta = 45^\circ$	-127,9	89,3	
		$\beta = 90^\circ$	215,8	124,4	

Таблица 2.

Коэффициенты запаса по опрокидыванию,  $k_{опр}$ 

Table 2.

Turnover safety margins,  $k_{to}$ 

$\beta$ , град	$\alpha$ , град					
	0	5	10	15	20	25
-90	1	1,116	1,269	1,478	1,786	2,296
-45	1,411	1,66	2,023	2,611	3,754	7,041
0	$\infty$	9,408	4,668	3,072	2,262	1,765
45	1,411	1,277	1,084	0,967	0,869	0,784
90	1	0,902	0,822	0,753	0,692	0,638

Методом подбора определены значения моментов манипулятора, не приводящих к опрокидыванию ВСРМ (табл. 3). Светло-коричневым цветом указаны режимы, в которых стрелу можно выдвигать на максимальный вылет, красным – режимы, входящие в диапазон моментов, требуемых для движения манипулятора с головкой при всех значениях вылета стрелы 126...217 кНм), при которых при вылете стрелы до определенного значения произойдет переворот, темно-красным – режимы, при которых переворот произойдет в любом случае.

Таблица 3.

Максимальный реализуемый момент брутто манипулятора, не приводящий к опрокидыванию ВСРМ, Т брутто, кН·м

Table 3.

Maximum actual manipulator gross moment not resulting in FDSM overturning, T gross, kN·m

$\beta$ , град	$\alpha$ , град					
	0	5	10	15	20	25
-90	310	310	310	310	310	310
-45	310	310	310	310	310	310
0	310	310	310	310	310	310
45	310	310	310	287	214	145
90	310	262	214	175	134	92

По результатам расчетов видно, что работа манипулятора при его развороте на  $90^\circ$  в сторону уклона может привести к перевороту ВСРМ даже при минимальном уклоне. Также опасными являются случаи работы манипулятора при его развороте на  $45^\circ$  в сторону уклона при значении уклона от  $15^\circ$ . Для предотвращения опрокидывания необходимо ограничивать момент подъема манипулятора при указанных опасных режимах работы в соответствии со значениями, указанными в табл. 2. Для этого необходимо разработать конструктивные или организационные решения, определяющие недопустимые режимы работы: уклон, положение манипулятора, реализуемый момент (вылет, поднимаемый груз) [11-13].

### Возможные варианты увеличения устойчивости опрокидыванию

В данном разделе производится оценка возможности применения двух вариантов компоновок для увеличения устойчивости к опрокидыванию: 1) использование мостов более тяжелой серии НАФТАР 76 (применяемых в разрабатываемой погрузочно-транспортной машины (ПТМ)) и более широких колес с шинами размерностью 750/55B26.5 (прототип 2 в табл. 4); 2) использование более легкого манипулятора Mesera 240H, обладающего меньшим подъемным моментом (прототип 3 в табл. 4).

Таблица 4.

**Основные характеристики прототипов  
в зависимости от комплектации покупными агрегатами**

Table 4.

**Basic characteristics of prototypes depending on their completing with purchased units**

Характеристики прототипов			
Основные характеристики прототипов в зависимости от комплектации покупными агрегатами	Прототип 1 (основной вариант)	Прототип 2	Прототип 3
Количество колес	8	8	8
Максимальная мощность двигателя, кВт при об/мин		242 2 100	
Емкость топливного бака, л	400	400	400
Мосты	Тандемная тележка НАФТАР 75	Тандемная тележка НАФТАР 76	Тандемная тележка НАФТАР 75
Модель манипулятора	Kesla 1809H	Kesla 1809H	Mesera240H
Максимальный вынос стрелы, м	8,7	8,7	10
Максимальный крутящий момент подъема, кНм	310	310	240
Грузоподъемность на вылете 8м, кг	2700	2700	2250
Диапазон моментов, требуемых для движения манипулятора с головкой при всех значениях вылета стрелы, кНм	126..217	126..217	124..205
Угол наклона манипулятора вперед/назад/угол поворота	20°/20°/280°	20°/20°/280°	20°/20°/240°
Длина шасси, мм	7 890		7890
Ширина шасси, мм	2996	3150	2996
Колесная база, мм	4 080		4080
Максимальная скорость на передачах, км/ч	7/23	6,7/21	7/23
Дорожный просвет, мм	630	740	630

Использование комплектации прототипа 2 позволит увеличить опорную ширину ВСРМ, а также снаряженную массу, что повышает устойчивость к опрокидыванию. Кроме этого, применение одинаковых колес и мостов на разрабатываемых ВСРМ и ПТМ позволят полностью унифицировать полураму, на которой установлены силовой агрегат и кабина. Использование комплектации прототипа 3 позволит уменьшить опрокидывающий момент, тем самым уменьшит вероятность опрокидывания ВСРМ. Результаты расчета параметров устойчивости прототипа 2 представлены в табл. 5 и 6.

Таблица 5.

**Коэффициенты запаса по опрокидыванию прототипа 2,  $k_{опр}$**

Table 5.

**Turnover safety margins of prototype 2,  $k_{to}$**

$\beta$ , град	$\alpha$ , град					
	0	5	10	15	20	25
-90	1,143	1,288	1,479	1,746	2,154	2,868
-45	2,616	1,923	2,382	3,162	4,811	10,837
0	$\infty$	10,121	5,022	3,305	2,433	1,899
45	1,616	1,393	1,222	1,085	0,971	0,873
90	1,143	1,027	0,931	0,849	0,777	0,713



Таблица 6.

Максимальный реализуемый момент брутто манипулятора, не приводящий к опрокидыванию прототипа 2, T брутто, кН·м

Table 6.

Maximum actual manipulator gross moment not resulting in prototype 2 overturning, T gross, kN·m

β, град	α, град					
	0	5	10	15	20	25
-90	310	310	310	310	310	310
-45	310	310	310	310	310	310
0	310	310	310	310	310	310
45	310	310	310	310	287	208
90	310	310	272	224	178	131

Таблица 7.

Коэффициенты запаса по опрокидыванию прототипа 3, k<sub>т0</sub>

Table 7.

Turnover safety margins of prototype 3, k<sub>t0</sub>

β, град	α, град					
	0	5	10	15	20	25
-90	1.158	1.31	1.51	1.792	2.228	3.01
-45	1.638	1.958	2.441	3.276	5.104	12.597
0		10.037	4.98	3.277	2.413	1.883
45	1,638	1.408	1,223	1,092	0,976	0,876
90	1,158	1,039	0,94	0,856	0,783	0,717

Таблица 8.

Максимальный реализуемый момент брутто манипулятора, не приводящий к опрокидыванию прототипа 3, T брутто, кН·м

Table 8.

Maximum actual manipulator gross moment not resulting in prototype 3 overturning, T gross, kN·m

β, град	α, град					
	0	5	10	15	20	25
-90	240	240	240	240	240	240
-45	240	240	240	240	240	240
0	240	240	240	240	240	240
45	240	240	240	240	225	164
90	240	240	216	178	141	70

### Выводы

Предложенные меры действительно расширяют безопасный диапазон режимов работ ВСРМ. Однако имеются недостатки, из-за которых применение данных вариантов затруднительно. При варианте прототипа 2 (табл. 4) основным недостатком является увеличение снаряженной массы до значения 23 395 кг и ее превышение указанного в техническом задании значения (22 000 кг). Кроме этого, использование мостов более тяжелой серии и колес большей размерности ведет к удорожанию конструкции. Недостатком прототипа 3 (табл. 4) является низкое значение подъемного момента на безопасных режимах работы. Также комплект поставки манипуляторов компании Mesera не предусматривает возможности поставки ком-

плексного решения установки манипулятора, ротатора и харвестерной головки. При решении данной проблемы, возможно дальнейшее рассмотрение данного варианта.

В качестве основного принимается вариант на мостах серии *TAP75* и с использованием манипулятора *Kesla 1809H* (прототип 1).

*Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-2019-030 от 22 ноября 2019 г.*

### Библиографический список

1. **Лаптев, А.В.** Обоснование конфигурации и геометрических размеров рабочей зоны колесного харвестера / А.В. Лаптев, А.В. Матросов // Лесной вестник. 2018. Т. 22. № 5. С. 77-85.
2. **Макуев, В.А.** Переходный режим при повороте колесной шарнирно-сочлененной лесозаготовительной машины / В.А. Макуев, В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, А.В. Шняков // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2015. Т. 19. №1. С. 107-110.
3. **Чайка, О.Р.** Моделирование работы харвестера на выборочных рубках леса / О.Р. Чайка // Вестник Брянского государственного технического университета. 2017. № 2 (55).
4. **Karpachev, S.P.** Simulation modelling of the felling-bunching machine logging operation with the multiple-tree accumulating head / S.P. Karpachev, M A Bykovskiy // IOP Conference Series: Earth Environ. Sci. 2019. V. 226, 012021.
5. **Шегельман, И.Р.** Анализ показателей работы и оценка эффективности лесозаготовительных машин в различных природно-производственных условиях / И.Р. Шегельман, В.И. Скрыпник, А.В. Кузнецов // Ученые записки ПетрГУ. 2010. № 4. С. 66-75.
6. **Редкозубов, А.В.** Математическая модель поверхности движения лесных дорог / А.В. Редкозубов, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2014. – № 4 (106). – С. 348–352.
7. **Visser, R.** Expanding Ground-based Harvesting onto Steep Terrain: A Review / R. Visser, K. Stampfer // Croat. j. for. eng. – 2015. – V. 36. – P. 321–331.
8. **Klubnichkin, V.E.** Analysis of the developed hinged joint assembly of the wheeled harvester / V.E. Klubnichkin, E.E. Klubnichkin, A.V. Kartashov, K.V. Vasilyeva // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – V. 1086, 012007.
9. **Karpachev, S.P.** Simulation modelling of the multioperational felling-bunching machine / S.P. Karpachev, M A Bykovskiy // IOP Conference Series: Earth Environ. 2019. V. 316, 012018.
10. Комплексная Оценка Эффективности Технологий Лесосечных Работ (на примере конкретных природно-производственных условий) // LAP Lambert Academic Publishing. 2011 № 15
11. **Клубничкин, В.Е.** Краткий анализ тенденций развития лесозаготовительных машин / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, А.Б. Карташов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2020. № 3. С. 93-102.
12. **Stampfer, K.** Efficiency of mechanised steep terrain harvesting systems. / K. Stampfer. // COFE-CWF Conference, 2000. – P. 1-4.
13. Виды лесосечных работ, порядок и последовательность их проведения, Формы технологической карты лесосечных работ, Формы акта осмотра лесосеки и Порядка осмотра лесосеки [Приказ Минприроды России от 27.06.2016 N 367].

*Дата поступления  
в редакцию: 15.01.2021*

УДК 629. 336

DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_107

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КОЛЕБАНИЙ МАШИНЫ  
С ДВИЖИТЕЛЯМИ ТИПА «ШНЕК-РОТОР»****И.Г. Куклина**

ORCID: 0000-0002-2397-4604 e-mail: kuklina@rambler.ru

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет  
*Нижний Новгород, Россия***Д.С. Мокеров**

ORCID: 0000-0002-5747-5993 e-mail: mokerov90@bk.ru

Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина  
*Нижний Новгород, Россия*

Рассматривается задача математического моделирования процесса колебаний шнека-ротора в подшипниках при проведении натурных испытаний на моделях и в ходе построения математического описания колебательного и вибрационного взаимодействия движителя и опорных конструкций. Описаны основные математические зависимости и их применение при исследовании движения роторно-винтовой машины по пресеченной местности. Продемонстрированы программные комплексы, полученные при помощи универсального математического редактора *MathCAD*, 3D-модели шнека-ротора, полученные в инженерном процессоре визуализации *Inventor* и обработанные под воздействием усилий. С помощью метода конечных элементов доказана правильность полученных формулировочных концепций. Получены графики амплитудно-частотных и фазо-частотных колебательных характеристик, точно описывающих вибрационные нагружения на опоры шнека-ротора машины. В результате проведенных математических и экспериментальных исследований получены интервалы нахождения выраженных максимумов вертикальных виброускорений на промежутках от 1 до 2,5 Гц. Данные отличаются от аналогичных характеристик грузовых автомобилей при их перемещении по заснеженному бездорожью. Испытания проводились при помощи модельных образцов машин на снежном основании.

**Ключевые слова:** колебания, моделирование, шнек-ротор, заснеженное бездорожье, *MathCAD*, амплитудно-частотные характеристики.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Куклина, И.Г. Автоматизация исследований колебаний машины с движителями типа «шнек – ротор» / И.Г. Куклина, Д.С. Мокеров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 3. С. 107-116.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_107

**AUTOMATING INVESTIGATIONS IN THE VIBRATIONS OF A MACHINE  
WITH SCREW-ROTOR PROPULSION UNITS****I.G. Kuklina**

ORCID: 0000-0002-2397-4604 e-mail: kuklina@rambler.ru

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering  
*Nizhny Novgorod, Russia***D.S. Mokerov**

ORCID: 0000-0002-5747-5993 e-mail: mokerov90@bk.ru

Minin Nizhny Novgorod State Pedagogical University  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The problem of mathematical simulation of the process of vibration of a screw-rotor in bearings is considered while conducting full-scale tests on models and building the mathematical description of the oscillatory and vibrational interaction of the propulsion unit and supporting structures. The basic mathematical dependencies and their application for investigating the movement of a rotor-screw machine over a rugged terrain are described. Program complexes obtained using general-purpose mathematical editor *MathCAD* are demonstrated. The 3D models of the screw-

rotor obtained with the *Inventor* visualization engineering processor and processes under action of forces were demonstrated. The finite-element method was used to prove the correctness of the obtained statement concepts. The vibrational amplitude-frequency and phase response curves accurately describing the vibrational loads on the supports of the machine's screw-rotor were obtained. The mathematical research and experimental investigations yielded the intervals of pronounced maximums of vertical vibrational accelerations in the range of 1-2,5 Hz. The data differ from similar characteristics of motor trucks during their movement over snow-covered roadless terrain. Tests were conducted using model samples of machines on a mantle of snow.

**Key words:** vibrations, simulating, screw-rotor, snow-covered roadless terrain, *MathCAD*, amplitude-frequency response curves.

**FOR CITATION:** I.G. Kuklina, D.S. Mokerov. Automating investigations in the vibrations of a machine with screw-rotor propulsion units. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 3. Pp. 107-116.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_107

## Введение

Целью проведения расчета колебаний машины, имеющей движители-роторы, является расчет скоростей движения и определения длин неровностей, влияющих на неблагоприятные последствия работы оператора и пассажиров транспортного средства. Ученые и исследователи Нижегородского государственного технического университета им П.Е. Алексеева – разработчики машин повышенной проходимости – долгое время работают над определением сочетания оптимальных скоростей движения и размеров однородных неровностей бездорожья, наиболее неблагоприятных для появления пиковых значений виброускорений кузова транспортно-технологического средства, руководствуясь понятием подвижности как интегрального эксплуатационного свойства транспортно-технологических машин, определяют ее способность выполнять поставленную задачу с оптимальной результативностью [1-3].

Уникальность расчета колебаний роторно-винтовой машины заключается в том, что перемещения от воздействия опорного основания передней части ротора сразу же передаются на заднюю подвеску, а вибронагрузка – на оператора и пассажиров автотранспортного средства четко зависит от слаженной работы обеих подвесок и возможного уравнивания при наложении колебательных процессов [4-5]. Для наглядного представления влияния затухания колебательных процессов на скорость перемещения опоры ротора относительно кузова машины при вибронагрузках выводятся формульные зависимости колебательных процессов и по ним получают графические зависимости кривых затухания. Графические зависимости необходимы для получения оптимальных значений процесса затухания виброперемещений кузова. Выбрав необходимые характеристики упруго-вязкой подвески и получив коэффициент затухания колебательных процессов  $\psi = 0.15 \div 0.25$ , можно снизить величины колебаний кузова  $z \leq 200$  мм до относительно небольших значений  $z \leq 40$  мм практически за один-два периода. Если происходит увеличение параметров затухания, колебания снижаются медленнее [6]. *MathCAD* как высокоуровневая система автоматизированных математических расчетов позволяет не просто получить графическое отображение колебательных процессов, но и при правильном настроенном процессоре программирования *SmartMath* дает возможность получить математический аппарат динамики винтовых шнеков-роторов как движителей транспортно-технологических комплексов при перемещении по пресеченной местности.

## Теоретические исследования

Автоматизированный расчет колебательных процессов транспортно-технологического средства производится в системе унифицированных математических процессоров *MathCAD* и моделирует вибрационные нагрузки на агрегаты машины при перемещении машины с движителями шнеко-роторами по заснеженному бездорожью.

Допущения

При создании математического комплекса расчетов колебательных и вибрационных процессов были приняты следующие допущения:

- кузов и шнеки-роторы представляются в виде абсолютно жестких тел;
- сообщение кузова и движителей (шнеков-роторов) происходит через упруго-вязкую подвеску;
- трассой перемещения транспортно-технологического средства выступает заснеженное бездорожье (описано В.А. Шапкиным);
- налипание снега на шнеки-роторы отсутствует.

Основные уравнения в модели движения

Рассматривая наиболее общий случай, когда транспортно-технологическое средство оснащено амортизаторами, примем следующий вид уравнений движения (1) при координатах  $z_1$  и  $z_2$  и вид (2) при координатах  $z_0$  и  $\alpha$ . Расчетная схема для математического описания процесса колебаний отражена на рис. 1.

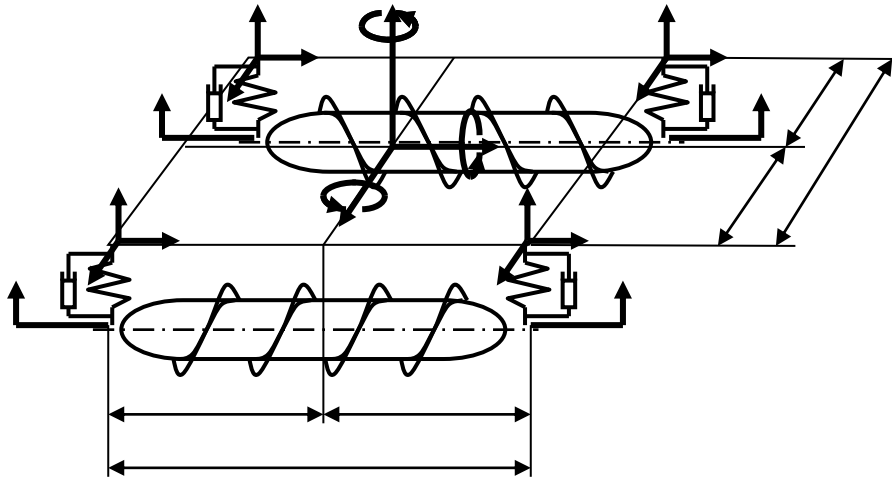


Рис. 1. Общий вид трехмассовой системы колебаний машины с движителями-шнеками

Fig. 1. General view of a three-mass system of vibrations of a machine with screw propulsion units

$$z_1 + \ddot{2}h_{10}z_1 + w_1^2z_1 + \mu_{a1}z_2 = 0; z_2 + 2h_{20}z_2 + w_2^2z_2 + \mu_{a2}z_1 = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} z_0 + 2h_{z0} + wz^2z_0 - \mu_{b1}\alpha - \mu_{b1}\alpha = 0; \\ \alpha + 2h_{\alpha0}\alpha + w_{\alpha}^2\alpha - \mu_{b2}z_0 - \mu_{b2}z_0 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

$h_{10} = \frac{k_1}{M_1}$ ;  $h_{10} = \frac{k_2}{M_2}$  – коэффициенты сопротивления передней и задней частей кузова.

При вертикальных и угловых колебаниях кузова транспортно-технологического средства коэффициенты сопротивления амортизаторов при условии, что  $k_1l_1 = k_2l_2$  и  $c_1l_1 = c_2l_2$  будут (3):

$$h_{z0} = \frac{k_1+k_2}{M}; h_{\alpha0} = \frac{k_1l_1^2 - k_2l_2^2}{Mp_2^2}, \quad (3)$$

а коэффициенты связи (4):

$$\mu_{\alpha1} = \frac{k_1l_1 - k_2l_2}{M_1} \text{ и } \mu_{b2} = \frac{k_1l_1 - k_2l_2}{M_2}. \quad (4)$$

Для получения характеристического уравнения колебательного процесса [7] принимается решение последних двух уравнений в виде  $Ae^{wt}$ . Получаем уравнения (5):

$$z_1 = A_1 e^{wt}; z_2 = A_2 e^{wt}. \tag{5}$$

Подставляя решения (5) в уравнение (2) и сокращая на общий множитель  $e^{wt}$ , получаем (6):

$$\begin{cases} A_1(w^2 + 2h_{10}w - w_1^2) + A_2\mu_{a1}w^2 = 0; \\ A_1\mu_{a2}w^2 + A_2(w^2 + 2h_{20}w + w_2^2) = 0. \end{cases} \tag{6}$$

Характеристическое уравнение в данном случае можно получить путем вывода из уравнений амплитуды  $A_1$  и  $A_2$  (7):

$$(1 - \mu_a^2)w^4 + 2(h_{10} + h_{20})w^3 + (w_1^2 + w_2^2 + 4h_{10}h_{20})w^2 + 2(h_{10}w_2^2 + h_{20}w_1^2)w + w_1^2w_2^2 = 0 \tag{7}$$

Решением представлены четыре комплексных корня уравнения с отрицательной вещественной частью (8):

$$\begin{cases} w_1 = -h_1 - iQ_1; w_3 = -h_1 - iQ_1; \\ w_2 = -h_1 - iQ_2; w_4 = -h_2 - iQ_1; \end{cases} \tag{8}$$

Введенные коэффициенты  $h_1$  и  $h_2$  – коэффициенты сопротивления;  $Q_1$  и  $Q_2$  – собственные частоты колебаний кузова.

Решение уравнений (8) представлено ниже (9):

$$\begin{cases} z_1 = z_{11}e^{-h_1t} \sin(Q_1t + \varphi_{11}) + z_{12}e^{-h_2t} \sin(Q_2t + \varphi_{12}); \\ z_2 = z_{11}e^{-h_1t} \sin(Q_1t + \varphi_{11}) + z_{12}e^{-h_2t} \sin(Q_2t + \varphi_{12}); \end{cases} \tag{9}$$

В классических расчетах колебательных процессов коэффициенты сопротивления рассматриваются с применением понятий о парциальных и связанных значениях [7]. Коэффициенты сопротивления из уравнений (3) приравниваются к  $h_{z0}$ ,  $h_{a0}$ , если система является связанной, то данные величины будут  $h_1$  и  $h_2$ . Относительное затухание будет характеризоваться парциальными значениями коэффициентов  $\varphi_{z0} = \frac{h_{z0}}{w_2}$  и  $\varphi_{a0} = \frac{h_{a0}}{w_a}$ . Коэффициенты для связанной системы примут вид  $\varphi_1 = \frac{h_1}{w_1}$  и  $\varphi_1 = \frac{h_2}{w_2}$ .

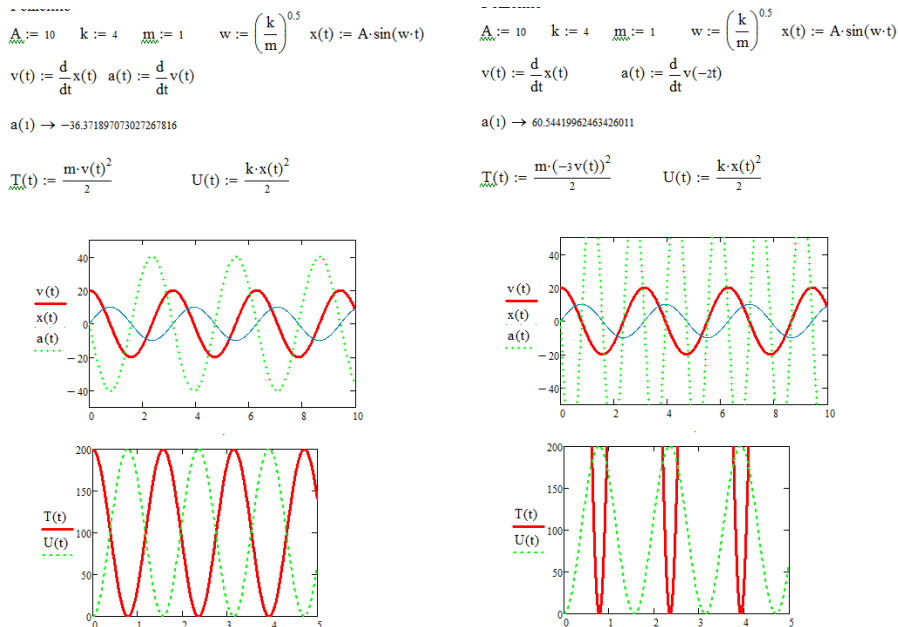


Рис. 2. Графическое решение перемещений и скоростей машины с движителями-шнеками

Fig. 2. Graphic solution of movements and speeds of a machine with screw propulsion units

Дисперсия выходной координаты колебательной системы, как правило, является основополагающей характеристикой для рассмотрения колебательной системы ротор-опора (10):

$$\bar{z}_i^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty S_{z_l}(\omega) d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty |W_{il}|^2 S_{Q_{c_j}}(\omega) d\omega, \quad (10)$$

где  $S_{z_l}(\omega)$  и  $S_{Q_{c_j}}$  – спектральные плотности выходной и входной координат;  $|W_{il}|^2$  – передаточная функция.

Рассчитывая подрессоренные системы шнеков-роторов используют численный метод определения среднего квадрата переменных, множители  $|W_{il}|^2$  и  $S_{Q_{c_j}}$  выражения при этом вычисляются отдельно, затем производится перемножение соответствующих значений.

Метод Лаплас-трансформации математического процессора *MathCAD* производит решение системы дифференциальных уравнений перемещений шнека-ротора, получает графическое решение и, выполняя энергетические расчеты, определяет характеристики измененных величин перемещений, скоростей и ускорений [9]. Реакции колебательной системы транспортно-технологического средства на внешнее воздействие однозначно определяются при помощи амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик, специальные операторные функции при этом пересчитываются для конкретных точек кузова машины.

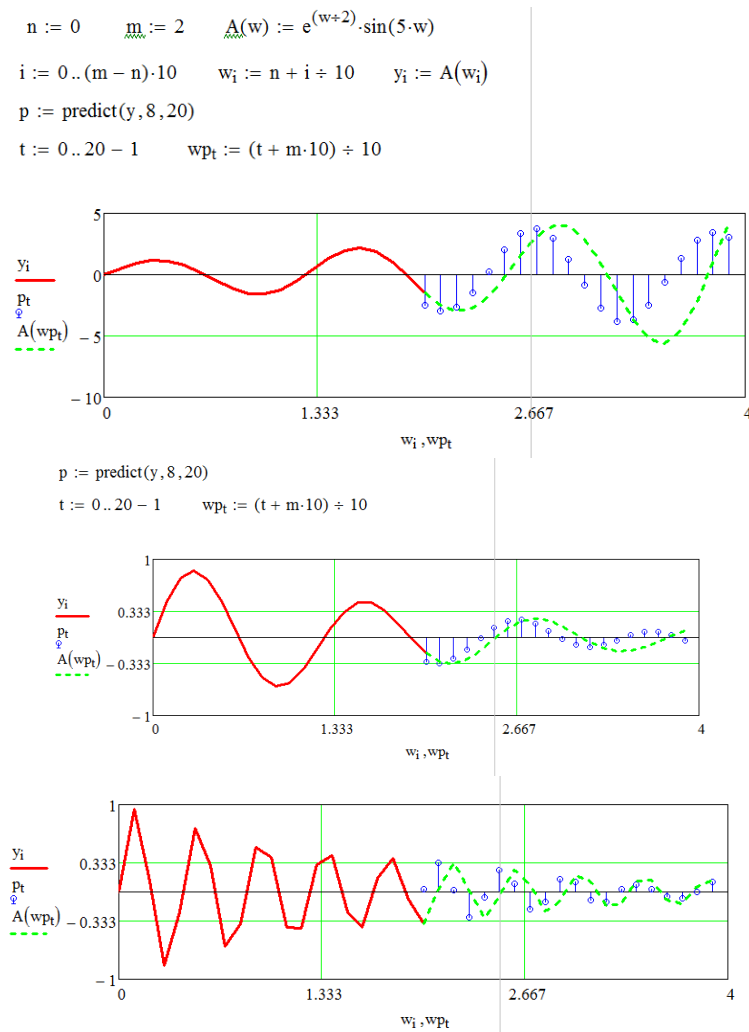


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики колебаний машины

Fig. 3. Amplitude-frequency response curves of machine vibrations

Качественный анализ спектральных характеристик, выполненный в математическом процессоре посредством программирования и позволивший получить графическое описание режимов работы упруго-вязкой подвески (рис. 3), позволяет без выполнения точных вычислений определить опасные режимы колебательных процессов. Интересен момент (первый график на рис. 3), когда происходит увеличение амплитуды колебаний, т.е. демонстрируется возможность выхода из строя амортизаторов подвески транспортно-технологического средства.

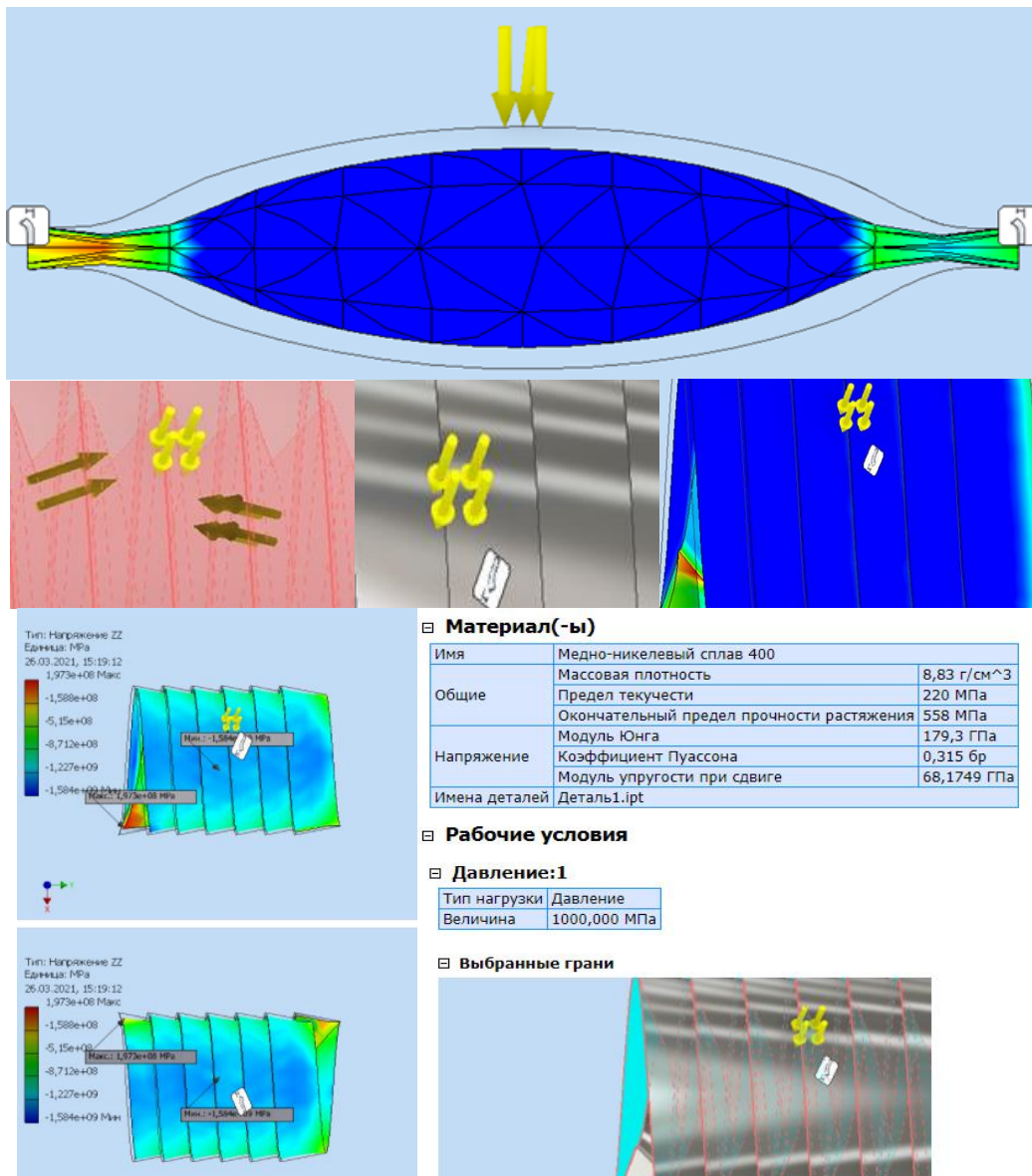


Рис. 4. Проведение автоматизированного эксперимента в Autodesk Inventor

Fig. 4. Automated experiment using Autodesk Inventor

После получения амплитудно-частотных характеристик производилось вычисление размеров напряжений в корпусе шнека-ротора производилось при помощи встроенного процессора Autodesk Inventor. Определения состояний напряжений в плоских шнеках-роторах и в элементах навивки на роторы производилось отдельно и в статическом режиме, что является достаточно серьезным допущением в инженерных расчетах [10]. В процессе общего анализа напряжений задаются пограничные условия, выясняются возможные допустимые напряжения при выбранном материале и определении опорных реакций на подшипниковых



узлах шнека-ротора. Менялись функциональные параметры автоматизированных расчетов: структурный статический и модальный анализ, адаптивные элементы, контролирующие точность результатов, ширина диапазона нагрузочных условий, изменение условий контакта движителя и опор, изменение геометрических характеристик самого шнека-ротора и вида навивки, типы сетки.

После проведения множественных автоматизированных экспериментов в программном продукте *Autodesk Inventor*, при которых рассматривались разные виды материалов выполнения движителя, проектная толщина оболочки шнека-ротора и величины подшипниковых узлов. После выбора материала просматривались и устанавливались (если это требовалось настройкой программного комплекса) величины «плотность», «предел текучести», «модуль Юнга» [11]. Отдельно проставлялся коэффициент Пуассона как к шнеку-ротору (имеющему расчетный коэффициент в каждом конкретном случае), так и к плоскости винтовой навивки. Полученный цифровой прототип расчетной модели шнека-ротора в значительной степени сокращает скорость расчетов и вывода формульных зависимостей расчета геометрических размеров движителей машины, оптимальных для снижения уровня колебательных процессов. Отдельно были заданы силовые нагрузки от контакта шнека-ротора и опорной поверхности в виде заснеженного бездорожья.

Особого рассмотрения требует процесс построения модели автоматизированного проектирования и моделирования работы шнека-ротора как тела вращения. Одно из допущений приведенных экспериментов – колебания в задней и передней подвесках происходят совершенно независимо друг от друга. Но именно угловые перемещения кузова в значительной степени зависят от неблагоприятного сдвига по фазе воздействий на начало и конец шнека-ротора. При решении задач, когда учитывается перемещение центра тяжести водителя (а это, практически, самый главный расчетный параметр) определяются величины колебаний определяющей точки кузова (их вертикальные  $\dot{z}_A$  и горизонтальные  $\dot{x}_A$  составляющие).

При исследовании, как правило, рассматриваются перемещения определенных точек кузова (часто это точки по периметру). Перемещения данных точек представляют собой продольное колебание с ускорением  $\dot{z}_0$ , а, так же, поворот вокруг осей с центростремительным ускорением  $\dot{\alpha}^2 R$  и касательным ускорением  $\dot{\alpha} R$ .

Программный комплекс *Autodesk Inventor* предоставляет великолепные возможности для непосредственного моделирования напряженного состояния материала шнека-ротора, которое учитывает ускорения точек кузова машины (11):

$$\dot{z}_A = \dot{z}_0 - \ddot{\alpha} l_c + \alpha^2 h_c; |\dot{x}_A| = \ddot{\alpha} h_c + \alpha^2 l_c. \quad (11)$$

В расчетах колебаний транспортно-технологического средства наиболее важны поперечные перемещения (рис. 1), получившие три степени свободы [12]. Положение масс вибрации кузова машины определяется угловыми координатами  $\beta$ ,  $\beta_{k1}$  и  $\beta_{k2}$ . Если  $\zeta_l$  и  $\zeta_n$  – вертикальные перемещения тяжести неподдрессоренной части  $\zeta = \frac{\zeta_l - \zeta_n}{2}$ , а поперечный угол наклона  $\beta_k = \frac{\zeta_l - \zeta_n}{2d}$ . Поперечные колебания шнеков-роторов можно описывать координатами  $\zeta$ ,  $\beta_k$  независимо от типа направляющего устройства подвески.

### Экспериментальные исследования

Предложенная концепция измерения виброперемещений элементов машин позволила:

- определить величину фазового сдвига между излученным и отраженным сигналами от кузова и движителя транспортно-технологического средства;
- исключить необходимость предварительной обработки поверхности исследуемого элемента машины;
- применить разработанный метод в исследовании параметров вибрации элементов строительных и дорожных машин.

Следующим этапом стало проведение непосредственно эксперимента с применением небольшой модели транспортно-технологического средства (роторно-винтовой машины).

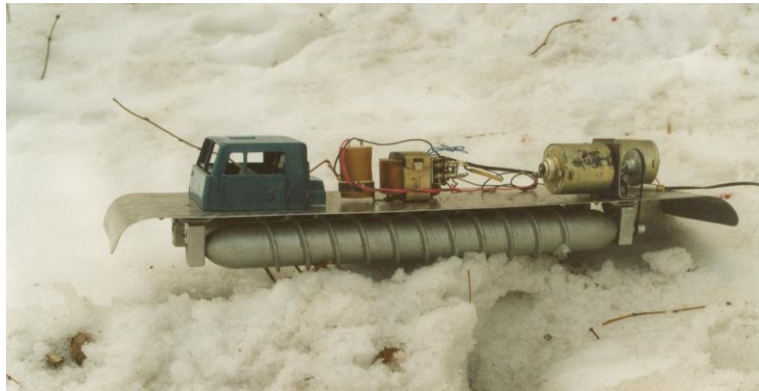


Рис. 5. Модель шнеко-роторной машины для проведения экспериментов

Fig. 5. Model of a screw-rotor machine for experiments

При проведении экспериментов учитывались все масштабные характеристики как самого транспортно-технологического средства, так и опорной снежной поверхности. Учитывая основные параметры, необходимые для расчетов вибрационных и колебательных нагрузок: геометрические размеры транспортно-технологического средства и скорости перемещения исследуемых точек кузова, выводятся пропорции для метрических параметров [14]. Изучается масштабная модель РВМ и машина РВМ ЛФМ-66, подобие которых возможно только если (12-13):

$$\omega_M \cdot T_M = \omega_H \cdot T_H; \frac{C_{PM} \cdot A_M}{Q_{CM}} = \frac{C_{PH} \cdot A_H}{Q_{CH}}; \frac{\omega_M \cdot A_M}{(\dot{z}_{max})_M} = \frac{\omega_H \cdot A_H}{(\dot{z}_{max})_H}, \quad (12)$$

$$\frac{\omega_M \cdot A_M}{(\dot{z}_{max})_M} = \frac{\omega_H \cdot A_H}{(\dot{z}_{max})_H} \rightarrow (\dot{z}_{max})_H = \frac{\omega_H \cdot A_H \cdot (\dot{z}_{max})_M}{\omega_M \cdot A_M}, \text{ а } \omega_H = \frac{\omega_M \cdot T_M}{T_H}. \quad (13)$$

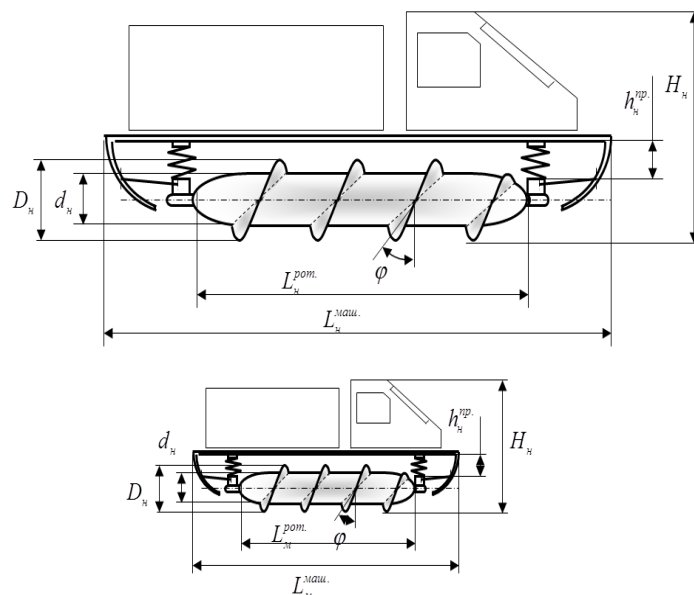


Рис. 6. Схема определения масштабируемых параметров шнеко-роторной машины

Fig. 6. Scheme for determining the scalable parameters of a screw-rotor machine

При перемещении машины в диапазоне скоростей  $x_{a1} = 1$  м и  $v_{a1} = 14 \frac{км}{ч}$ . появляется галопирование кузова транспортно-технологического средства, а если использовать в расчетах формулы, приведенные в табл. 1, можно понять, что галопирование и подбрасывание задней части машины происходит при наезде на небольшие неровности. Интенсивное галопирование второй фазы обусловлено наездом передней части шнека-ротора на неровность высотой до полуметра [15]. Можно сделать следующее заключение о склонности транспортно-технологического средства с двигателями-роторами к галопированию. Вибрационные перемещения кузова машины вокруг продольной оси транспортно-технологического средства происходят при подъеме шнека-ротора более чем на величину от 0,3 м на скорости 14 км/ч, далее вибрации уменьшаются. Существенные угловые перемещения чаще обусловлены наездом на неровности шнеков-роторов в противофазе (когда левый шнек поднимается, а правый опускается под воздействием опорной поверхности) в интервале скоростей 14-30 км/ч.

Таблица 1.

Величины длин неровностей и скоростей движения при галопировании

Table 1.

Magnitudes of lengths of irregularities and movement speeds during rocking

Зоны галопирования	Нижняя граница	Наибольшее значение	Верхняя граница
Первая ( $v = \Omega_1$ )			
Длина неровностей в м	$\dot{s}_{a2} = 3.04$	$s_{a2} = 4.17$	$\ddot{s}_{a2} = 6.66$
Скорость движения в км/ч	$\dot{v}_{a2} = 12.2$	$v_{a2} = 16.7$	$\ddot{v}_{a2} = 26.5$
Вторая ( $v = \Omega_2$ )			
Длина неровностей в м	$\dot{s}_{a2} = 1.68$	$s_{a2} = 2.54$	$\ddot{s}_{a2} = 4.70$
Скорость движения в км/ч	$\dot{v}_{a2} = 8.3$	$v_{a2} = 13.1$	$\ddot{v}_{a2} = 19.5$

Наиболее неблагоприятные в виде проявления колебаний и галопирования скорости перемещения машины в пределах 8-14 км/ч. При этих скоростях происходят наибольшие отклонения при построении кривой  $a(t)$ . Для  $v_a = 14 \div 18$  км/ч отклонения ускорений перемещений точек машины достигает максимума, длины неровностей опорной поверхности соответствующие указанному интервалу, составляют 1,5-2,0 м, т.е. наиболее встречающиеся снежные наносы на заснеженном бездорожье.

### Библиографический список

1. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения. Научно-техническое издание: монография / под общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Нижний Новгород: ТАЛИАМ, 2004. – 961 с.
2. **Барахтанов, Л.В.** Проходимость автомобиля / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.Н. Кравец. – Нижний Новгород: НГТУ, 1996. – 200 с.
3. **Beliakov, V.** Coastal monitoring of the Okhotsk Sea using an autonomous mobile robot/ V. Beliakov, [et al.] // Science of Tsunami Hazards, 2017, Vol. 36-1, P.1-12.
4. **Куклина, И.Г.** Вибронагруженность длинных винтовых роторов. – Saarbrücken: Издательство LAPLAMBERT Academic Publishing, 2013. – 137 с.
5. **Kuklina, I.G.** La Dinamica de terreno Maquinas / I.G. Kuklina // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – Vienna, Austria, 2014. – pp. 48-51.
6. **Тондл, А.** Автоколебания механических систем / А. Тондл. – М.: Мир, 1979. – 429 с.
7. **Gordeev, B.A., Okhulkov, S.N.** Reducing transient vibrations due to rotating shafts / B.A. Gordeev, S.N. Okhulkov // Russian Engineering Research, 2018. – Vol. 38 № 5. – pp. 335-342
8. **Кельзон, А. С.** Расчет и конструирование роторных машин / А.С. Кельзон, Ю.Н. Журавлев, Н.В. Январев. – Л., Машиностроение, 1977. – 288 с.

9. **Kramer, J.** Performance of the StreetMapper Mobile LiDAR Mapping System in «Real World» Projects» / J. Kramer, G. Hunter // Photogrammetric Week '07, 2007, P. 215-225.
10. **Kurkin, A.** Autonomous Mobile Robotic System for Environment Monitoring in a Coastal Zone / A. Kurkin [et al.] // Procedia Computer Science, 2017, Vol. 103, P. 459-465
11. **Агейкин, Я.С.** Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
12. **Kuklina, I.G.** Application of unified modeling language for solving engineering // Materials of the international scientific practical conference, Taraz, may 30-31, 2013 / publishing office «Development of applied mathematics». – Taraz, Kazakhstan, 2013. – pp. 84-94.
13. **Wübbold, F.** Application of an autonomous robot for the collection of nearshore topographic and hydrodynamic measurements / F. Wübbold [et al.] // Coastal Engineering Proceedings, 2015, 1. – P.53.
14. **Makarov, V.** Study of trafficability conditions of typical soils of coastal zones of sakhalin island (Russian Federation) / V. Makarov [et al.] // Paper presented at the 19th International and 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 2017.
15. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2013. №3(100). С. 145-175.

*Дата поступления  
в редакцию: 15.01.2021*

УДК 629.113(-87) + 625.72(575.3)

DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_117

**ОЦЕНКА СЕТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН****А.М. Умирзоков**ORCID: 0000-0002-9966-2359 e-mail: [ahmad.umirzokov@mail.ru](mailto:ahmad.umirzokov@mail.ru)

Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими

*Душанбе, Таджикистан***Н.Р. Гоибов**ORCID: 0000-0001-7100-2642 e-mail: [navruzgoibov93ttu@gmail.com](mailto:navruzgoibov93ttu@gmail.com)

Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими

*Душанбе, Таджикистан***С.С. Сайдуллозода**ORCID: 0000-0002-9663-2453 e-mail: [saivali.saidullo@mail.ru](mailto:saivali.saidullo@mail.ru)

Южно-Уральский государственный университет

*Челябинск, Россия***А.Л. Бердиев**ORCID: 0000-0002-8013-4716 e-mail: [alik8405@inbox.ru](mailto:alik8405@inbox.ru)

Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими

*Душанбе, Таджикистан*

Проведена оценка сети автомобильных дорог Таджикистана с точки зрения их расположения на различных высотах над уровнем моря (н. у. м.). Установлено, что около 85 % дорог общего пользования на территории республики относятся к горным, проложенным и функционирующим на высотах выше 500 м н. у. м. Из анализа итогового профиля автомобильных дорог общего пользования, находящихся в ведении Министерства транспорта Республики Таджикистан, следует, что около 40 % дорожной сети относятся к дорогам международного и республиканского значения, а остальная часть – дороги местного значения.

Изучены вопросы, связанные с плотностью расположения перевалов на территории Таджикистана и установлено распределение горных перевалов по высоте н. у. м. Выявлено, что при общем числе перевалов на территории республики, превышающем 200 ед., плотности их распределения составляют соответственно около 1,5 перевалов на 1000 км<sup>2</sup> и свыше 14 перевалов на каждые тысячи км автомобильных дорог общего пользования. Показатели плотности сети автомобильных дорог в целом в республике не очень высоки, а по плотности автомобильных дорог, функционирующих в суровых горных и высокогорных условиях Таджикистана, занимают одну из ведущих позиций не только в регионе, но и в мире. Представлена схема межрегионального и международного автомобильных сообщений республики Таджикистан, характеризующая особенности сети автомобильных дорог, отличающихся большой плотностью горных и высокогорных перевалов.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, сеть автодорог, транспортная коммуникация, система ВАДС, профиль дороги, эффективность, горные перевалы, рельеф, условия функционирования, высокогорье, высота н. у. м.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Умирзоков, А.М. Оценка сети автомобильных дорог республики Таджикистан / А.М. Умирзоков, Н.Р. Гоибов, С.С. Сайдуллозода, А.Л. Бердиев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. № 3. С. 117-124. DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_3\_117

**APPRAISAL OF THE ROAD NETWORK IN THE REPUBLIC OF TAJIKISTAN****A.M. Umirzokov**ORCID: **0000-0002-9966-2359** e-mail: **ahmad.umirzokov@mail.ru**Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi  
*Dushanbe, Tajikistan***N.R. Goibov**ORCID: **0000-0001-7100-2642** e-mail: **navruzgoibov93ttu@gmail.com**Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi  
*Dushanbe, Tajikistan***S.S. Saidullozoda**ORCID: **0000-0002-9663-2453** e-mail: **saivali.saidullo@mail.ru**South Ural State University (National Research University)  
*Chelyabinsk, Russia***A.L. Berdiev**ORCID: **0000-0002-8013-4716** e-mail: **alikh8405@inbox.ru**Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi  
*Dushanbe, Tajikistan*

**Abstract.** An appraisal of the Tajikistan road network by its location at different elevations above sea level (e.a.s.l.) was conducted. It was found that about 85 % of public roadways on the territory of the Republic of Tajikistan are mountain roads laid and operating at elevations higher than 500 m a.s.l. Analysis of the summary profile of public-access roads under the jurisdiction of the Ministry of Transport of the Republic of Tajikistan shows that about 40 % of the road network has an international and republican status, whereas the rest of the roads are local ones.

Problems related to the density of location of mountain passes in the territory of the Republic of Tajikistan were studied, and their distribution by e.a.s.l. was found. The total number of passes in the territory of the Republic of Tajikistan exceeded 200. The density of their distribution is about 1.5 passes per 1,000 km<sup>2</sup> and more than 14 passes on each 1,000 km of public roadways. The indicators of the road network density in the Republic of Tajikistan as a whole were found to be not very high. As regards the density of roads in the severe mountain and alpine conditions of the republic, the roads are one of the leaders not only in the region, but also in the world. A layout of inter-regional and international road service in the Republic of Tajikistan is given. It characterizes the road network features distinguished by a big density of mountain and alpine passes.

**Key words:** motor road, road network, transport communications, driver-car-road-environment (DCRE) system, road profile, effectiveness, mountain passes, relief, service conditions, alpine roads, elevation a.s.l.

**FOR CITATION:** A.M. Umirzokov, N.R. Goibov, S.S. Saidullozoda, A.L. Berdiev. Appraisal of the road network in the republic of Tajikistan. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2021. № 3. Pp. 117-124.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_2\_117

**Введение**

Эффективность использования автомобильных дорог зависит от совершенства организации транспортного процесса и свойств дороги, позволяющих поддерживать определенные значения параметров, характеризующие их способность выполнять требуемые функции. В процессе эксплуатации функциональные свойства автомобильной дороги постепенно ухудшаются из-за износа и разрушения дорожного полотна, и этот процесс усугубляется в сложных и суровых горных и высокогорных условиях.

Экономическое развитие горных территорий, связанное со строительством автомобильных дорог, мостов, горнопромышленных предприятий и других объектов, приводит к резкому увеличению техногенных нагрузок на окружающую среду и повышению опасности ее значительного негативного изменения [1].

Автомобильная дорога на горных регионах республики является практически единственным физическим объектом, обеспечивающим перемещение пассажиров, материальных, энергетических и прочих ресурсов. В горных условиях эффективное функционирование автомобильной дороги как элемент системы «Водитель – Автомобиль – Дорога – Среда» (ВАДС), сопряжены с определенными сложностями, а также с большими энергетическими, экономическими затратами и социальными издержками [2]. Сеть автомобильных дорог в стране в основном проходят вдоль горных рек и крутых склонов; на этих участках дорог не всегда имеются защитные ограждения. Зачастую они не защищены от лавин и заносов, оползней, камнепадов, льда и проседания, а также селей и селевых потоков. Если учесть также достаточно большую интенсивность движения и неоднородность состава транспортного потока, еще больше усугубляются и без того непростые условия эксплуатации.

Оценка и учет особенностей автомобильных дорог, характеризующихся сложной структурой сети с очень высокой плотностью горных и высокогорных перевалов, является одним из основополагающих принципов, определяющих эффективное функционирование системы ВАДС в горных условиях и способствующих развитию народного хозяйства страны в целом.

### Суть рассматриваемого вопроса

Дорожная сеть представляет собой замкнутую систему железных дорог, автомобильных и колонных путей, имеющих или оборудованных на определенном участке (полосе) местности. Уровень развития дорожной сети характеризуется плотностью, средней протяженностью дорог каждого типа в км на 100 км<sup>2</sup> площади. На территории Республики Таджикистан наиболее развитой и востребованной является сеть автомобильных дорог, проложенных на высоте от 300 (район Айвадж Хатлонской обл.) до 4 655 м (перевал Акбайтал, ГБАО) н.у.м. [2, 3]. Республика Таджикистан – наименьшее по площади государство в Средней Азии, общая сеть автомобильных дорог которого составляет около 32 тыс. км. Примерно 14 тыс. км из них входят в юрисдикцию Министерства транспорта Республики Таджикистан, а остальные 18 тыс. км – местные дороги, включающие сельские, промышленные подъездные, технологические, внутрихозяйственные, служебные и др. пути, в отношении которых министерство не обладает юрисдикцией.

Автомобильные дороги, эксплуатируемые в горных условиях республики, по сложности, вплотную приближаются к экстремальным и характеризуются довольно крутыми продольными уклонами (местами до 10 ... 12 %) протяженностью до 30 км и более, частыми поворотами, сложной геометрией и закруглениями малых радиусов, недостаточной ширины проезжей части и полотна дороги, недостаточной видимости (50 ... 100 м) на отдельных участках [4].

Плотность общей протяженности автомобильных дорог по республике на 1 000 км<sup>2</sup> составляет 194 км. Такой невысокий показатель (в 4-5 раза ниже, чем в Европе) объясняется сложным гористым рельефом страны, а недостаточное развитие дорожно-транспортной инфраструктуры создает дополнительные сложности для обеспечения эффективности функционирования системы ВАДС. Автомобильным транспортом в республике осуществляется более 85 % грузовых и пассажирских перевозок, железнодорожным транспортом – более 12 %, а воздушным – всего около 2 % [2]. Развитие дорожной сети республики ориентировано на скорейший выход из коммуникационного тупика и значительное повышение эффективности автомобильных сообщений с странами Центральной Азии, Российской Федерации и Восточной Европы, а также с Китайской Народной Республикой и Южной Азией [5, 6]. В последние годы правительство страны располагает достаточными возможностями для расширения сети автомобильных дорог с целью совершенствования и развития транспортной коммуникации.

Итоговый профиль автомобильных дорог общего пользования приведены в табл. 1.

Таблица 1.

**Итоговый профиль автомобильных дорог общего пользования, находящихся под юрисдикцией Министерства транспорта Республики Таджикистан**

Table 1.

**Summary profile of public-access roads under the jurisdiction of the Ministry of Transport of the Republic of Tajikistan**

Дорога	Протяженность	
	км	%
Местного значения	8719,1	61,4
Республиканского значения	2128,7	15,0
Международного значения	3350	23,6
Итого, дорожная сеть	14198	100

Плотность сети автомобильных дорог общего пользования в Республике Таджикистан (около 100 км / кв. км) находится на уровне Кыргызстана (95 км/км<sup>2</sup>) и Узбекистана (чуть выше 100 км/км<sup>2</sup>) [7, 8]. Несмотря на то, что это один из лучших показателей в Среднеазиатском регионе, в мире показатели несколько ниже нормативного значения (табл. 2).

Таблица 2.

**Плотность сети автомобильных дорог**

Table 2.

**Road network density**

№ п/п	Страна	Площадь	Население	Плотность автомобильных дорог			
				Дороги международного значения		Дороги общего пользования	
				км/тыс. км <sup>2</sup>	км/тыс. чел.	км/тыс. км <sup>2</sup>	км/тыс. чел.
1	Таджикистан	143100	8873669	23,41	0,38	99,2	1,6
2	Казахстан	2 717300	19091949	4,5	0,64	32,5	4,6
3	Кыргызстан	198500	5964897	21	0,70	94,8	3,2
4	Туркменистан	488100	5528627	4,5	0,4	49,2	4,3
5	Узбекистан	447400	30565411	13,2	0,19	100,2	1,5
6	Россия	17098242	141722205	-	-	53,1	6,4
7	Франция	640294	67848156	31,9	0,30	1606,20	15,2
8	Бельгия	30528	11720716	480,3	1,25	5044,90	13,1
9	США	9371175	332639102	10,6	0,30	698,5	19,7
10	Китай	9596961	1394015997	14,4	0,10	417,7	2,9

Тем не менее, для страны со сложным горным рельефом местности и суровыми условиями функционирования системы ВАДС это является немалым достижением. В условиях равнинного рельефа местности и низкогорья Республики (на высотах до 1000 м н. у. м.) расположены 35,5 % автомобильных дорог общего пользования (табл. 3). Эти дороги эксплуатируются наиболее интенсивно, обеспечивая при этом достаточно высокую эффективность функционирования системы ВАДС.



Несмотря на то, что показатели плотности сети автомобильных дорог в целом по стране не очень высокие, по плотности автомобильных дорог, функционирующих в суровых горных и высокогорных условиях (на высотах свыше 2000 м н. у. м.) Таджикистан занимает один из ведущих позиций не только в регионе, но и в мире.

Таблица 3.

**Распределение протяженности автомобильных дорог общего пользования по высотам н. у. м.**

Table 3.

**Distribution of public roadway mileage by e.a.s.l.**

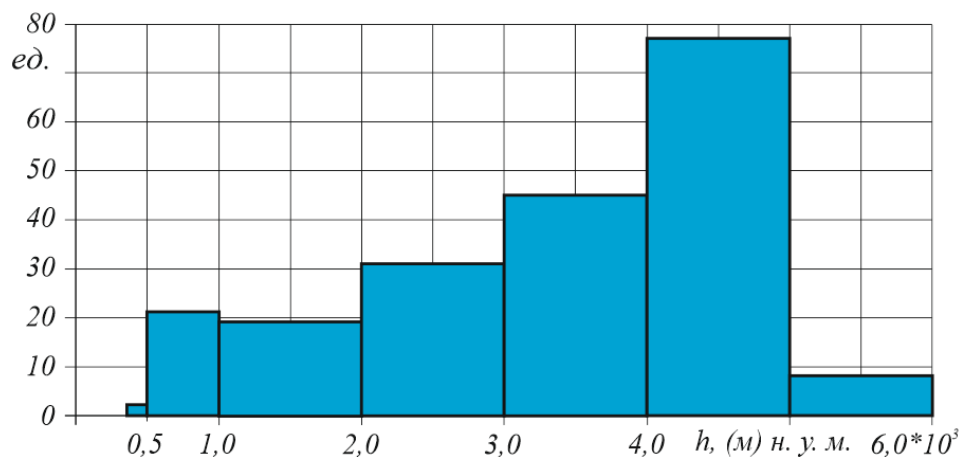
Значения дорог	Ед. изм.	Протяженность автомобильных дорог на высоте н. у. м.						Всего
		от 300 до 500 м	от 500 до 1000 м	от 1000 до 2000 м	от 2000 до 3000 м	от 3000 до 4000 м	от 4000 до 5000 м	
Международные	км	582	400	1394	197	496	237	3306
	%	4,1	2,8	9,8	1,4	3,5	1,7	23,3
Республиканские	км	506	484	500	487	118	-	2095
	%	3,6	3,4	3,5	3,4	0,8	-	14,7
Местные	км	1098	1970	2125	1560	952	1092	8797
	%	7,7	13,9	15,0	11,0	6,7	7,7	62,0
Всего автомобильных дорог общественного пользования	км	2186	2854	4019	2244	1566	1329	14198
	%	15,4	20,1	28,3	15,8	11,0	9,4	100

За последние годы Таджикистаном приобретены значительные достижения в сфере международного сотрудничества по развитию грузо- и пассажироперевозок, в частности, по развитию автомобильного транспорта, а также приобретен достаточный опыт в облегчении взаимного пересечения границ в ЕЭК ООН и ЭСКАТО ООН в рамках их совместной программы СПЕКА, в ЕврАзЭС, ЦАРЭС, ОБСЕ, МСАТ. В целях повышения эффективности функционирования сети автомобильных дорог осуществляется активное сотрудничество с международными финансовыми организациями, такими как Азиатский банк развития, Европейский банк реконструкции и развития, Исламский банк развития, Кувейтский фонд арабского экономического развития и Всемирный банк [9-10].

Республика Таджикистан граничит с Узбекистаном на западе и северо-западе, с Киргизией – на севере, с Китаем – на востоке, с Афганистаном – на юге. Со всеми соседними государствами имеются международные автомобильные сообщения. В настоящее время страна имеет автомобильные сообщения с Узбекистаном и Афганистаном по дорогам, расположенным на высотах от 300 до 1000 м н. у. м., а с Киргизией и Китаем – по высокогорным перевалам «Кызыл Арт» и «Кульма», расположенным соответственно на высотах 4 282 и 4 362 м н. у. м [9-12]. Республика административно подразделена на три области и района республиканского подчинения. Все эти административные единицы соединены между собой автомобильными дорогами через горные и высокогорные перевалы [13, 14].

Общее число перевалов на территории страны превышает 200 единиц, высоты которых н. у. м. варьируются в очень широком диапазоне. Самый низкий перевал на территории республики – Дандан – Шикан высотой 384 м, а самый высокий – перевал Ямг, высота которого достигает 5 376 м. Из общего количества перевалов около 20 % относятся к горным, а

остальное 80 % – высокогорные перевалы, в числе которых 8 – высокогорных, высота которых превышает 5 000 м (рис. 1). Особенностью условий функционирования в Таджикистане системы ВАДС, ограничивающей ее высокую эффективность. является структура сети автомобильных дорог с очень высокой плотностью горных и высокогорных перевалов (рис. 2) [14]. Столица Республики Душанбе со всеми регионами страны и соседними государствами, (как и все регионы республики между собой) имеет автомобильные сообщения, неизбежно проходящие через горные и высокогорные перевалы. Каждый из них своеобразен, с различной сложностью геометрии и качеством дорожного покрытия, которое усугубляется с суровостью дорожно-климатических условий функционирования системы ВАДС.



**Рис. 1. Распределение горных перевалов на территории Республики Таджикистан по высоте н. у. м.**

**Fig. 1. Distribution of mountain passes in the territory of the Republic of Tajikistan by e.a.s.l.**

Немаловажным фактором для сети горных автодорог является отсутствие или редкость объектов ремонтно-обслуживающих предприятий, медицинских пунктов и т.п. на достаточно больших расстояниях, что приводит к снижению оперативности обслуживания водителей, пассажиров, автомобилей и дорог. Конечно, построение развитой инфраструктуры на горных дорогах – непростая задача, не всегда экономически обоснованная. Несмотря на имеющиеся трудности, решение однозначно, способствует повышению эффективности функционирования системы ВАДС в горных условиях.

Из приведенного анализа следует, что Республика Таджикистан обладает сложной структурой дорожной сети. Всего чуть более 15 % автомобильных дорог общего пользования проложены на равнинных местностях, около половины – горные, и свыше 36 % – высокогорные, являющиеся причиной немалых препятствий в обеспечении эффективности функционирования системы ВАДС.

Все это выступает важным условием дальнейшего формирования состава автомобильного парка, ремонтно-обслуживающей инфраструктуры, строительства и обслуживания автомобильных дорог, а также обеспечения надежности элементов системы ВАДС.

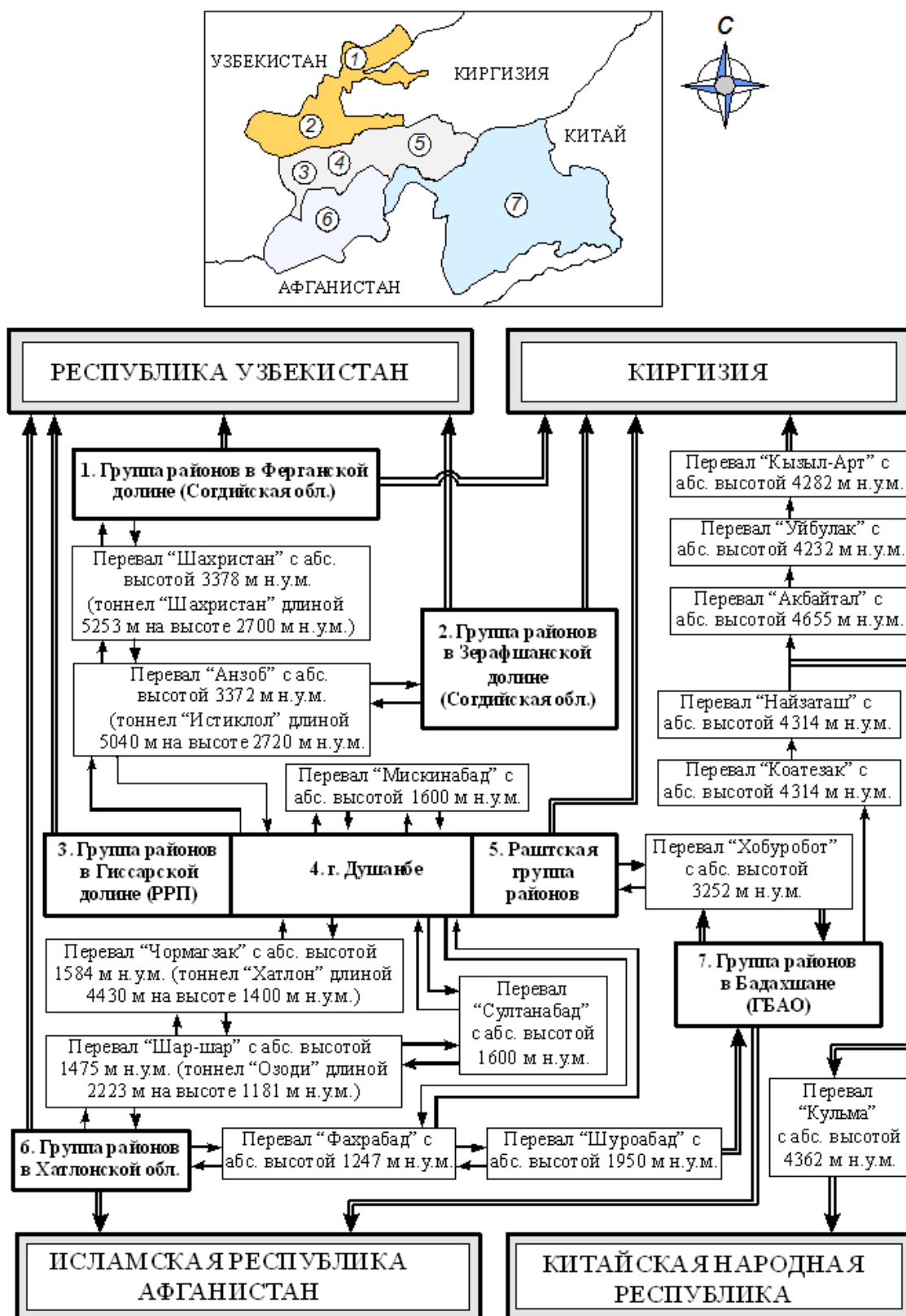


Рис. 2. Схема сети автомобильной коммуникации в Республике Таджикистан

Fig. 2. Layout of the motor vehicle road network in the Republic of Tajikistan

## Выводы

1. Распределение протяженности автомобильных дорог общего пользования по высотам над уровнем моря в республике Таджикистан характеризует сложность условий функционирования системы ВАДС и способствует уточнению нормативов энергетических, материальных, экономических и других удельных затрат на единицу транспортной работы.

2. Предлагается разработать методику комплексной качественной и количественной цифровой оценки характеристик автомобильных дорог и условий, способствующую наиболее эффективному функционированию системы ВАДС и оптимизации взаимодействия ее элементов в конкретных горных условиях.

## Библиографический список

1. **Мурадов, Х.Я.** О расчетных схемах для оценки устойчивости элементов системы «Склон-земляное полотно». МАДИ (ТУ) / Х.Я. Мурадов. – М.: Деп. в ЦБНТИ Инфотрансдор, сборник №12, 1998. – 16 с.
2. **Турсунов, А.А.** Управление работоспособностью автомобилей в горных условиях эксплуатации / А.А. Турсунов. – Душанбе: Ирфон, 2003. – 365 с.
3. **Умирзоков, А.М.** Оценка эффективности эксплуатации автомобилей в условиях высокогорья Республики Таджикистан / А.М. Умирзоков, А.А. Саибов, Б.Ж. Мажитов, А.Л. Бердиев, Ф.А. Турсунов / Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств: материалы XVIII Международная научно-практическая конференция 24-25 ноября 2016 г. – Владимир: Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Аркаим, 2016. – 336 с.
4. **Сафаров, Н.** Республика Таджикистан. Национальная стратегия и план действий по сохранению и рациональному использованию биоразнообразия / Н. Сафаров. – Душанбе, 2013. – 216 с.
5. Логистические процессы и морские магистрали II в Азербайджане, Армении, Грузии, Казахстане, Молдове, Таджикистане, Туркменистане, Узбекистане, Украине. Проект мастерплана «LOGMOS» – Приложение 5. Обзор автодорожного сектора. Проект, 2013. – 178 с.
6. Таджикиская ССР // Таджикиская Советская Энциклопедия. том 6 / Под ред. Асимова М. С. – Душанбе: Издательство Академии наук Таджикской ССР, 1984. – 406 с.
7. «Атлас Узбекской ССР, Киргизской ССР, Таджикской ССР, Туркменской ССР», Главное управление геодезии и картографии при Совете министров СССР, Москва, 1988 г.
8. **Glantz, M.** New Hominin Remains from Uzbekistan. / M. Glantz, B. Viola, P. Wrinn, T. Chikisheva, A. Derevianko, A. Krivoshekin, U. Islamov, R. Suleimanov, T. Ritzman // Journal of Human Evolution No 55 (2): 2008, pp. 223 – 237.
9. Государственная целевая программа развития транспортного комплекса Республики Таджикистан до 2025 года (Утверждена постановлением Правительства Республики Таджикистан от 1 апреля 2011 года №165). – г. Душанбе, 2011. – 40 с.
10. «Синяя книга» IRU Международного союза автомобильного транспорта (МСАТ) «Автомобильный транспорт Таджикистана 2008–2009». – Москва, 2009. – 163 с.
11. **Danko, D.M.** The digital chart of the world project // Proceedings of the Eleventh Annual ESRI User Conference. – Environmental Systems Research Institute, 1991. – Т. 1. – р. 169.
12. **Graser, A.** Processing: A python framework for the seamless integration of geoprocessing tools in QGIS / A. Graser, V. Olaya // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2015. Т. 4. №. 4. pp. 2219-2245.
13. **Умирзоков, А.М.** Структура среды эксплуатации системы ВАДС / А.М. Умирзоков, А.А. Саибов, К.Т. Мамбеталин, А.А. Гафаров, С.С. Сайдуллозода, А.А. Соибов, А.Х. Абаев, Ф.А. Гафаров / Вестник технологического университета Таджикистана Серия: Технология и химия. 2018. № 3 (34). С. 47-53.
14. **Сайдуллозода, С.С.** Функционирование системы водитель-автомобиль-дорога-среда в горных условиях Таджикистана / С.С. Сайдуллозода. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. 2019. С. 24-32.

*Дата поступления  
в редакцию: 11.04.2021*

## НАШИ АВТОРЫ

### ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

**Булатов Виталий Васильевич** – ведущий научный сотрудник Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, д. физ.-мат. наук, д. эк. наук, профессор;

**Володченкова Ксения Борисовна** – научный сотрудник Российского Федерального Ядерного Центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики;

**Галкин Владимир Михайлович** – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д. физ.-мат. наук;

**Гиниятуллин Роберт Равилевич** – научный сотрудник Российского Федерального Ядерного Центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики;

**Мазунова Лариса Николаевна** – старший преподаватель Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

**Пономарев Андрей Николаевич** – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, к. физ.-мат. наук

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

**Андреев Николай Геннадьевич** – начальник бюро радиационной безопасности Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;

**Анфимов Артём Михайлович** – начальник бюро отдела физических и теплогидравлических расчетов стационарных реакторных установок Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;

**Баранова Любовь Витальевна** – сотрудник Государственного регионального центра стандартизации, метрологии и испытаний в Нижегородской области;

**Боков Павел Андреевич** – доцент Нижегородского государственного технического университета им Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;

**Бокова Татьяна Александровна** – доцент Нижегородского государственного технического университета им Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;

**Вавилкин Владимир Николаевич** – главный специалист Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова, д. техн. наук;

**Волков Никита Сергеевич** – аспирант Нижегородского государственного технического университета им Р.Е. Алексеева;

**Кирилов Иван Николаевич** – инженер-конструктор отдела физических и теплогидравлических расчетов стационарных реакторных установок Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;

**Кузнецов Дмитрий Валерьевич** – инженер-конструктор отдела физических и теплогидравлических расчетов стационарных реакторных установок Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;

**Маров Александр Романович** – аспирант Нижегородского государственного технического университета им Р.Е. Алексеева;

**Рогожкин Сергей Александрович** – начальник отдела физических и теплогидравлических расчетов стационарных реакторных установок Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова, канд. техн. наук

## **МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО**

**Бердиев Алишер Лугмонович** – старший преподаватель Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими;

**Береснев Павел Олегович** – ведущий инженер Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

**Верещагин Сергей Борисович** – доцент Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ), канд. техн. наук;

**Гоибов Навруз Токушевич** – аспирант Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими;

**Горожанкин Сергей Андреевич** – профессор Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (г. Макеевка);

**Зарубин Дмитрий Николаевич** – инженер Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

**Карташов Александр Борисович** – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук;

**Клубничкин Владислав Евгеньевич** – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), канд. техн. наук;

**Клубничкин Евгений Евгеньевич** – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, (Мытищинский филиал), канд. техн. наук;

**Куклина Ирина Геннадьевна** – доцент Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, канд. техн. наук;

**Мишустов Владислав Павлович** – ведущий инженер Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

**Мокеров Дмитрий Сергеевич** – заведующий учебно-производственными мастерскими Нижегородского государственного педагогического университета им. К. Минина;

**Наказной Илья Олегович** – инженер Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана;

**Порубов Дмитрий Михайлович** – ведущий инженер Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева;

**Савенков Никита Владимирович** – заведующий кафедрой Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (г. Макеевка), канд. техн. наук, доцент;

**Сайдуллозода Сайвали Сайдулло** – аспирант Южно-Уральского государственного университета (г. Челябинск);

**Тюгин Дмитрий Юрьевич** – ведущий научный сотрудник Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;

**Умирзоков Ахмад Маллабоевич** – доцент Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими (г. Душанбе), канд. техн. наук;

**Филатов Валерий Игоревич** – ведущий инженер Регионального научно-образовательного центра транспортного машиностроения Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

## 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 главные результаты и выводы проведенного исследования, сферу их применения, методологию, новизну.
- 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 выполняются строго в редакторе MS Equation 3-12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается. Использованию аббревиатур должна предшествовать их расшифровка.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы: (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel. Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображения выполняются в формате jpg или tif с разрешением 300 dpi. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисовочная подпись 11 жирный кегль, ссылки на рисунки: (рис. 1).

**РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПРИНИМАЮТСЯ:**

**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**

**№ 3 (134)**

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: 16.08.2021. Дата выхода в свет 31.08.2021. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 7,00. Тираж 300 экз. Заказ .

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.  
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.**