

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

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

*Журнал издается с 2010 года*

**№ 2 (125)**

**Нижний Новгород 2019**

УДК 050(06)  
ББК 9я54  
Т 78

Т 78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2019. №2(125).  
– 232 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, В.В. Кондратьев, 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 (выпускающий редактор)

### **РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

**Председатель**

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

### **ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА**

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

### **Учредитель**

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, 2019

**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*

**№ 2 (125)**

**Nizhny Novgorod 2019**

*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, V.V. Kondratiev, 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 (Commissioning Editor)

## **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:  
III № ФС 77-56417*



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ .....</b>	<b>9</b>
<b>Андреев В.В., Тарасова Ю.С., Мартемьянова Е.А., Шаповал А.В., Чечин А.В.</b> Автоматизация профориентационного тестирования на основе ассоциативного цветового пространства .....	9
<b>Дмитриев С.М., Крутякова О.Л., Козелков А.С., Куркин А.А., Курулин В.В., Уткин Д.А.</b> Применение полуэмпирических моделей турбулентности для моделирования турбулентной конвекции .....	18
<b>Карпычев В. Ю.</b> Функциональная модель смарт-контракта на платформе Ethereum .....	34
<b>Лабутин Н.Г.</b> Анализ возможностей технологии блокчейн по защите от сетевых атак ...	41
<b>Лещева С.В., Юрова Н.В.</b> О классах сопряженности в группе ${}^3D_4(q)$ .....	53
<b>Пименов С.А.</b> Концепция построения алгоритмов оценки вероятности безотказной работы конструкций на основе линеаризации функции многих случайных аргументов ...	61
<b>Старостин Н.В., Небайкин С.В.</b> Аспекты использования алгоритма силовой укладки графа в промышленной технологии укладки кабелей в судостроении .....	70
<b>Тятюшкина Е.С.</b> Исследование параметров каверны на поверхности воды при падении тела .....	79
<b>Шамин Р.В., Чурсин Р.А., Шмелева А.Г., Галемина Е.А., Обыденнова С.Ю., Фролагина Е.В.</b> Оптимизация импульсных инвестиций наукоемких предприятий .....	89
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ .....</b>	<b>94</b>
<b>Аношкин Ю.И., Добров А.А., Кузьма М.М., Минеев И.В., Мулин М.М., Субарев М.А.</b> Разработка и обоснование экспериментального стенда ФТ-18 для исследования процессов смешения в моделях различной геометрии .....	94
<b>Десятников В.Е., Миронов Н.А., Пичков С.Н., Сидоров А.Ю.</b> Методический подход к определению усталостных характеристик конструкционных сталей в условиях многоциклового нагружения .....	105
<b>Кралин А.А., Крюков Е.В. Асабин А.А.</b> Принципы работы тиристорного регулятора величины и фазы вольтодобавочного напряжения для распределительных сетей .....	112
<b>Мартынюк М.В.</b> Решение задачи оперативного управления качеством напряжения потребителей .....	119
<b>Мордвинцев В.М., Кодочигов Н.Г., Сухарев Ю.П.</b> Исследование давления засыпки шаровых твэлов на блоки графитовых отражателей в активных зонах высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов .....	126
<b>Помысухина А.Е., Сухарев Ю.П., Власичев Г.Н.</b> Реактор на основе волны ядерного горения в U-Th топливном цикле .....	136
<b>Улюшкин А.В., Трехонин И.В.</b> Модернизация бесконтактного электродвигателя .....	148

<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>156</b>
<b>Беляков В.В., Палутин Ю.В., Тумасов А.В., Бутин Д.А., Трусов А.П.</b> Расчет углов поворота управляемых колес автомобиля с учетом увода .....	156
<b>Гончаров Р.Б., Зузов В.Н.</b> Особенности поиска оптимальных параметров усилителей задней части кабины грузового автомобиля на базе параметрической и топологической оптимизации с целью обеспечения требований по пассивной безопасности по международным правилам и получения ее минимальной массы .....	163
<b>Ерофеева Л.Н., Мазунова Л.Н.</b> Об одной модели возникновения колебаний в элементах автомобиля .....	171
<b>Марковнина А.И., Папунин А.В., Макаров В.С., Вахидов У.Ш.</b> Исследование влияния интеллектуальных систем помощи водителю на пропускную способность городских дорог и расчет экономического эффекта от внедрения .....	178
<b>Никандров И.С., Малыгин А.Л., Дунаев И.И., Кукушкин А.А., Пармонов В.В.</b> Построение математической модели силы резания снежно-ледовой массы .....	187
<b>Плотников С.А., Кантор П.Я., Зубакин А.С., Втюрина М.Н.</b> О некоторых особенностях работы двигателя на генераторном газе .....	192
<b>Порубов Д.М., Пинчин А.В., Тюгин Д.Ю., Тумасов А.В., Береснев П.О., Беляков В.В.</b> Разработка системы удержания в полосе движения для коммерческих транспортных средств .....	197
<b>Прохоров И.В., Бутарович Д.О., Рябов Д.М.</b> Исследование температурного поля воздуха обитаемых зон салона электробуса .....	205
<b>Торопов Е.И., Вашурин А.С., Тумасов А.В., Васильев А.А.</b> Верификация методики виртуально-физических исследований динамики криволинейного движения автомобилей по результатам дорожных испытаний .....	210
<b>Черевастов М.Г., Молев Ю.И.</b> Применение квадратичной интегральной оценки для исследования управляемости автомобиля, обладающего недостаточной поворачиваемостью .....	217
<b>НАШИ АВТОРЫ .....</b>	<b>224</b>

## CONTENTS

<b>INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS.....</b>	<b>9</b>
<b>Andreev V.V., Tarasova Y.S., Martemyanova E.A., Shapoval A.V., Chechin A.V.</b> The automatization of career guidance testing based on associative color space.....	9
<b>Dmitriev S.M., Krutyakova O.L., Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Kurulin V.V., Utkin D.A.</b> Application of semiempiric models of turbulence for modeling of turbulent convection.....	18
<b>Karpychev V.Y.</b> A functional model of smart contract on the ethereum platform.....	34
<b>Labutin N.G.</b> Analysis of opportunities of blockchain technology on protection against network attacks.....	41
<b>Leshcheva S.V., Yurova N.V.</b> On conjugacy classes of the group ${}^3D_4(q)$ .....	53
<b>Pimenov S.A.</b> The concept of building algorithms for assessment of reliability of designs on the basis of linearization of function of many random arguments.....	61
<b>Starostin N.V., Nebaikin S.V.</b> Aspects of using force-directed graph-drawing algorithm in industrial technology of cable installation in shipbuilding.....	70
<b>Tyatyushkina E.S.</b> Investigation of parameters of a cavity on water surface impacted by a fallen body.....	79
<b>Shamin R.V., Chursin R.A., Shmeleva A.G., Galemina E.A., Obydenнова S.Yu., Frolagina E.V.</b> Optimization of pulse investments high-tech enterprises.....	89
<b>ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES.....</b>	<b>94</b>
<b>Anoshkin Y.I., Dobrov A.A., Kuzma M.M., Mineev I.V., Mulin M.M., Subarev M.A.</b> Development and validation of experimental stand FT-18 to study processes of mixing in models of different geometry.....	94
<b>Desjatnikov V.E., Mironov N.A., Pichkov S.N., Sidorov A.J.</b> Methodical approach to determination of fatigue characteristics of construction steels in conditions of multicycle loading	105
<b>Kralin A.A., Kryukov E.V., Asabin A.A.</b> Operation principles of thyristor controller magnitude and phase of the booster voltage distribution networks.....	112
<b>Martynyuk M.V.</b> Calculation of the coefficients of regulating thyristor device for operational voltage management on the electric network section.....	119
<b>Mordvintsev V.M., Kodochigov N.G., Sukharev Yu.P.</b> Research of fuel pebbel bed pressure on blocks of graphite reflectors in active cores of high-temperature gas cooled reactors.....	126
<b>Pomysukhina A.E., Sukharev Yu.P., Vlasichev G.N.</b> Nuclear burning wave reactor in U-Th fuel cycle.....	136
<b>Ulyushkin A.V., Trekhonin I.V.</b> Modernization of the brushless electric motor.....	148

<b>MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION.....</b>	<b>156</b>
<b>Belyakov V.V., Palutin Y.V., Tumasov A.V., Butin D.A., Trusov A.P.</b> Calculation steering geometry of the car taking into account the slip angle tire.....	156
<b>Goncharov R.B., Zuzov V.N.</b> Special features of search of the optimum parameters of the amplifiers of a truck cabin rear part, based on parametric and topological optimization in order to ensure the requirements for passive safety according to international rules and to obtain its minimum mass.....	163
<b>Erofeeva L.N., Mazunova L.N.</b> One a model of the stimulation of the vibrations in automobile elements.....	171
<b>Markovkina A.I., Papunin A.V., Makarov V.S., Vahidov U.Sh.</b> studying the influence of intellectual systems aid to the driver on the passage of the urban roads and calculation of the economic effect from introduction.....	178
<b>Nikandrov I.S., Malygin A.L., Dunaev I.I., Kukushkin A.A., Paramonov V.V.</b> The construction of a mathematical model of the cutting force of the snow-ice mass.....	187
<b>Plotnikov S.A., Kantor P.Y., Zubakin A.S., Vtyurina M.N.</b> About some features of work of the engine on generating gas.....	192
<b>Porubov D.M., Pinchin A.V., Tyugin D.Y., Tumasov A.V., Beresnev P.O., Belyakov V.V.</b> The development of lane keeping assist system for commercial vehicle.....	197
<b>Prokhorov I.V., Butarovich D.O., Ryabov D.M.</b> Investigation of the air thermal field in passenger compartment of the electric bus.....	205
<b>Toropov E.I., Vashurin A.S., Tumasov A.V., Vasiliev A.A.</b> Verification of the virtual physical testing methodology of the vehicles dynamics by results of road tests.....	210
<b>Cherevastov M.G., Molev Yu.I.</b> Application of square integral evaluation for the study of the controllability of a car owned with insufficient turnability.....	217
<b>AUTHORS .....</b>	<b>224</b>

## ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 004.9

В.В. Андреев<sup>1</sup>, Ю.С. Тарасова<sup>2</sup>, Е.А. Мартемьянова<sup>2</sup>, А.В. Шаповал<sup>2</sup>, А.В. Чечин<sup>2</sup>

### АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОФОРИЕНТАЦИОННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АССОЦИАТИВНОГО ЦВЕТОВОГО ПРОСТРАНСТВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>  
Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет<sup>2</sup>

Целью работы является автоматизация методики профориентационного тестирования «Ассоциативное цветовое пространство» путем ее реализации в виде программного комплекса ColourUnique Pro. Данная методика включает измерение индивидуального стиля деятельности (ИСД), который самостоятельно или в совокупности с классическими методами профориентационной диагностики позволит получить уточненные и развернутые рекомендации для работодателей и реципиентов (соискателей).

Теоретическую основу исследования составляет пятилетний мониторинг реципиентов, прошедших профориентационное тестирование по методике «Ассоциативное цветовое пространство»: анализ, систематизация, формулировка рекомендаций и поиск корреляции с классическими методиками. Сформулированы предположения и предложены пути автоматизации методики профориентационного тестирования в виде программного комплекса ColourUnique Pro с использованием сетевых технологий, в том числе – организация многопользовательского тестирования и сбор результатов в единую базу данных (язык программирования – Python). Теоретическая основа исследования может быть использована для разработки алгоритмов программного комплекса ColourUnique Pro, в состав которого входит компьютерная программа ColourUnique M, позволяющая осуществлять автоматизированное заполнение тестовой формы и сбор данных пользователей (реципиентов).

*Ключевые слова:* профориентация, типы индивидов, квазипространство, алгоритмы, индивидуальный стиль деятельности, многопользовательское тестирование, база данных, генерация, компьютерная программа.

По итогам пятилетней апробации в рамках учебного процесса кафедры «Промышленный дизайн» Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, квазипространственная цветовая модель (рис. 1, а) доказала свою эффективность как средство диагностики индивидуального стиля деятельности (ИСД) студентов, выбирающих творческие направления будущей профессиональной деятельности (дизайнер, художник). Заполненные вручную тестовые формы анализировались программой Design Professional Analization (DPA), разработанной Е.А. Мартемьяновой при участии А.В. Шаповала, создателя программы «Классификатор» [1-3].

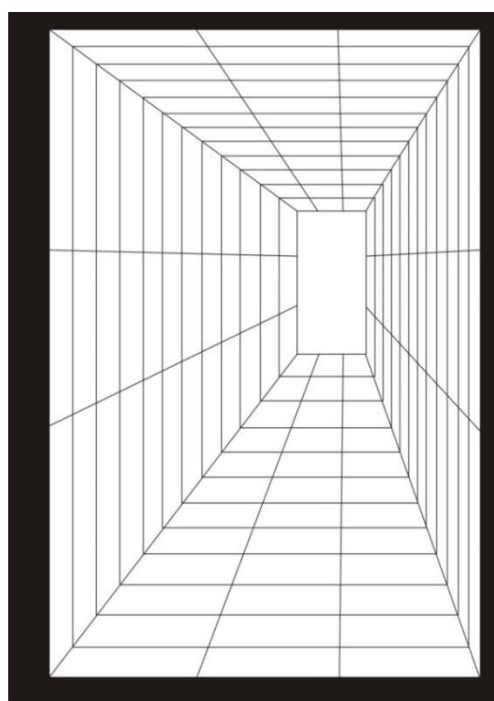
Программа DPA позволяет оценить показатели визуальной массы ( $\mu$ ), степени динамичности ( $\delta$ ) структуры и оценить визуальную массу ( $\mu$ ) для характерных цветовых сочетаний каждого типа индивида по ИСД. Визуальная масса ( $\mu$ ) рассчитывается по следующей формуле (1) [1-3]:

$$\mu = f(k; l; \lambda; \rho; \alpha; s; x; y) \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий особенности зрительного восприятия,  $l$  – периметр,  $\lambda$  – доминирующая длина волны в спектре,  $\rho$  – коэффициент отражения,  $\alpha$  – угол наклона

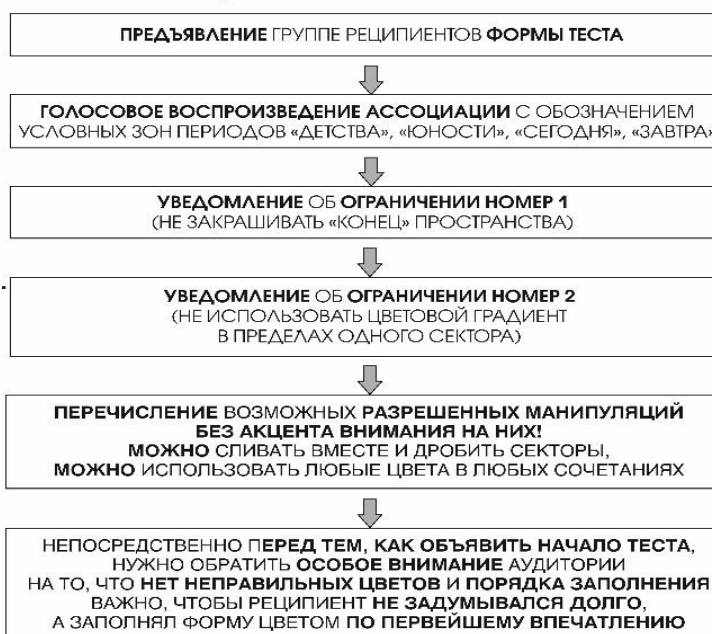
главной динамической оси элемента относительно принятых осей координат,  $s$  – площадь,  $x$ ,  $y$  – координаты пикселей изображения.

Подробный анализ эффективности методики тестирования «Ассоциативное цветовое пространство» представлен в работах Ю.С. Тарасовой, В.В. Андреева, Е.А. Мартемьяновой [4,5]. Квазипространственная модель внедрена в учебный процесс для осуществления профориентационного тестирования первокурсников направления подготовки 54.03.01 «Дизайн», профиль подготовки «Промышленный дизайн». Модель распечатывается на листе формата А4 в виде тестовых форм и предлагается реципиентам для заполнения красками. Готовые тестовые формы оцениваются специалистом и, в зависимости от характерных приемов работы с пространством, исходной структурой и цветом, реципиент относится к одному из пяти выведенных типов индивидов: «творец», «рационал», «скептик», «авангардист», «смешанный». Данные типы характеризуют индивидуальный стиль деятельности индивида (ИСД). Формы выраженных представителей пяти типов индивидов представлены на рис. 2.



а)

#### АЛГОРИТМ ПРОЦЕДУРЫ ТЕСТИРОВАНИЯ, ОСУЩЕСТВЛЯЕМОЙ ЧЕЛОВЕКОМ



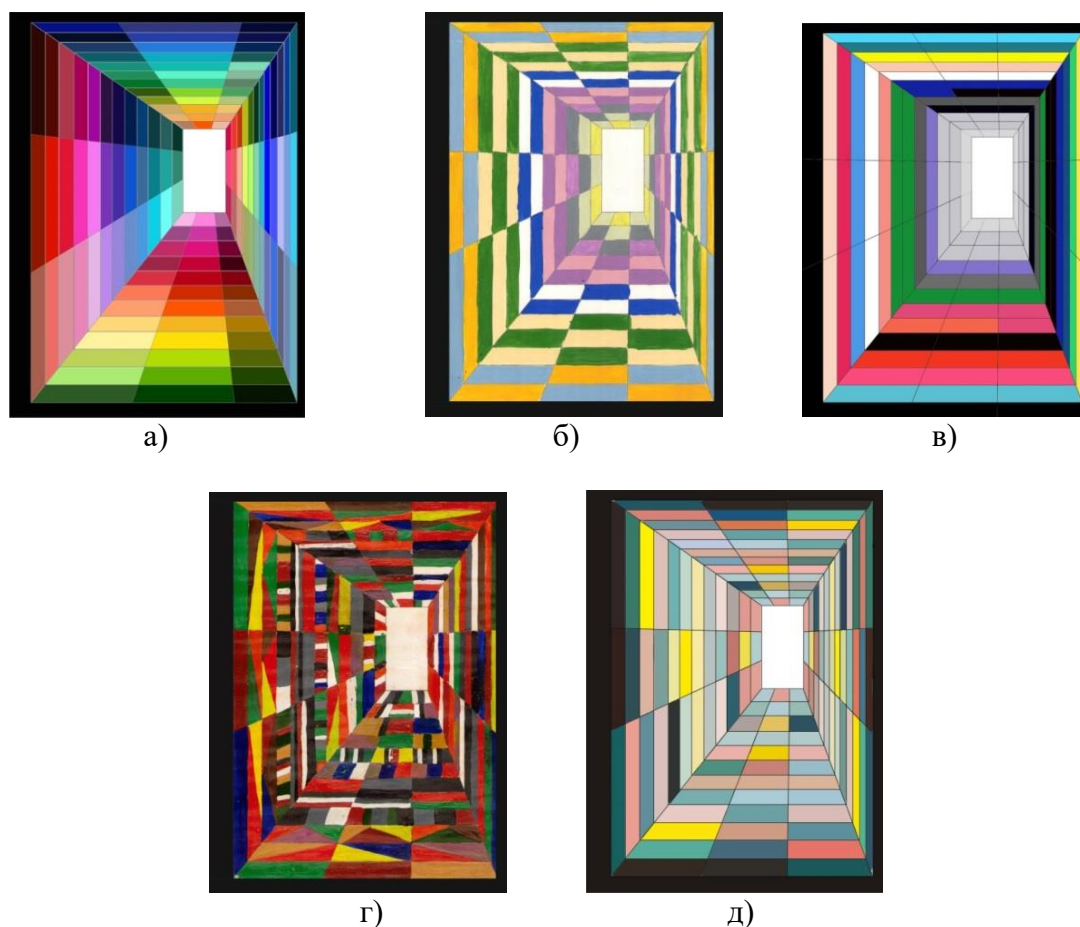
б)

#### Рис. 1. Алгоритм и форма ручного тестирования:

- а – тестовая форма в виде квазипространственной цветовой модели,  
б – алгоритм процедуры тестирования, осуществляемый при ручном заполнении формы и контролируемый человеком

Под индивидуальным стилем деятельности (ИСД) понимается система отличительных признаков деятельности конкретного человека, обусловленная его индивидуально-личностными особенностями. Среди проявлений ИСД следует отметить: устойчиво повторяющиеся приемы и способы деятельности, особенности временной организации труда, качественные особенности готового продукта. Внутрисубъективные особенности ИСД включают типичные для данного человека стратегии деятельности, особенности функционирования, обусловленные индивидуальными свойствами личности, присваивание компонентам деятельности разной степени значимости, уникальность форм сознательного контроля и

саморегуляции. ИСД выполняет функцию адаптации к условиям осуществления выбранного вида деятельности с учетом свойств индивидуальности человека [6].



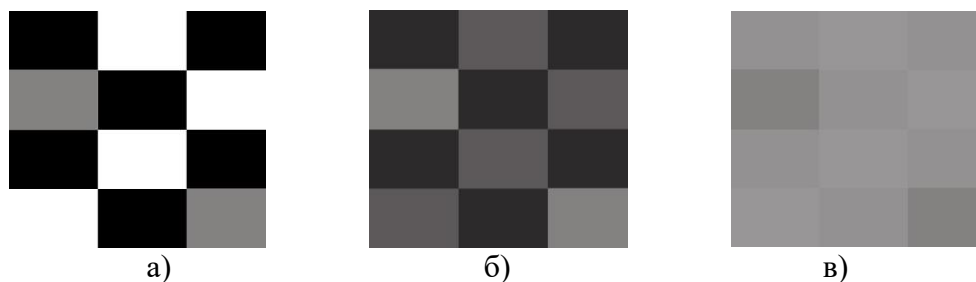
**Рис. 2. Типы индивидов, различающиеся по индивидуальному стилю деятельности (ИСД) в рамках методики тестирования «Ассоциативное цветовое пространство»:**  
а – «творец»; б – «рационал», в – «скептик», г – «авангардист»; д – «смешанный»

Несмотря на доказанную эффективность, сегодня методика не является универсальным средством профориентационного тестирования, так как не переведена в формат компьютерной программы. Ручное заполнение тестовой формы (рис. 1, а) занимает от 1,5 до 3 час, что утомительно для реципиента, не относящегося к творческим специальностям. На данный момент возможно заполнение тестовой формы (рис. 1, а) через любой доступный графический редактор, но результат также оценивается специалистом, то есть – человеком. Следовательно, из процесса соотнесения готовых тестовых форм с классификацией типов индивидов по методике тестирования «Ассоциативное цветовое пространство» не исключен человеческий фактор.

Человеческий индивид, даже в случае наличия профессиональной подготовки по соответствующему профилю и знакомства с процедурой профориентационного тестирования, обладает индивидуальными особенностями мышления и восприятия, при условии наличия единых, физиологически обусловленных закономерностей скоростного этапа восприятия для всех индивидов. Скоростной этап восприятия объекта или изображения ограничен сверхкратким временным промежутком (от 0,62 м/с), за который происходит различение грубых очертаний формы, выявление визуальной массы и динамических осей изображения либо объекта, что характеризует его форму, цвет, ориентацию в пространстве, расположение

относительно смотрящего, а также степень потенциальной опасности. В случае, когда заполненные тестовые формы без труда визуально сопоставляются с эталонами (рис. 2), идентификация индивида не представляет сложностей, и результат имеет высокую степень точности. Но большинство реципиентов представляют средневыраженные и спорные результаты.

На рис. 3 представлены три степени выраженности «шахматной» структуры, характерной для типа «рационал». Если в примерах (рис. 3, а, рис 3, б) данный тип структуры очевиден, то пример (рис. 3, в) у ряда зрителей может быть трактован как смешанный вариант.



**Рис. 3. Степень выраженности «шахматной» структуры изображения:**  
а – выраженная; б – средневыраженная, в – слабовыраженная

Особое значение в распознавании типов индивидов по методике тестирования «Ассоциативное цветовое пространство» имеют характерные цветовые сочетания и оттенки, используемые реципиентами. Помимо обозначенного, цвет оказывает влияние и на восприятие структуры. Индивидуальное цветовосприятие человека, при условии отсутствия диагностированных аномалий, зависит от многих факторов, среди которых:

- 1) условия наблюдения (освещенность помещения);
- 2) текущее психоэмоциональное и физическое состояние наблюдателя;
- 3) индивидуальная восприимчивость к оттенкам разных тонов спектра.

Кроме вышеперечисленного, важнейшую роль играет наличие либо отсутствие аномалий цветовосприятия, которые могут иметь стертую форму и, тем не менее, оказывать существенное влияние на процесс оценивания сложных по цвето-колористическому наполнению композиций. Согласно исследованиям, описанным Е.Б. Рабкиным в книге «Полихроматические таблицы для исследования цветоощущения» (1971), расстройства цветового зрения более характерны для мужчин, нежели для женщин. Ряд исследователей (Е.Я. Мадиевская, Р.Е. Санович, Е.Г. Соколова, Л.Г. Негло, Е.В. Торговицкая, С.Я. Фрейман, Е.И. Лосева, Т.Л. Соснова, С.С. Перлова, Н.П. Цветкова и др.) обследовали особенности цветовосприятия более 40 000 человек. Основной контингент реципиентов составляли учащиеся средних школ и техникумов, студенты вузов, а также сотрудники различных учреждений. Результаты проведенных исследований показали, что врожденные расстройства цветового зрения составляют 8 % для мужчин и 0,5 % для женщин [7]. Тем не менее, даже если исключить мужчин из числа сотрудников, анализирующих готовые тестовые формы, остаются индивидуальные особенности восприятия тех или иных оттенков спектра, различные у каждого индивида, условия освещения и текущее состояние здоровья человека.

Таким образом, человек является относительно ненадежным классификатором, вносящим значительную долю субъективности в анализ тестовых форм, не относящихся к ярко выраженным, что, среди прочих факторов, диктует необходимость разработки компьютерной программы. К примеру, один зритель может в силу врожденных особенностей, различать больше оттенков в пределах пятна одного тона, в то время как другой зритель видит пятно однородным. Оттенки, визуально принимаемые зрителем как единое пятно, вычленяются и отмечаются инструментом «пипетка» любого графического редактора как



три разных оттенка. В зависимости от выбранного режима, цвета могут иметь три или четыре координаты (система RGB, система CMYK).

С учетом рассмотренных аспектов, перевод методики в формат компьютерной программы имеет следующие положительные стороны:

- 1) значительное повышение точности результата, выраженного в процентном соотношении;
- 2) сокращение времени заполнения формы за счет использования инструмента «Заливка»;
- 3) получение результата с рекомендациями сразу после окончания теста;
- 4) отправка по электронной почте работодателю;
- 5) разработка универсального приложения для тестирования через интернет на компьютерах, мобильных устройствах, а также в локальной сети предприятия.

В настоящее время единственной потенциальной, но очень существенной проблемой перевода программы профориентационного тестирования в формат компьютерной программы является вероятность потери типа «авангардист» (рис. 2, з). Разрешенные и запрещенные манипуляции с тестовой формой зачитываются как человеком-куратором, так и электронным голосом одинаково, текст не имеет различий. Тем не менее, если графический редактор, встроенный в компьютерную программу будет слишком сложным, а возможность редактирования сетки-основы (рис. 1) неочевидной, многие реципиенты посчитают, что возможности преобразовать сетку в данной программе невозможно. Работая с тестовой формой вручную, реципиент всегда имеет возможность преобразовать исходную структуру, он может сделать это с помощью карандаша или ручки, либо сразу же заложить разграничения красками (рис. 2, з).

Если же возможность преобразовать структуру будет слишком очевидной, то многие потенциальные «творцы», «скептики» или «рационалы» могут воспользоваться инструментом «линия» или «кисть», так как интерфейс акцентирует внимание на данной возможности. Следовательно, данная часть интерфейса не должна быть выделена в сравнении с «заливкой» чтобы реципиент, изначально планировавший внести изменения в исходную структуру, целенаправленно исследовал интерфейс с целью обнаружения данной возможности.

Таким образом, задача разработчиков программного комплекса ColourUnique Pro состоит не только в выборе верных алгоритмов осуществления анализа тестовых форм, но и в разработке интерфейса, имитирующего условия ручного заполнения теста, где внимание зрителя не будет акцентировано на отдельных возможностях графического редактора. Вместе с тем, при использовании инструмента «линия» или «кисть», они должны быть достаточно легко обнаруживаемы.

Для осуществления перевода методики профориентационного тестирования «Ассоциативное цветовое пространство» имеются два пути разработки математической модели – математическое описание текущей квазипространственной модели (рис. 1, а) и перевод квазипространственной модели в пространственную (трехмерную). В последнем тестовая форма будет представлять собой геометрическое тело параллелепипед, а эффект квазипространства будет достигаться путем положения камеры относительно параллелепипеда, что создаст похожие перспективные искажения. В.В. Андреевым была предложена идея перевода квазипространства в плоскость (развертку), что получило применение в разработке алгоритмов оценки выполненных тестовых форм.

Разработка программного комплекса ColourUnique Pro выполняется с использованием интернет-технологий, чтобы можно было организовать многопользовательское тестирование и сбор результатов в единую базу данных. На стороне сервера для вычисления координат точек использован язык Python [8]. А.В. Чечиным, Ю.С. Тарасовой, А.В. Шаповалом разработаны алгоритм и компьютерная программа построения квазипространственной модели (с использованием четырехугольных ячеек и подходов центральной перспективы) и монито-

ринга ColourUnique (M), которая войдет в состав программного комплекса ColourUnique Pro. Координаты местоположения ячеек ( $C$ ) имеют следующую зависимость:

$$C = f(P; k; B; D; S) \quad (2)$$

где  $P$  – координаты базовых точек внешнего прямоугольника,  $k$  – коэффициент сжатия ячейки,  $B$  – блок квазипространственной модели,  $D$  – диагонали,  $S$  – стороны.

Алгоритм генератора ячеек представлен на рис. 4 и включает следующие основные этапы:

- 1) задание начальных параметров, генерирование базовых точек и расчет пропорций;
- 2) создание четырехугольных ячеек, включая пропорциональную разбивку диагоналей и сторон;
- 3) запись ячеек в базу данных.

Интерфейс окна генератора ячеек квазипространственной модели представлен на рис. 6, а.

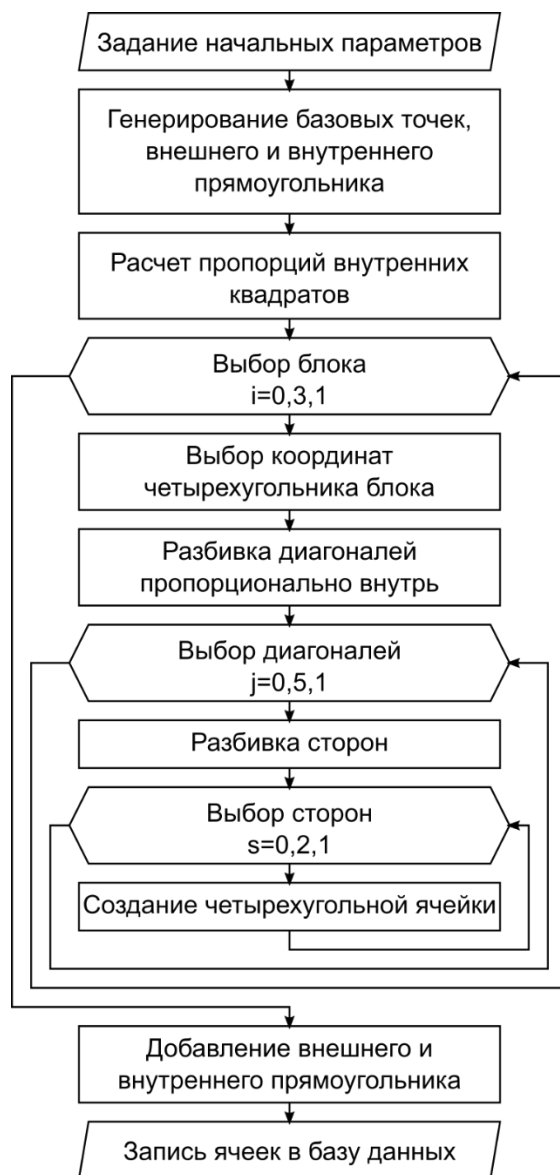


Рис. 4. Блок-схема алгоритма генерации квазипространственной модели

Для начала тестирования пользователь загружает программу и заполняет форму (рис. 5). Затем пользователь нажимает кнопку «Отправить» и переходит к тестированию. Звучит аудиозапись с инструкцией, и становятся доступными инструменты. Пользователь выбирает нужный цвет справа и указывает прямоугольник в квазипространственной модели для закраски (рис. 6, б). Изменения цвета фиксируются в базе данных.

Для студентов творческих направлений планируется сохранить ручное заполнение тестовой формы, так как данная процедура позволяет оценить практические навыки владения цветом (механическое смешивание цветов с помощью гуашевых красок).

В случае продолжения практики ручного заполнения тестовых форм для студентов творческих направлений, необходимо будет разработать конвертер, либо дополнительную возможность для будущей компьютерной программы, чтобы соотносить сканированные изображения с программной моделью.

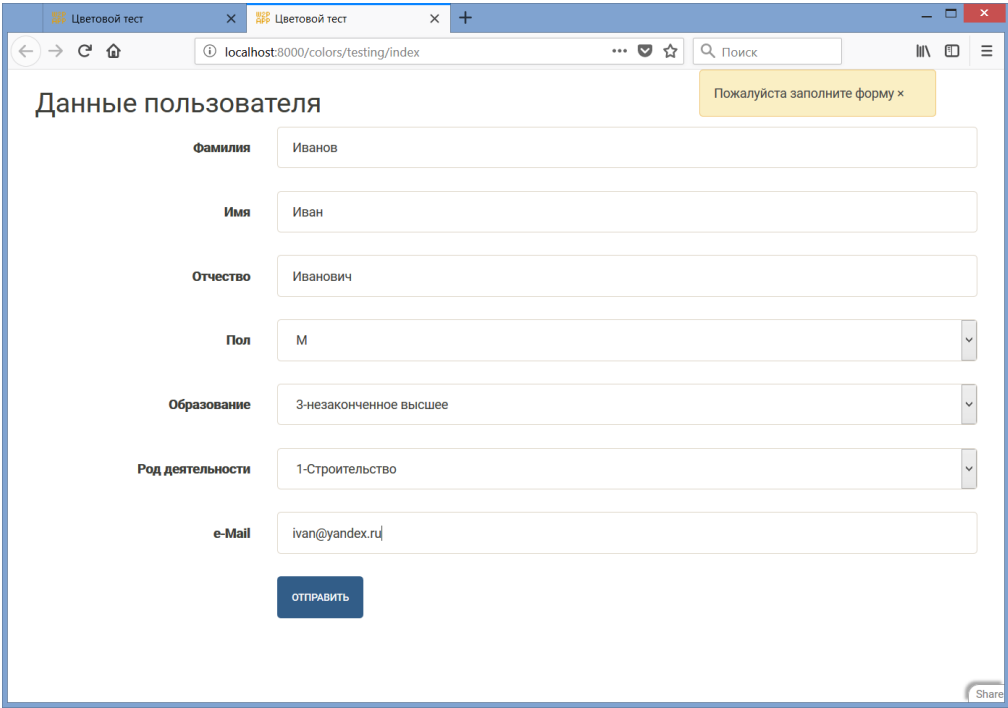
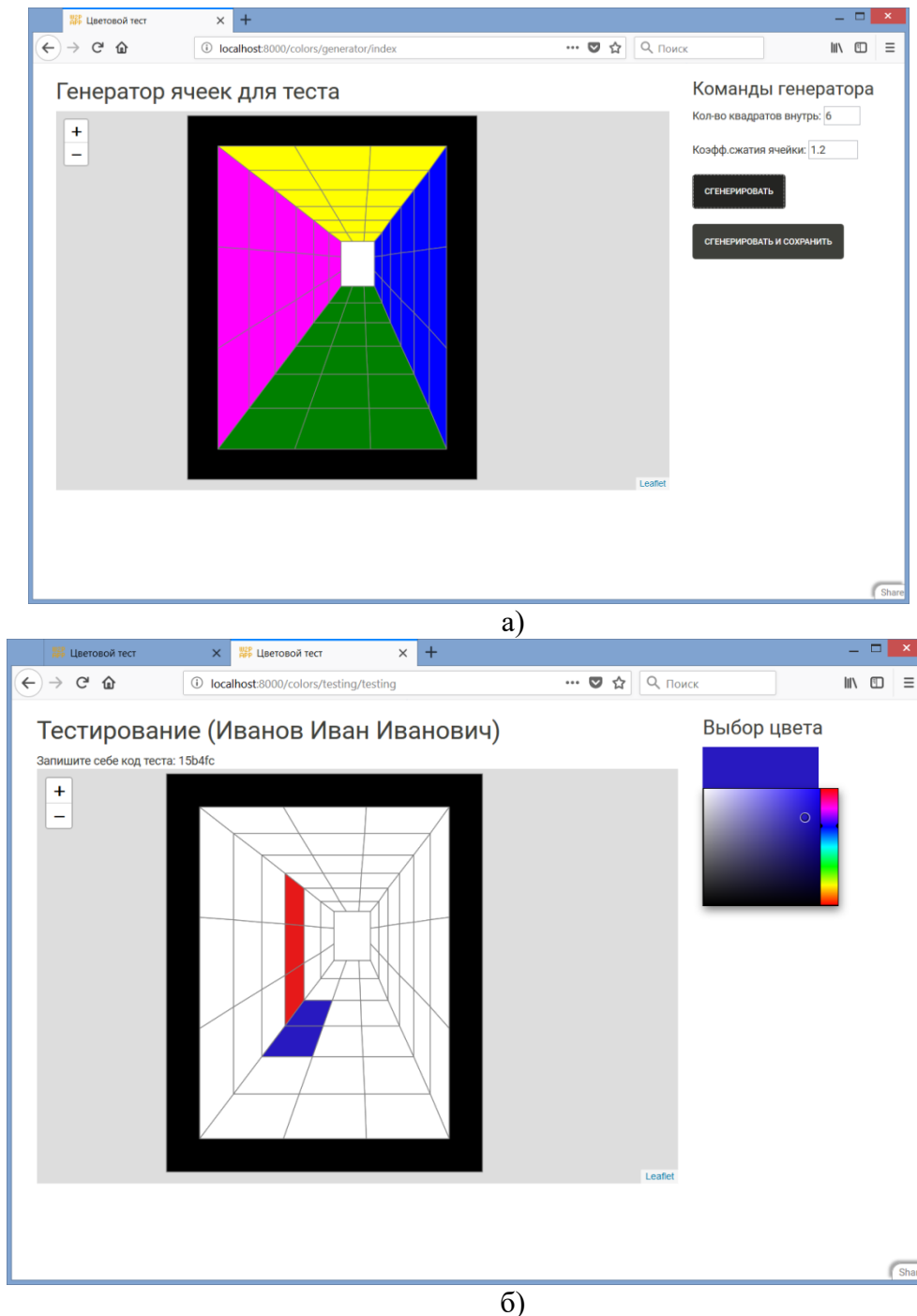
The image shows a web browser window with two tabs titled "Цветовой тест". The address bar shows "localhost:8000/colors/testing/index". The page content is titled "Данные пользователя" and contains a form with the following fields: "Фамилия" (Ivanov), "Имя" (Ivan), "Отчество" (Ivanovich), "Пол" (M), "Образование" (3-незаконченное высшее), "Род деятельности" (1-Строительство), and "e-Mail" (ivan@yandex.ru). A blue "ОТПРАВИТЬ" button is at the bottom. A yellow warning box at the top right says "Пожалуйста заполните форму x".

Рис. 5. Интерфейс программы ColourUnique (M): форма данных пользователя

На текущей стадии работы с методикой профориентационного тестирования «Ассоциативное цветовое пространство» группой разработчиков создана программа ColourUnique (M), содержащая упрощенную тестовую форму и графический редактор (рис. 6, б), дающий возможность производить тестирование без поиска и скачивания сторонних программ. Пока результат оценивается преподавателем или психологом.

Автоматизирован процесс сбора данных и заполнения тестовой формы. Время, затрачиваемое на сбор данных и заполнение тестовой формы, существенно сократилось (среднее время заполнения тестовой формы, представленной на рис. 1, а, составляет 180 мин, а формы, созданной с помощью программы ColourUnique (M) – порядка 60 мин).



**Рис. 6. Интерфейс программы ColourUnique (М):**  
 а – генератор ячеек, б – тестирование (заполнение цветом)

### Библиографический список

1. Шаповал, А.В. Отечественная экспериментальная эстетика в постиндустриальный период: монография / А.В. Шаповал. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2009, – 167 с.
2. Шаповал, А.В. Теория формальной композиции: учебное пособие для вузов / А.В. Шаповал. – Казань: Дизайн-квартал, 2016, – 175 с.
3. Шаповал, А.В. Метод количественной оценки системой технического зрения значений интегративных признаков объектов хроматического изображения предметно-пространственной среды / А.В. Шаповал, Е.А. Мартемьянова // Приволжский научный журнал. – 2017. – №1. – С. 69-75.

4. **Тарасова, Ю.С.** Прогнозирование распределения визуальной массы доминирующих цветовых сочетаний на основе анализа квазипространственной модели / Ю.С. Тарасова, В.В. Андреев, Е.А. Мартемьянова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 5. – С. 256-260.
5. **Тарасова Ю.С.** Развитие квазипространственной цветовой модели как средства компьютерного профориентационного тестирования на основе больших данных / Ю.С. Тарасова, В.В. Андреев, Е.А. Мартемьянова // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» ИСТ-2018. – Н. Новгород: НГТУ. – С. 1066-1072.
6. **Григорьева, М.В.** Психология труда. Конспект лекций / М.В. Григорьева. – М.: Высшее образование, 2006, – 192 с.
7. **Рабкин Е. Б.** Полихроматические таблицы для исследования цветоощущений / Е. Б. Рабкин. – М.: Медицина, 1971, – 250 с.
8. **Чечин, А.В.** Обработка геоданных с использованием языка Python // Труды научного конгресса 20-го Международного научно-промышленного форума «Великие Реки 2018» – Н. Новгород: ННГАСУ. – С. 379-380.

*Дата поступления  
в редакцию: 17.04.2019*

**V.V. Andreev<sup>1</sup>, Y.S. Tarasova<sup>2</sup>, E.A. Martemyanova<sup>2</sup>, A.V. Shapoval<sup>2</sup>, A.V. Chechin<sup>2</sup>**

## **THE AUTOMATIZATION OF CAREER GUIDANCE TESTING BASED ON ASSOCIATIVE COLOR SPACE**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev<sup>1</sup>  
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering<sup>2</sup>

**Purpose:** Automatization of the methodology of vocational guidance testing «Associative color space method» by implementing it in the form of the software package ColourUnique Pro.

**Design/methodology/approach:** The theoretical basis of the study is a five-year monitoring of recipients who have undergone vocational guidance testing according to the «Associative color space method»: analysis, systematization, formulation of recommendations, and the search for correlation with classical vocational guidance testing methods. The prerequisites are formulated and the ways of automating the vocational guidance testing in the form of the software package ColourUnique Pro using Internet technologies, including the organization of multi-user testing and collecting the results into a single database, programming language – Python, are proposed.

**Findings:** The theoretical basis of the study can be used to develop algorithms for the software package ColourUnique Pro, which includes the computer program ColourUnique M, which allows for automated filling out of a test form and collecting user (recipient) data.

**Research limitations/implications:** This study serves as the basis for the further development of the automation of the methodology of vocational guidance testing «Associative color space method».

**Originality/value:** The method of vocational guidance testing «Associative color space method» measures the individual style of activity, which alone or in conjunction with the classical methods of vocational guidance diagnostics will provide updated and detailed recommendations for employers and recipients (applicants).

*Keywords:* career guidance, types of individuals, quasi-space, algorithms, individual style of activity, multi-user testing, database, generation, computer program.

УДК 519.6

С.М. Дмитриев<sup>1</sup>, О.Л. Крутякова<sup>2</sup>, А.С. Козелков<sup>1-3</sup>,  
А.А. Куркин<sup>1</sup>, В.В. Курулин<sup>2</sup>, Д.А. Уткин<sup>2</sup>

## ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ КОНВЕКЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>  
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики –  
Российский федеральный ядерный центр<sup>2</sup>  
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ<sup>3</sup>

Рассматривается возможность использования различных подходов к моделированию турбулентности в условиях развитой конвекции при числах Рэлея высоких порядков. Для исследования выбран ряд промышленно ориентированных задач, имеющих экспериментальные данные. Показано, что при числах Рэлея от  $10^9$  до  $10^{17}$  применение вихреразрешающей LES модели позволяет увеличить точность моделирования естественной конвекции в сравнении с RANS моделями турбулентности. Наиболее ярко данное преимущество проявляется для случаев конвекции Рэлея-Бенера, при вертикальном перепаде температур с образованием обширной конвективной зоны высокой интенсивности. Использование модели рейнольдсовых напряжений EARSM показано для случаев естественно-конвективного течения в областях с наличием двугранных углов и преобладанием вторичных токов. При моделировании менее интенсивного конвективного течения различия в применяемых подходах к моделированию турбулентности менее значительны. Показано, что с увеличением значений чисел Рэлея возрастают погрешности в определении теплогидравлических характеристик. Для более точного их определения целесообразно использовать вихреразрешающие подходы к моделированию турбулентности.

*Ключевые слова:* высокоразвитое конвективное течение, моделирование турбулентности, высокие числа Рэлея, конвекция Рэлея-Бенера, теплоотдача.

### Введение

Течения жидкостей с развитой турбулентной конвекцией, характеризующейся сильным влиянием гравитационных сил, представляют огромный интерес, но до настоящего времени слабо изучены. Необходимость исследования данных течений возникает в таких отраслях научных и технических знаний, как астрофизика, геофизика, геодинамика, атомная энергетика. К важнейшим задачам, требующим учета турбулентной конвекции, относятся крупномасштабные течения в атмосфере и жидких ядрах планет, течения жидкометаллических теплоносителей в реакторных установках, конвекция в условиях микрогравитации в космических аппаратах и топливных баках, а также другие разнообразные течения в технических изделиях. Особый интерес в исследовании турбулентной конвекции проявляется в атомно-энергетической отрасли. Первостепенное значение, наряду с повышением технико-экономических показателей атомных энергетических станций (АЭС), имеет обеспечение безопасности реакторных установок при прохождении тяжелых аварий, а также проведение мероприятий с целью минимизации их последствий [1]. При тяжелых авариях, сопровождающихся потерей теплоносителя, происходит разрушение активной зоны. Вследствие этого расплавленные элементы конструкции реактора перемещаются на днище корпуса реактора, что приводит к образованию высокотемпературного тепловыделяющего расплава в его нижней части, где он должен быть локализован. В число мер безопасности реакторной установки входит обеспечение необходимого отвода тепла от границ устройства локализации расплава, где теплообмен происходит в режиме естественной конвекции.

К экспериментам в атомной энергетике, где исследовался механизм конвективного теплообмена жидкости в полостях с объемным нагревом при числах Рэлея высоких порядков  $10^{14}$  -  $10^{17}$  относятся СОРО [2-5] и BALI [6, 7]. Сложность экспериментов данного класса те-

чений актуализирует развитие численного моделирования. Поскольку в ходе исследований подтвержден ярко выраженный турбулентный характер течения, одной из основных проблем численного моделирования является турбулентность. Интерес вызывает вопрос влияния турбулентности на характер течения и величину граничной теплоотдачи. Существующий уровень развития вычислительных мощностей позволяет моделировать конвекцию в приемлемые сроки с помощью осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. При этом турбулентность моделируется в рамках RANS подхода [8, 9]. Это накладывает ограничения при описании турбулизации потоков как для естественной, так и для вынужденной конвекции, вследствие наличия гравитационных сил, моделируемых в RANS подходе эмпирическими зависимостями, что, в свою очередь, приводит к существенной погрешности описания процесса в целом. Данная проблема может быть решена использованием прямого численного моделирования (DNS). Однако проводимые в настоящее время численные эксперименты с помощью DNS для задач естественной конвекции ограничиваются достаточно скромными числами Рэлея: максимальное значение  $10^7$  [10]. Особый же интерес в изучении турбулентной конвекции представляют высокие числа Рэлея, для технических приложений – это числа порядка  $10^{14}$ - $10^{17}$  и выше.

В работе [11] отмечается, что стандартные низкорейнольдсовы RANS модели не всегда применимы для решения задач турбулентной конвекции. Численное моделирование эксперимента BALI с целью верификации и калибровки различных моделей турбулентности проводилось в [12]. В работе [13] показано, что применение низкорейнольдсовой AKN модели турбулентности (описание AKN модели приведено в [13-15]) позволяет снизить погрешность распределения теплового потока. Моделирование с использованием стандартной  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности показывает, что ее применение ведет к заниженному распределению теплового потока.

Целью данной работы является численное моделирование процессов высокоразвитой конвекции тепловыделяющей жидкости при высоких числах Рэлея и исследование применения подходов к описанию турбулентности для свободно конвективных течений.

В первой части работы представлены результаты моделирования свободно конвективного течения между двумя стенками разной температуры в замкнутой кубической полости, которая представляет наиболее распространенный класс задач естественной конвекции. В основной части работы представлены результаты численного исследования задач естественной конвекции при высоких числах Рэлея на примере моделирования экспериментов СОРО и BALI. Показаны результаты применения различных подходов к моделированию турбулентности в сравнении с результатами экспериментальных исследований.

### Подходы к моделированию турбулентности

Моделирование турбулентности опирается на несколько основных подходов. Наибольшей популярностью в настоящее время пользуются RANS модели турбулентности, однако они не являются универсальными и подходящими для решения широкого круга прикладных задач, поскольку описывают только осредненные характеристики, что налагает определенные требования к их применимости на практике [8, 16]. Наивысший рейтинг применимости из RANS моделей имеет модель SST (Shear Stress Transport) [17]. Однако, как и в большинстве RANS моделей, в SST используется гипотеза Буссинеска о турбулентной вязкости [18], которая справедлива лишь в случае изотропной турбулентности. Для турбулентной конвекции существенное влияние оказывают анизотропные свойства течения: это связано со сложным характером потока и наличием вторичных токов. Для правильного предсказания структуры подобных течений необходимо использовать RSM модели (Reynolds Stress Modelling) или альтернативные EARSM (Explicit Algebraic Reynolds Stress Modelling), которые учитывают влияние на основное течение всех компонент тензора напряжений Рейнольдса с помощью нелинейных соотношений, и тем самым способны увеличить точность расчета

турбулентных, анизотропных течений [18]. В данной работе в качестве альтернативы модели SST, рассматривается явная алгебраическая EARSM модель, которая по своим качествам не уступает дифференциальной RSM и является менее затратной с вычислительной точки зрения [19].

Метод крупных вихрей LES (Large Eddy Simulation) позволяет получить хорошие результаты как для присоединенных, так и для отрывных течений, существенно уточняя прогнозирование ряда основных физических процессов [20]. Данный подход способен предоставлять детальную информацию о нестационарных полях флуктуаций скорости, температуры и давления, которые, в свою очередь, могут оказывать влияние на величину и характер граничной теплоотдачи. Однако метод LES налагает большие требования на качество дискретных моделей и существенно повышает, по сравнению с RANS, объем необходимых вычислительных ресурсов. Таким образом, для конвективных течений встает вопрос исследования строения турбулентного потока и применение вихреразрешающих моделей турбулентности для установления связи мелкомасштабных колебаний с теплоотдачей в рассматриваемой зоне.

### Численные эксперименты

Все расчеты в настоящей работе осуществлены с помощью пакета ЛОГОС – российского программного продукта инженерного анализа, предназначенного для решения сопряженных трехмерных задач конвективного теплопереноса, аэродинамики и гидродинамики на параллельных ЭВМ. Пакет программ ЛОГОС успешно прошел верификацию и показал достаточно хорошие результаты на серии различных гидродинамических задач [15, 22, 23], включая расчеты турбулентных и нестационарных течений [19, 20] и геофизические явления [24-26].

### Задача о развитой турбулентной конвекции

Моделирование течения жидкости в кубической полости между двух разнотемпературных стенок представляет фундаментальный интерес, поскольку течения с наложенным вертикальным перепадом температуры характеризуются наличием разномасштабных вихревых структур и учитывают основные особенности естественно конвективного течения. В работе приведены результаты численного моделирования циркуляции дистиллированной воды в области, подогреваемой снизу и охлаждаемой сверху. Основные исследования данного вопроса выполнены для конвекции в цилиндрических и кубических полостях. Экспериментальные исследования конвекции в кубической полости с вертикальным перепадом температуры проводились в широком диапазоне чисел Рэлея  $10^3$ - $10^9$ .

Экспериментальная установка представляет собой кубическую область со стороной  $D = 250$  мм [10]. Горизонтальные стенки изготовлены из меди и выступают в качестве теплообменников, а вертикальные стенки изготовлены из плексигласа, обеспечивают изотермические граничные условия. С помощью термостатов через теплообменники пропускается термостатирующая жидкость, которая нагревает (охлаждает) теплообменники относительно средней температуры жидкости. В данной работе рассматривается течение, характеризующиеся перепадом температуры в  $20$  °С, что соответствует числу Рэлея  $6,1 \times 10^9$ , которое определяется по формуле (1):

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot H^3}{\lambda \cdot \nu} \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\beta$  – коэффициент температурного расширения,  $H$  – характерный размер,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $\Delta T$  – перепад температур.



В качестве теплоносителя используется вода, свойства которой заданы зависящими от температуры [27]. Моделирование проведено в рамках вихреразрешающего подхода LES и RANS моделей SST и EARSM.

Использовалась изотропная блочно-структурированная сетка, состоящая из 3,375 млн ячеек правильной гексаэдральной формы с размером 0,0016 м. Сеточная модель соответствует требованию применимости стандартных пристеночных функций с параметром  $y^+$  не выше 5, а также позволяет разрешить мелкомасштабную турбулентность в рамках LES-расчета.

В качестве схемы дискретизации по пространству и в уравнении сохранения импульса для LES-модели использовалась схема BCD с откалиброванной для данной схемы константой Смагоринского. Описание схем представлено в [9, 21]. Шаг по времени подбирался таким образом, чтобы обеспечить значение числа Куранта порядка единицы. Нестационарный расчет проводился до момента времени 4200 с, что соответствует оценочному времени основных характеристик физических полей в эксперименте. Осреднение основных физических полей проводилось с момента времени 100 с.

На рис. 1 показаны расчетные и экспериментальные поля осредненной скорости и распределения спектральной плотности энергии пульсаций крупномасштабной циркуляции

в центральном сечении экспериментальной установки  $E_{puls\_avg} = \frac{\langle v_x'^2 + v_z'^2 \rangle}{2}$  (рис. 2).

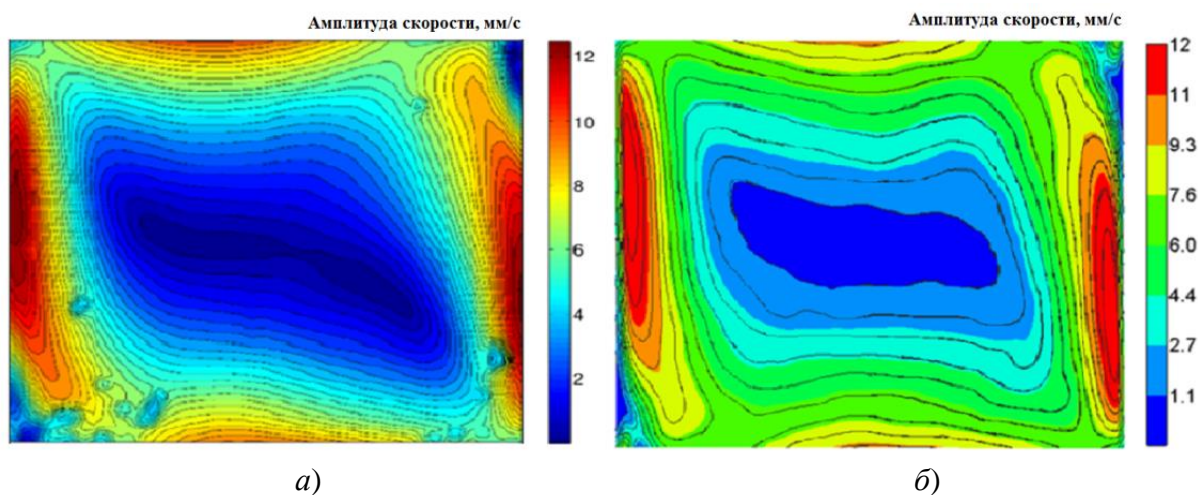


Рис. 1. Распределение осредненной по времени амплитуды скорости:  
а – эксперимент; б – расчет

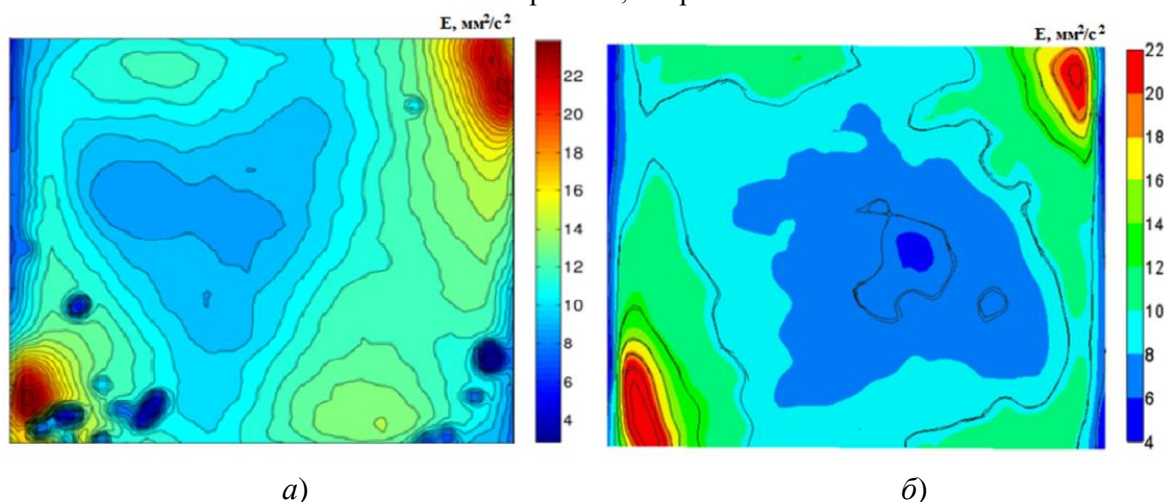
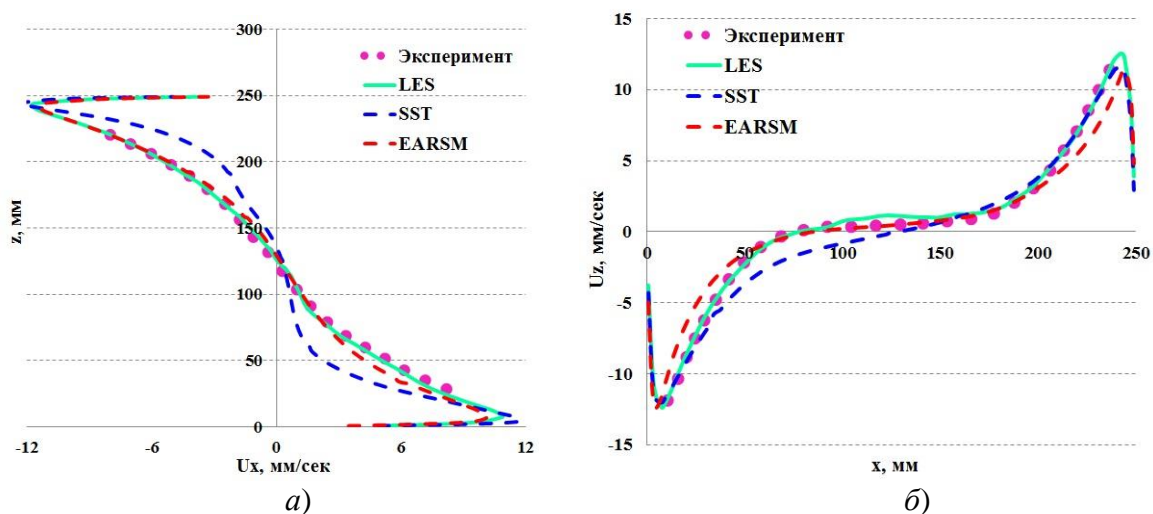


Рис. 2. Распределение осредненной по времени энергии турбулентных пульсаций:  
а – эксперимент; б – расчет

Максимальное значение скорости на картине экспериментального мгновенного поля достигается вблизи стенок, в противоположных углах области возникают вихри, численное поле распределения спектральной плотности энергии пульсаций представляет похожую картину, описывая локализованные в углах вихри небольшого размера. В эксперименте и в расчете структура течения очень близка. Хорошо видно, что в области возникает крупномасштабный вихрь, соизмеримый с ее размерами. Помимо основного вихря, на средних полях также существуют вторичные вихри меньшего масштаба, локализованные в противоположных углах кубической области.

Для качественной и количественной оценки на рис. 3 представлены профили горизонтальной и вертикальной компонент скорости осредненной по времени. Как видно из рис. 3, профили скорости демонстрируют хорошее совпадение, повторяя не только структуру потока, но и воспроизводя значение скорости в пограничных слоях.



**Рис. 3. Профили средней по времени профиль горизонтальной (а) и вертикальной (б) компоненты скорости при фиксированной координате  $x = 125$  мм и  $z = 125$  мм соответственно**

Профили скорости, полученные с помощью модели линейной вихревой вязкости SST, отклоняются от эксперимента. Среднеквадратичное отклонение по данной модели составило порядка 6 %. Различия в расчетных данных могут быть связаны с геометрической особенностью области, характеризующейся большим количеством двугранных углов. Так, в [19] на задаче течения жидкости в трубе квадратного сечения показано, что модель SST, дает большую погрешность, и для подобных задач показано применение модели EARSM. Использование данной модели позволило значительно сократить вычислительную погрешность, среднеквадратичное отклонение результатов EARSM составило около 2,5 %. С помощью LES модели получено наилучшее согласие с экспериментальными данными. Расчетные профили осредненной скорости по LES с высокой точностью воспроизводят общий характер конвективного теплообмена в кубической полости, подогреваемой снизу и охлаждаемой сверху, относительная погрешность результатов составила  $\sim 1,5$  %. Результаты по всем моделям получены на одной и той же расчетной сетке.

Численное решение данной задачи показывает, что моделирование конвективного движения для чисел Рэлея  $\sim 10^9$  по всем моделям турбулентности дает приемлемый результат. Однако практически важные течения, вызывающие большой интерес при обосновании безопасности АЭС характеризуются более высокими числами Рэлея, вплоть до  $10^{17}$ . Приемлемость представленных подходов к моделированию турбулентности для такого класса течений можно оценить на экспериментах COPO и BALI, которые представлены ниже.

### Моделирование эксперимента СОРО

В эксперименте СОРО рассматривается задача развитой турбулентной конвекции водного раствора соли в замкнутой области. Эксперимент СОРО имитирует аварийную ситуацию в водо-водяном энергетическом реакторе с эллиптическим днищем (ВВЭР), при которой происходит разрушение активной зоны, что приводит к образованию высокотемпературного тепловыделяющего расплава в нижней части корпуса реактора [1-5]. Для предотвращения дальнейшего разрушения реакторной установки осуществляется теплоотвод, путем охлаждения нижней части корпуса реактора водой, верхняя часть реактора охлаждается за счет радиационного теплообмена, течение внутри области происходит в режиме естественной конвекции.

Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 4: она представляет собой тонкий вертикальный срез соответствующий центру нижней части корпуса реактора ВВЭР-440 с эллиптическим днищем. Эксперимент проводился в масштабе 1:2 в slice-геометрии, длина установки составляла 1,77 м, толщина слоя – 0,094 м, большая горизонтальная ось полуэллипса – 0,89 м, вертикальная ось  $b = \frac{1}{2} a$ .

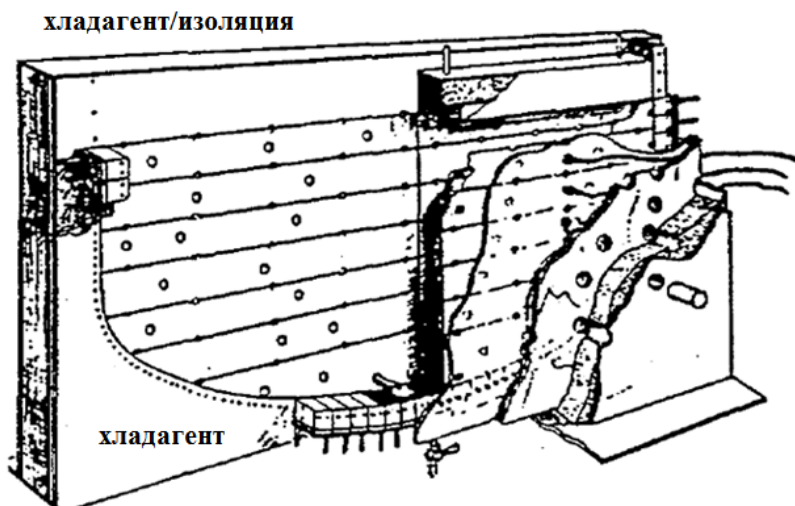


Рис. 4. Схема установки СОРО

Жидкостью, имитирующей расплав, являлся раствор соли в воде, объемный нагрев которого обеспечивали распределенные по всей области электроды. Вертикальные границы были теплоизолированными. Эллиптическая граница охлаждалась жидким азотом через прослойку теплоизолятора, что приводило к образованию относительно тонкой корки льда и обеспечивало изотермические граничные условия. В одном из режимов верхняя граница экспериментальной установки была теплоизолированной, что аналогично случаю, когда в устройстве локализации расплава вышерасположенный оксидный бассейн покрыт коркой, и тепловыделение не велико. Для остальной серии экспериментов верхняя граница охлаждалась аналогично эллиптической.

Основными характеристиками течения с внутренними источниками тепла являются параметры плотности теплового потока на границе и максимальное превышение температуры жидкости в объеме над температурой границы. Безразмерные числа, характеризующие данные величины – критерий Нуссельта и Рэлея соответственно. Для тепловыделяющего расплава используют модифицированное число Рэлея (2):

$$Ra_i = \frac{g \cdot \beta \cdot q_v \cdot R^5}{\lambda \cdot a_T \cdot \nu} \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\beta$  – коэффициент теплового расширения,  $qv$  – внутриобъемное энерговыведение,  $R$  – высота полуэллипса,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности среды,  $a_T$  – коэффициент температуропроводности среды,  $\nu$  – кинематическая вязкость. Значение модифицированного числа Рэлея в данном эксперименте составляло  $\sim 10^{15}$ .

Показателем эффективной теплоотдачи через границу объема служит число Нуссельта (3):

$$Nu = \frac{qH}{\lambda\Delta T}. \quad (3)$$

В расчете все теплофизические величины заданы зависящими от температуры [27]. Коэффициент температурного расширения был задан зависящим от температуры и определяется соотношением (4):

$$\beta = (0,007114 \cdot T - 1,87241445) / (754,5045 + 1,8724 \cdot T - 0,00355711 \cdot T^2). \quad (4)$$

Моделирование проведено в рамках вихререзающего подхода LES и RANS моделей SST и EARSM. Расчетная область соответствовала полной модели экспериментальной установки. Использовалась блочно-структурированная сетка, состоящая из 2,5 млн ячеек гексаэдральной формы, размер ячеек в основной области 0,004 м, со сгущением ко всем стенкам (размер пристеночной ячейки 0,0002 м). Сеточная модель соответствует требованию применимости стандартных пристеночных функций с параметром  $y^+$  не выше 5, а также позволяет разрешить мелкомасштабную турбулентность в рамках LES расчета.

В качестве схемы дискретизации по пространству и в уравнении сохранения импульса для LES-модели использовалась схема BCD с откалиброванной для данной схемы константой Смагоринского. Шаг по времени подбирался таким образом, чтобы обеспечить значение числа Куранта порядка единицы. Нестационарный расчет проводился до момента времени 5000 сек., осреднение основных физических полей проводилось с момента времени 1000 сек.

Численное моделирование выполнено для серии экспериментов СОРО, в которых присутствовал режим с теплоизолированной верхней стенкой (режим № 1), а также три режима с охлаждаемой верхней стенкой, различным значением энерговыведения и различной высотой области (аспектным соотношением).

Таблица 1

Параметры экспериментальных режимов

Режим №	Высота области (м)	Режим для верхней стенки	Объемное энерговыведение (кВт/м <sup>2</sup> )	Значение модифицированного числа Рэлея
1	0,847	адиабатическая	46,5	$1,7 \cdot 10^{15}$
2	0,639	T=273K	153,2	$1,36 \cdot 10^{15}$
3	0,73	T=273K	161,5	$2,9 \cdot 10^{15}$
4	0,847	T=273K	104,3	$3,8 \cdot 10^{15}$

Экспериментально подтверждается, что для режима № 1 с теплоизолированной верхней стенкой характерно стратифицированное распределение. На рис. 5, а представлено мгновенное распределение температуры для режима №1 (модель LES) видно, что жидкость с более высокой температурой (минимальной плотностью) находится сверху области, возмущения в потоке практически отсутствуют, наблюдается четкая температурная стратификация. На рис. 5, б представлено мгновенное распределение безразмерной температуры (модель LES) для экспериментального режима № 4 с охлаждаемой верхней границей. Для данного режима стратифицированное распределение температуры наблюдается только в нижней части расчетной области, большую часть верхней области занимает зона конвекции Рэлея-Бенера, где наблюдаются крупные вихревые структуры.



Для экспериментального режима № 1 на рис. 6, *а* приведено распределение теплового потока на охлаждаемой эллиптической границе, в сравнении с экспериментальными данными. Эксперимент содержит данные по распределению плотности теплового потока, как по левой части корпуса, так и по правой. Разница данных графиков, по всей видимости, обусловлена чистотой проведения эксперимента. Модели SST и EARSM представляют похожий результат распределения плотности теплового потока, среднеквадратичная погрешность составляет около 6 %, применение EARSM дает небольшое преимущество, уменьшая погрешность на 0,5 %. Среднеквадратичная погрешность при LES моделировании составила около 3,5 %.

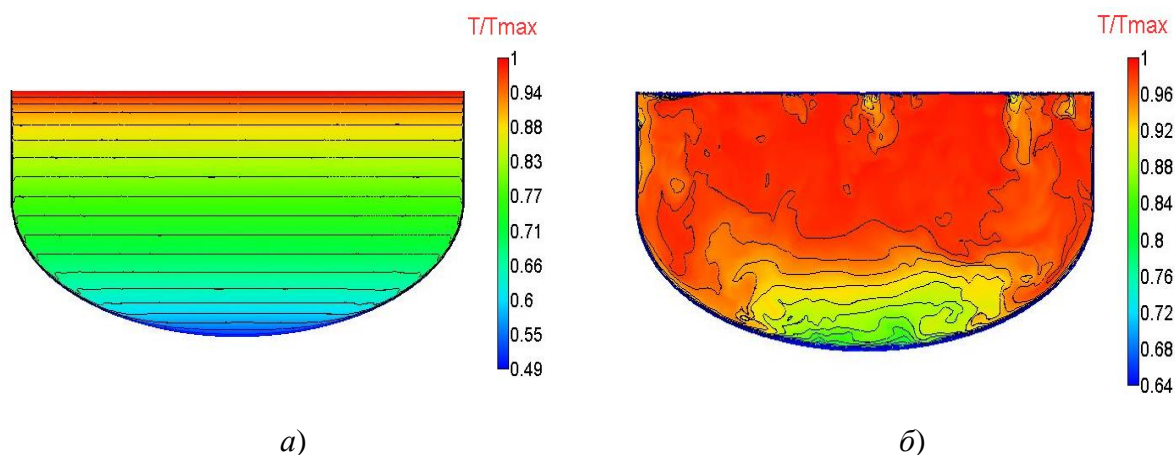


Рис. 5. Мгновенное поле безразмерной температуры, модель LES:  
*а* – режим № 1; *б* – режим № 4

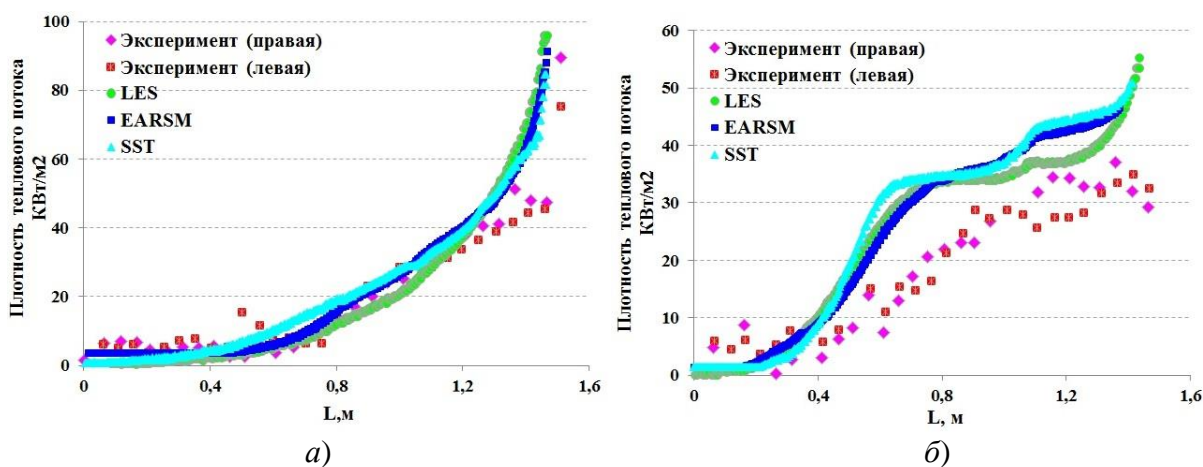


Рис. 6. Распределение теплового потока на эллиптической границе:  
*а* – режима № 1; *б* – режим № 4

Для экспериментального режима с охлаждаемой верхней границей (рис.6, *б*) результаты имеют более высокую погрешность. Все модели завышают тепловой поток в верхней части расчетной области. Результаты, полученные с использованием RANS-моделей, соотносятся между собой, давая приблизительно одинаковый результат, среднеквадратичное отклонение для EARSM и SST-моделей составляет 11 % и 13 % соответственно. Кривая плотности теплового потока, полученная с помощью LES-моделирования, лежит ближе к эксперименту, погрешность составила порядка 6 %.

Основным интегральным показателем рассмотренного класса течений является распределение граничной теплоотдачи, характеризуемое числом Нуссельта. По результатам проведенных за последнее время экспериментальных исследований была получена зависи-

мость числа  $Nu$  от модифицированного числа Рэлея (2), зависимость справедлива для  $Ra_i \sim 10^{13}-10^{17}$  [3]:

$$Nu = 0,385 \cdot Ra_i^{0,233} \quad (6)$$

На рис. 7 представлены результаты численного моделирования трех экспериментальных режимов, в соответствии с табл. 1, для которых приведена зависимость числа Нуссельта (3) от модифицированного числа Рэлея (2).

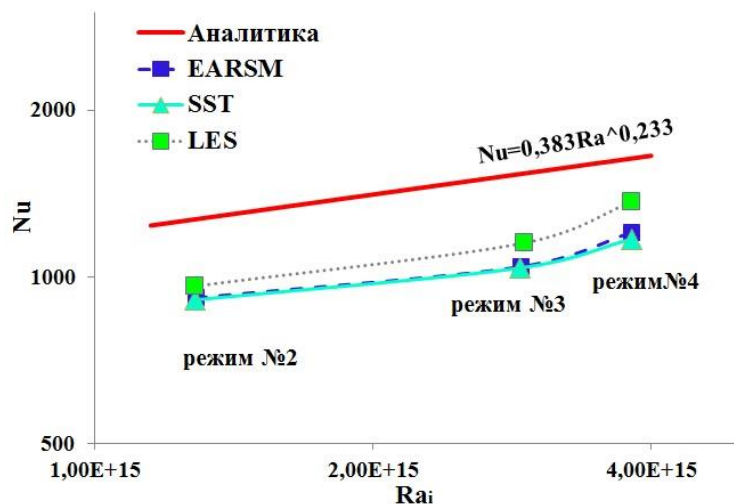


Рис. 7. Зависимость числа Нуссельта от модифицированного числа Рэлея ( $Ra_i$ )

Анализируя полученные результаты, можно предположить, что достаточно большое отклонение связано с занижением теплового потока на верхней границе, в то время как на эллиптической границе тепловой поток завышен. Теплосъем с верхней границы менее интенсивен, в сравнении с экспериментальными данными. На эллиптической же границе он завышен в среднем на 30 %. Максимальное отклонение от экспериментальной зависимости достигает 33 %, для LES максимальное отклонение составило 25 %.

В рамках эксперимента СОРО рассматривается конвективное течение с числом Рэлея до  $10^{15}$  [2-5]. Поскольку течения, сопровождающие аварии в реакторных установках характеризуются числами Рэлея еще более высоких порядков, значительный интерес представляет собой изучение конвекции при числах Рэлея  $\sim 10^{17}$ . Задачей, перекрывающим область наиболее важную для проблем безопасности ядерных реакторов, является эксперимент BALI.

### Моделирование эксперимента BALI

С целью исследования конвекции тепловыделяющей жидкости при тяжелой аварии реактора PWR во второй половине 1990-х гг. была проведена серия экспериментов BALI [6, 7]. В отличие от экспериментов СОРО, эксперименты BALI моделируют процессы, происходящие при тяжелой аварии в реакторе со сферическим днищем и при более высоких числах Рэлея. Выполнено четыре серии экспериментов в разных условиях и конфигурациях в масштабе длин 1:1. Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 8. Жидкостью, имитирующей расплав, являлся раствор соли в воде, объемный нагрев которого обеспечивали распределенные по всей области электроды. Боковые стенки были теплоизолированными, сферическая граница охлаждалась жидким азотом через прослойку теплоизолятора, что приводило к образованию относительно тонкой корки льда и обеспечивало изотермические граничные условия. В первой серии экспериментов верхняя граница являлась теплоизолированной, во второй серии экспериментов охлаждалась аналогично сферической.

Моделирование проведено в рамках вихреразрешающего подхода LES и RANS-модели EARSM.

Расчетная область соответствовала полной модели экспериментальной установки. Сеточная модель содержала 4,2 млн ячеек, размер ячеек в основной области составлял 0,006 м, размер пристеночной ячейки – 0,0001 м и соответствовала требованию применимости стандартных пристеночных функций с параметром  $y^+$  не выше 5.

Настройки расчета в части схемы, шага по времени и физических параметров жидкости аналогичны настройкам при проведении вычислительного эксперимента СОРО. Расчет проведен до 6000 с физического времени, осреднение основных физических полей проводилось с момента времени 1000 с.

Численное моделирование выполнено для серии экспериментов BALI, в которых присутствовал режим с теплоизолированной верхней стенкой (режим № 1), а также три режима с охлаждаемой верхней стенкой, различным значением энерговыделения. В табл. 2 представлены параметры режимов.

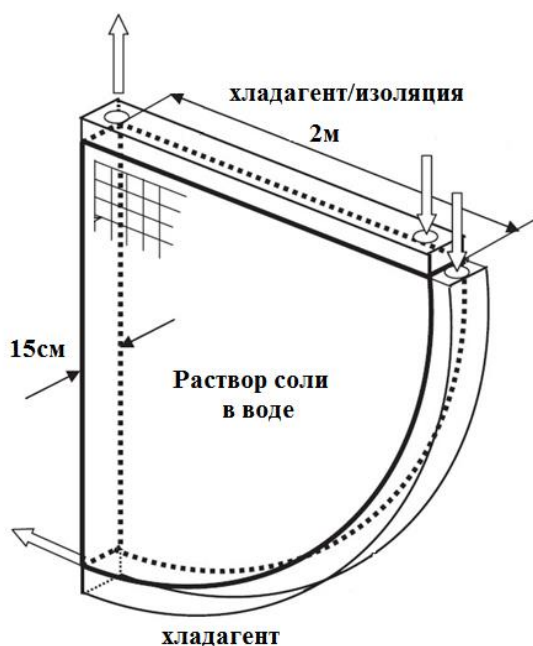


Рис. 8. Схема установки BALI

Таблица 2

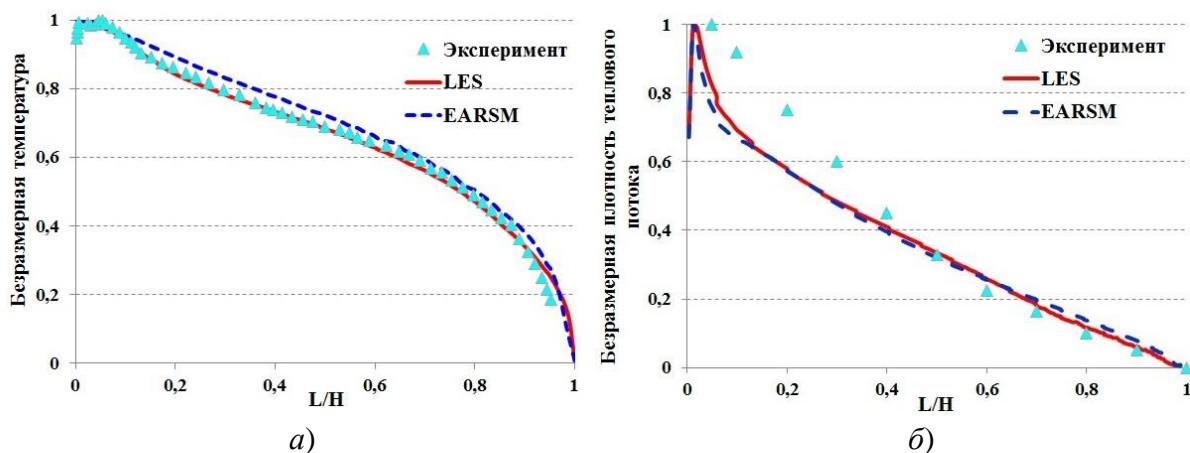
Параметры экспериментальных режимов

Режим №	Режим для верхней стенки	Объемное энерговыделение (кВт/м <sup>2</sup> )	Значение модифицированного числа Рэлея
1	адиабатическая	21,5	$3,6 e^{+16}$
2	T=273K	5	$6,82 e^{+15}$
3	T=273K	21,5	$3,6 e^{+16}$
4	T=273K	42,7	$1,07 e^{+17}$

Выходные параметры по тепловому потоку и температуре приводятся в безразмерном виде. Из графика зависимости безразмерной температуры по высоте канала (рис. 9) видно, что физическая картина для первого расчетного случая, с теплоизолированной верхней стенкой аналогична задаче СОРО. Результаты первой серии численных экспериментов (режим № 1) показывают, что модель турбулентности EARSM с достаточной точностью воспроизводит общий характер конвективного теплообмена в экспериментальной установке BALI. Распределение безразмерной температуры на вертикальной стенке, полученной в ходе расчета, согласуется с экспериментальными данными для LES-модели турбулентности в большей степени, нежели чем для EARSM (рис. 9, а). Распределение безразмерной плотности тепло-

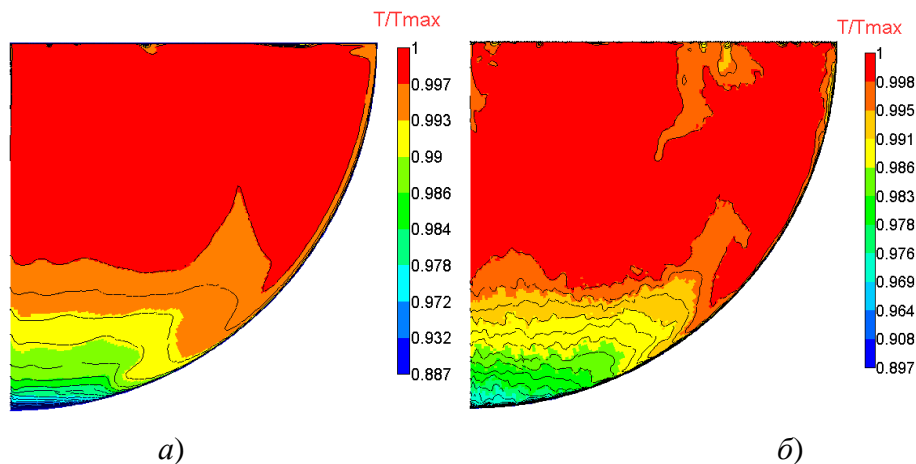
вого потока на охлаждаемой сферической границе хорошо согласуется с опытными данными в верхней части экспериментальной установки, в ее нижней части наблюдается занижение его величины для всех моделей турбулентности (рис. 9, б).

Среднеквадратичная погрешность при измерении теплового потока составляет около 5 % (EARSM), применяется вихререзающая модель, кривая плотности теплового потока при LES моделировании лучше соотносится с экспериментальными данными, среднеквадратичная погрешность результатов составляет около 4 %.



**Рис. 9. Распределение осредненной по времени безразмерной температуры на вертикальной границе (а) и осредненной по времени безразмерной плотности теплового потока на сферической границе (б), режим № 1**

Ниже представлены результаты численного моделирования задачи BALI для режима с охлаждаемой верхней границей (режим № 3). При экспериментальном исследовании наблюдается несколько зон течения: верхний неустойчивый слой однородной температуры, где большую часть занимает зона конвекции Рэля-Бенера; нижняя зона со стратификацией по температуре, при которой жидкость поднимается в центр с низкой скоростью; пограничный слой, где жидкость в контакте со льдом охлаждается и возвращается с высокой скоростью на дно бассейна. Аналогичная картина наблюдается и при численном моделировании, большую часть области занимает зона крупномасштабной конвекции, где локализуются крупные вихревые структуры, теплообмен происходит в режиме высокоразвитой турбулентной конвекции. Для данного режима на рис. 10 представлены мгновенное распределение безразмерной температуры, режим № 3 для EARSM и LES.



**Рис. 10. Мгновенное поле температуры: модель LES (а) и EARSM (б)**



Стратифицированное распределение температуры наблюдается только в нижней части расчетной области, большую часть верхней области занимает зона конвекции Рэля-Бенера и она значительно больше, чем зона, наблюдавшаяся при моделировании эксперимента СОРО: это может быть связано как с геометрией установки, так и с увеличенным значением числа Рэля.

Эксперимент содержит данные по распределению температуры и теплового потока для режима течения с двумя охлаждающимися стенками. На рис. 11 приведены результаты по осредненной плотности теплового потока и распределению безразмерной температуры. Анализ результатов расчета показывает, что модель EARSМ занижает величину теплового потока в верхней части расчетной области, результаты LES лежат ближе к эксперименту. Среднеквадратичное отклонение результатов EARSМ составляет 11 %, LES – 6%.

На рис. 12 представлены результаты численного моделирования трех экспериментальных режимов с охлаждаемой верхней стенкой для режимов № 2, № 3, № 4 в сравнении с аналитической зависимостью числа Нуссельта от модифицированного числа Рэля (модели турбулентности EARSМ и LES).

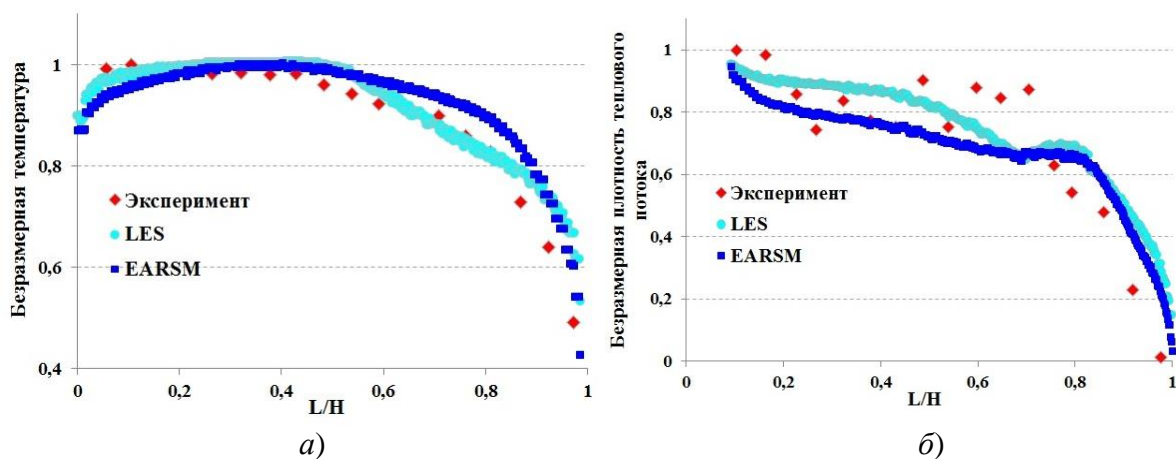


Рис. 11. Распределение осредненной по времени безразмерной температуры по вертикальной границе (а) и распределение осредненной по времени безразмерной плотности теплового потока на сферической границе (б)

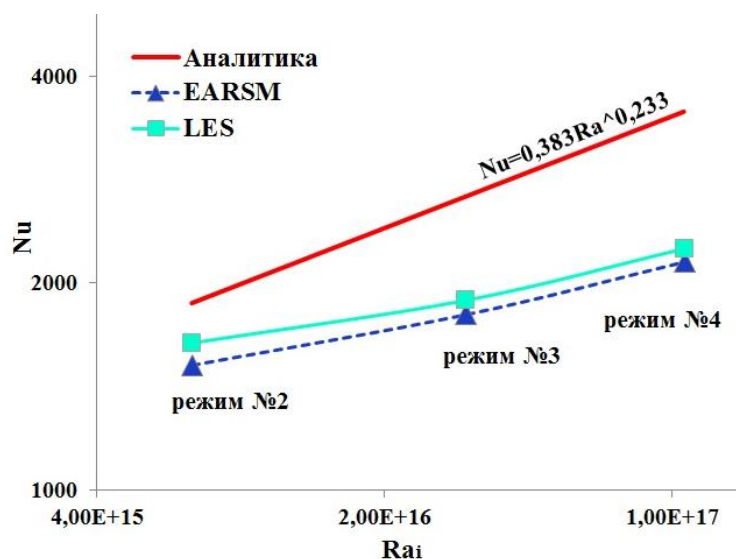


Рис. 12. Зависимости числа Нуссельта от модифицированного числа Рэля

Максимальная погрешность для числа Нуссельта на верхней границе составила около 35 % (EARSМ), результаты с использованием вихреразрешающего подхода лежат ближе

к аналитическому решению, в случае максимальных значений числа Рэлея погрешность составляет 33 %. Численное моделирование качественно соответствует физической картине естественной конвекции. Вследствие высокой разницы температур у верхней стенки возникает крупные вихревые потоки. В нижней части бассейна проявляется устойчивая зона температурной стратификации. Данная картина соответствует течению в экспериментальной установке. Распределение безразмерной температуры на вертикальной границе описывается с достаточной точностью, при этом наибольшие отклонения наблюдаются в центральной области. Расчетное распределение плотности безразмерного теплового потока на охлаждаемой верхней границе описывается с более значительным отклонением от экспериментальных данных.

### Заключение

Численное моделирование процессов турбулентной естественной конвекции продемонстрировано на задачах с различным значением числа Рэлея. Проведено сравнение применения различных подходов к описанию турбулентности. Анализ экспериментальных данных и результатов расчетов показывает, что качественная картина течения при значениях критерия Рэлея до  $10^{17}$  моделируется верно. В случае моделирования конвективного теплообмена в кубической полости при числах Рэлея  $\sim 10^9$ , с экспериментальными данными совпадают, как качественные, так и количественные параметры, характеризующие процесс теплообмена. Показано, что распределение безразмерной температуры и плотности теплового потока по границам не зависит от модели турбулентности и значения критерия Рэлея, что хорошо согласуется с экспериментальными данными, однако количественные характеристики для некоторых режимов имеют существенные отличия. Для экспериментов с тепловыделяющей жидкостью (СОРО и BALI) с теплоизолированной верхней границей влияние применения подходов к моделированию турбулентности не особого велико. Это может быть связано с менее интенсивным внутренним течением, поскольку теплообмен происходит только с одной границей. В рамках данных режимов результаты численного моделирования с достаточной точностью согласуются с результатами экспериментальных исследований. Для задач с двумя охлаждаемыми стенками, где присутствует интенсивная циркуляция жидкости в замкнутой области, занижается величина теплового потока на нижней границе, теплоотдача на верхней границе увеличивается. В различных источниках [3, 18, 19] также отмечается высокая погрешность по величине теплоотдачи при моделировании конвекции ТВЖ, которая возрастает при увеличении числа Рэлея. Это может быть связано с возрастанием влияния допущений, принятых при проведении расчета, поскольку набор исходных данных недостаточен для точного повторения эксперимента с помощью CFD-моделирования. К допущениям относятся отличия в задании свойств жидкости, что влияет на вычисляемые интегральные характеристики, отсутствие точных данных о характере нагрева (принимается равномерное объемное энерговыделение, хотя в эксперименте оно было неоднородным) [19], отсутствуют данные о концентрации раствора соли в воде (задаются свойства чистой воды). Отсутствие точных данных об условиях охлаждения на границах, а также данных о геометрических размерах образовавшейся ледяной корки могут вносить высокую погрешность в итоговый результат. Моделирование ледяной корки представляет серьезную проблему и не позволяет учесть шероховатость поверхности, которая может сильно влиять на коэффициент теплоотдачи. Шероховатая структура способствует дополнительной турбулентности потока и интенсификации теплоотдачи, что не учитывается при проведении численных экспериментов.

В целом, пакет программ ЛОГОС на достаточно высоком уровне воспроизводит теплообмен в ТВЖ при естественной конвекции в условиях высоких чисел  $Ra_i \sim 10^{17}$ . Существенную роль играет выбор подхода к моделированию турбулентности. Для режимов с охлаждаемой верхней границей, когда течение интенсивно, применение вихререшаю-

щей модели LES, как с качественной, так и с количественной стороны уточняет описание процессов естественной конвекции и тепломассопередачи.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке научных исследований молодых российских ученых-докторов наук МД-4874.2018.9 и ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2685.2018.5.*

### Библиографический список

1. **Sehgal, B.R.** Core melt pressure vessel interactions during a light water reactor severe accident (MVI) / B.R. Sehgal, T.N. Dinh, R.R. Nourgaliev, V.A. Bui, J. Green, G. Kolb, A. Karbojian, S.A. Theerthan, A. Gubaidulline // FISA-97-EU research on severe accidents, EC, Luxembourg, 1997. – P. 83-92.
2. **Theofanous, T.G.** Natural convection experiments in a hemisphere with Rayleigh numbers up to  $10^5$  / T.G. Theofanous, C. Liu // Proceedings, 1995 ANS Nat. Conf. on Heat Transfer, Portland, Oregon, 1995. – P. 349-365.
3. **Helle, M.** COPO II-Lo Experiments, IVO Power Engineering LTD, YDIN-GTI-43 / M. Helle, O. Kymalainen, E. Pessa // 4<sup>th</sup> PCRD of the European Community, 1997.
4. **Kymäläinen O.** Heat flux distribution from a volumetrically heated pool with high Rayleigh number / O. Kymäläinen, H. Tuomisto, O. Hongisto, T.G. Theofanous // Nuclear Engineering and Design. – V. 149, 1994. – P. 401-408.
5. **Helle, M.** Experimental data on heat flux distribution from a volumetrically heated pool with frozen boundaries / M. Helle, O. Kymalainen, H. Tuomisto // In-vessel core debris retention and coolability. Workshop proceedings, Garching, Munich, Germany, 1998. – P. 173-183.
6. **Bonnet, J.M.** Thermal hydraulic phenomena in corium pools: the BALI experiment / J.M. Bonnet, J.M. Seiler // Proceedings of the 7th International conference on nuclear engineering, Tokyo, Japan, 1999.
7. **Bernaz, L.** Thermalhydraulic phenomena in corium pools: numerical simulation with TOLBIAC and experimental validation with BALI / L. Bernaz, J.M. Bonnet, B. Spindler, C. Villermaux // In-vessel core debris retention and coolability. Workshop proceedings, Garching, Munich, Germany, 1998. – P. 185-193.
8. **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.
9. **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.
10. **Большухин, М.А.** Об экспериментальных тестах (бенчмарках) для программных пакетов, обеспечивающих расчет теплообменников в атомной энергетике / М.А. Большухин, А.Ю. Васильев, А.В. Будников, Д.Н. Патрушев, Р.И. Романов, Д.Н. Свешников, А.Н. Сухановский, П.Г. Фрик // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т. 5. – № 4. – С. 469-480.
11. **Nourgaliev, R.R.** Modeling and Analysis of Heat and Mass Transfer Processes during in-Vessel Melt Progression Stage of Light Water Reactor (LWR) Severe Accidents / R.R. Nourgaliev. – Stockholm: Royal Institute of Technology, 1998, – 458 p.
12. **Fukasawa, M.** Thermal-hydraulic Analysys for Inversely Statified Molten Corium in Lower Vessel / M. Fukasawa, S. Hayakawa, M. Saito // J. Nuclear Science and Technology. – 2008. – V. 45. – № 9. – P. 873-888.
13. **Abe, K.** A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows – I. Flow field calculations / K. Abe, T.Kondoh // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1994. – V. 37. – № 1. – P. 139-151.
14. **Abe, K.** A new turbulence model for predicting fluid flow and heat transfer in separating and reattaching flows – II. Thermal field calculations / K. Abe, T. Kondoh // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1995. – V. 38. – № 8. – P. 1467-1481.
15. **Козелков, А.С.** Исследование применения RANS-моделей турбулентности для расчета неизотермических течений с низкими числами Прандтля / А.С. Козелков, А.А. Куркин, В.В. Курулин,

- М.А. Легчанов, Е.С. Тятюшкина, Ю.А. Циберева // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2015. – № 4. – С. 44-58.
16. **Menter, F.R.** Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model / F.R. Menter, M. Kuntz, R. Langtry // *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4*, ed: K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, Begell House, Inc., 2003. – P. 625-632.
17. **Menter, F.R.** Zonal two-equation  $k-\omega$  turbulence models for aerodynamic flows / F.R. Menter // *AI-AA Paper 1993-2906*.
18. **Menter, F.R.** Explicit algebraic Reynolds stress models for anisotropic wall-bounded flows / F.R. Menter, A.V. Garbaruk, Y. Egorov // *Proc. of 3rd European Conference for Aero-Space Sciences (EUCASS)*. – Versailles, 2009.
19. **Козелков, А.С.** Моделирование турбулентных течений с использованием алгебраической модели рейнольдсовых напряжений с универсальными пристеночными функциями / А.С. Козелков, В.В. Курулин, О.Л. Пучкова, С.В. Лашкин // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2014. – Т. 7. – № 1. – С. 40-51.
20. **Козелков, А.С.** Зонный RANS- LES-подход на основе алгебраической модели рейнольдсовых напряжений / А.С. Козелков, О.Л. Крутякова, А.А. Куркин, В.В. Курулин, Е.С. Тятюшкина // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. – 2015. – № 5. – С. 24-33.
21. **Козелков, А.С.** Численная схема для моделирования турбулентных течений несжимаемой жидкости с использованием вихреразрешающих подходов / А.С. Козелков, В.В. Курулин // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 2015. – Т. 55. – № 7. – С. 1255-1265.
22. **Deryugin, Yu.N.** Validation Results for the LOGOS Multifunction Software Package in Solving Problems of Aerodynamics and Gas Dynamics for the Lift-Off and Injection of Launch Vehicles / Yu.N. Deryugin, R.N. Zhuchkov, D.K. Zelenskiy, A.S. Kozelkov, A.V. Sarazov, N.F. Kudimov, Yu.M. Lipnickiy, A.V. Panasenko, A.V. Safronov // *Mathematical Models and Computer Simulations*. – 2015. – V. 7. – №. 2. – P. 144-153.
23. **Betelin, V.B.** Mathematical simulation of hydrogen–oxygen combustion in rocket engines using LOGOS code / V.B. Betelin, R.M. Shagaliev, S.V. Aksenov, I.M. Belyakov, Yu.N. Deryugin, A.S. Kozelkov, D.A. Korchazhkin, V.F. Nikitin, A.V. Sarazov, D.K. Zelenskiy // *Acta Astronautica*. – 2014. – V. 96. – P. 53-64.
24. **Kozelkov, A.S.** Landslide-type tsunami modelling based on the Navier-Stokes Equations / A.S. Kozelkov, A.A. Kurkin, E.N. Pelinovsky, E.S. Tyatyushkina, V.V. Kurulin, N.V. Tarasova // *Science of tsunami Hazards*. – 2016. – V. 35. – №. 3. – P. 106-144.
25. **Kozelkov, A.S.** Numerical modeling of the 2013 meteorite entry in Lake Chebarkul, Russia / A.S. Kozelkov, A.A. Kurkin, E.N. Pelinovsky, V.V. Kurulin, E.S. Tyatyushkina // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2017. – V. 17. – P. 671-683.
26. **Козелков, А.С.** Численное моделирование свободного всплытия пузырька воздуха / А.С. Козелков, А.А. Куркин, В.В. Курулин, С.В. Лашкин, Н.В. Тарасова, Е.С. Тятюшкина // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. – 2016. – № 6. – С. 3-14.
27. **Александров, А.А.** Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / А.А. Александров, Б.А. Григорьев. – М.: Издательство МЭИ, 1999, – 167 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 23.05.2019*

S.M. Dmitriev<sup>1</sup>, O.L. Krutyakova<sup>2</sup>, A.S. Kozelkov<sup>1-3</sup>,  
A.A.Kurkin<sup>1</sup>, V.V. Kurulin<sup>2</sup>, D.A. Utkin<sup>2</sup>

**APPLICATION OF SEMIEMPIRIC MODELS OF TURBULENCE  
FOR MODELING OF TURBULENT CONVECTION**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev<sup>1</sup>  
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics<sup>2</sup>  
Sarov Branch Institute of Physics and Technology<sup>3</sup>  
of National Research Nuclear University MEPhI

**Purpose:** In this paper we consider the prospect of using different turbulence modeling approaches as applied to developed convection at high-order Rayleigh numbers.

**Design/methodology/approach:** Physical-mathematical and computational models for the simulation developed convection at height Rayleigh numbers.

**Results:** We demonstrate that the LES eddy-resolving model provides higher accuracy in modeling natural convection at Rayleigh numbers between  $10^9$  and  $10^{17}$  than the RANS turbulence models. This advantage becomes particularly clear for the cases of Rayleigh-Bénard convection, when a large high-intensity convection zone forms at a vertical temperature difference. We demonstrate the performance of the EARSM Reynolds stress model as applied to natural convection flows in regions with dihedral corners and prevailing secondary currents. As applied to lower-intensity convective flows, the differences between the involved turbulence modeling approaches are less significant. We show that the error in determining thermal hydraulic characteristics grows with increase in the Rayleigh number, and it is reasonable to use eddy-resolving turbulence modeling approaches to determine them more accurately.

**Area of applicability:** The obtained results may be useful for the simulation of faded giant.

*Key words:* highly developed convective flow, turbulence modeling, high Rayleigh numbers, Rayleigh-Bénard convection, heat transfer.

УДК 65.012.123

В.Ю. Карпычев

## ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СМАРТ-КОНТРАКТА НА ПЛАТФОРМЕ ETHEREUM

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Функциональное моделирование на основе стандарта IDEF0 – создание графических моделей любой предметной деятельности, включающих иерархическое описание процессов, операций, ресурсов (информации), инструментария, исполнителей, управления и связей между ними. В статье предложена функциональная модель создания и управления смарт-контрактами на платформе Ethereum.

*Ключевые слова:* функциональное моделирование, блокчейн-технологии, смарт-контракты, Эфириум.

### Введение

В настоящее время большое внимание ученых и специалистов в различных областях привлекает блокчейн (БЧ) технология. Принимая во внимание множество определений данного термина, будем рассматривать в настоящей статье блокчейн как «многофункциональную и многоуровневую информационную технологию, предназначенную для надежного учета различных активов» [1]. Одним из актуальных вариантов применения этой технологии является *смарт-контракт* (smart-contract, «умный» контракт, далее – S-контракт). Под этим понятием в настоящей статье понимается специализированное программное обеспечение, содержащее элементы искусственного интеллекта (смарт) и предназначенное для поддержки экономической деятельности в части фиксации некоторых предметных правил, автоматического их исполнения при реализации набора детерминированных условий и хранения данных по исполненным договорам.

Рассмотрим основные функции S-контракта. Для описания его смарт-функции применим следующее определение: средства роботизированной автоматизации процессов (Robotic Process Automation) – «это программные «роботы», использующие правила бизнес-логики для выполнения четко заданных, повторяющихся функций и рабочих процессов точно так же, как это сделал бы человек» [2].

*Блокчейн-технология S-контракта.* Строго говоря, наличие смарт-функционала является необходимым, но недостаточным для такой программы. Полная архитектура S-контракта предполагает также использование технологии распределенного реестра (блокчейна) данных всех транзакций (исполнения обязательств), выполняемых программой. В настоящее время структура и функционал блокчейна рассмотрены достаточно подробно [3]. Цель настоящей статьи – представить работу S-контракта с точки зрения пользователя, сосредоточившись на выполнении S-функций. Для этого предпринята попытка интерпретировать S-технологию в виде функциональной модели методологии / стандарта SADT/IDEF0. В качестве теоретико-методологической основы создания функциональной модели S-контракта использованы работы [4,5]. Методология IDEF0 изложена во многих работах, в качестве первоисточника рекомендуем [6]. Стандарт IDEF0 принят в США [7] и рекомендован Госстандартом России для исследования структуры, параметров и характеристик производственных и организационно-экономических систем [8, 9].

Главными компонентами IDEF0-модели являются диаграммы, графически представляющие структуру функций предметной области, а также информации и объектов, связывающих эти функции. Функции и их интерфейсы представлены как блоки и дуги соответственно. При IDEF0-моделировании производится декомпозиция предметной контекстной (целе-

вой) функции на согласованные и непротиворечивые функции следующего уровня детализации. Предметная функция любого уровня, начиная с контекстной, преобразует входной поток сущностей – физических объектов или информации в выходной. Будем называть такие потоки *Входом* и *Выходом* функции. Для активации функций необходимы *Управление* – воздействие, определяющее условия выполнения функции, и *Механизмы* – средства, непосредственно реализующие функцию. Для поддержки моделирования используются CASE (Computer Aided Software Engineering) средства.

### Характеристика предметной области

В качестве предметной области моделирования будем рассматривать S-технологии как средство поддержки классической договорной деятельности. В соответствии с проектом федерального закона № 419059-7 «О цифровых финансовых активах»: «*смарт-контракт* – договор в электронной форме, исполнение прав и обязательств по которому осуществляется путем совершения в автоматическом порядке цифровых транзакций в распределенном реестре цифровых транзакций в строго определенной таким договором последовательности и при наступлении определенных им обстоятельств».

При таком подходе заключение и исполнение S-контракта можно рассматривать как бизнес-процесс (БП) «Управлять S-контрактом»,  $A_0$ .

### IDEF0-модель

Построение IDEF0-модели БП начинается с контекстной диаграммы,  $A_0$ , описывающей в общем виде работу системы в предметной области рис. 1.

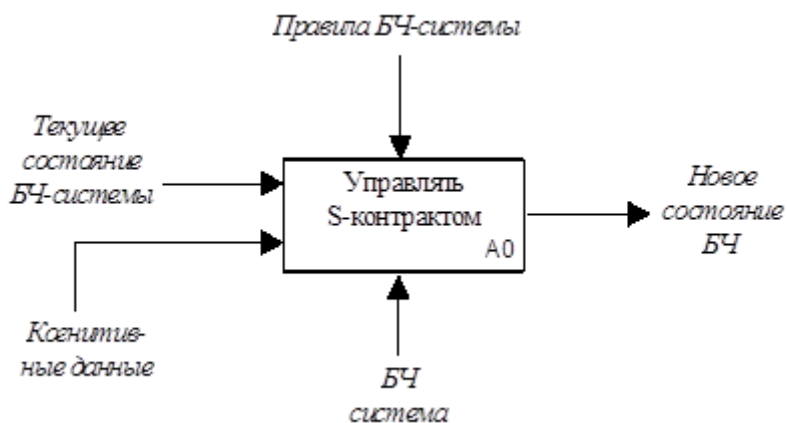


Рис. 1. Контекстная диаграмма БП «Управлять S-контрактом»,  $A_0$

В качестве *Входов* будем рассматривать *Текущее состояние БЧ-системы* и *Когнитивные данные* лица, управляющего S-контрактом. *Выходом* диаграммы является *Новое состояние БЧ-системы* (исполненное условие или завершённый S-договор).

*Управление* сформулируем в общем виде: *Правила БЧ-системы*. *Механизм*: техническим средством поддержки БП  $A_0$ , является БЧ-система – автоматизированная система, основные компоненты которой – вычислительные средства Ethereum, операторы и P2P-сеть, реализованная в интернете, клиенты (Ethereum).

На рис. 2 представлен первый уровень декомпозиции БП  $A_0$ , который можно рассматривать как последовательное достижение двух предметных целей: «Создать S-контракт»,  $A_2$  и «Исполнять S-контракт»,  $A_3$ .

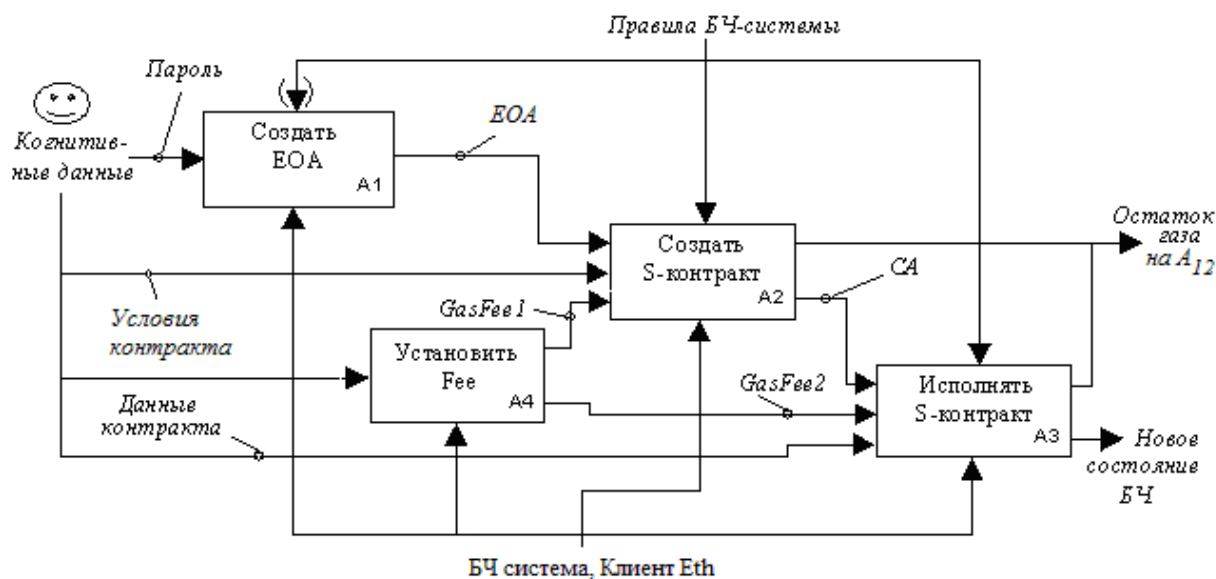


Рис. 2. Декомпозиция БП «Управлять S-контрактом»,  $A_0$

Для реализации пользовательского функционала в Ethereum (создания / использования S-контракта) необходима внешняя учетная запись (Externally owned account, EOA). Создание EOA моделируется процессом «Создать EOA»,  $A_1$ . Также на этой диаграмме представлена функция «Установить Fee»,  $A_4$ , моделирующая процедуры оплаты активности пользователя в Ethereum.

*Управление* и *Механизмы* на этой диаграмме не декомпозированы (не детализированы).

#### Процесс «Создать EOA», $A_1$

EOA используется для создания транзакций<sup>1</sup>, хранения Эфира и управления (взаимодействия) с S-контрактом. Каждая EOA имеет определенное состояние и 20-байтовый адрес (идентификатор), используемый для ее идентификации. Таким образом, создание EOA заключается в формировании получения адреса в адресном пространстве Ethereum. *Входом* функции  $A_1$  является *пароль*, который в дальнейшем используется для разблокировки счета. *Выход* функции  $A_1$  – EOA, содержащая публичный и приватный ключи, баланс Eth. Содержание процесса  $A_1$  раскрывается на его декомпозиции, рис. 3.

Процесс  $A_1$  включает четыре функции.

Функция «Получить адрес»,  $A_{11}$  выполняется средствами клиента Ethereum (кошелек) и состоит в формировании запроса и получении идентификатора (адреса).

Функция «Пополнить счет» ( $A_{12}$ ). Счет должен быть пополнен некоторой суммой Эфириума (Eth), необходимой для оплаты исполнения транзакций. Существуют различные варианты пополнения счета. На диаграмме представлен вариант пополнения с Обменника валют (внесистемный *Механизм* для  $A_{12}$ ). *Входами* функции являются волеизъявление пользователя ☺ и идентификатор счета. Также на вход функции может поступать *Остаток Газа на  $A_{12}$*  от выполнения предшествующих транзакций с EOA.

При детальном моделировании (в статье не проводится) функция  $A_{12}$  также может быть декомпозирована для иллюстрации процедуры пополнения.

Функция  $A_{13}$  – техническая.

Функция «Разблокировать счет»,  $A_{14}$ . Для использования OAE необходимо разблокировать. В качестве *Входов*  $A_{14}$  указываются идентификатор счета, пароль и продолжитель-

<sup>1</sup> Транзакция в Ethereum – это пакет данных, предназначенный для развертывания нового контракта (*Транзакция  $T^0$* ), перемещения эфира из одного счета на другой счет или в контракт (не рассматривается), или вызова метода контракта (*Транзакция  $T^n$* ) [8].



ность разблокировки в секундах,  $t$  (для кошелька MyEtherWallet). Выход  $A_{14}$  – санкция ( $C$ ) на проведение операций со счетом.

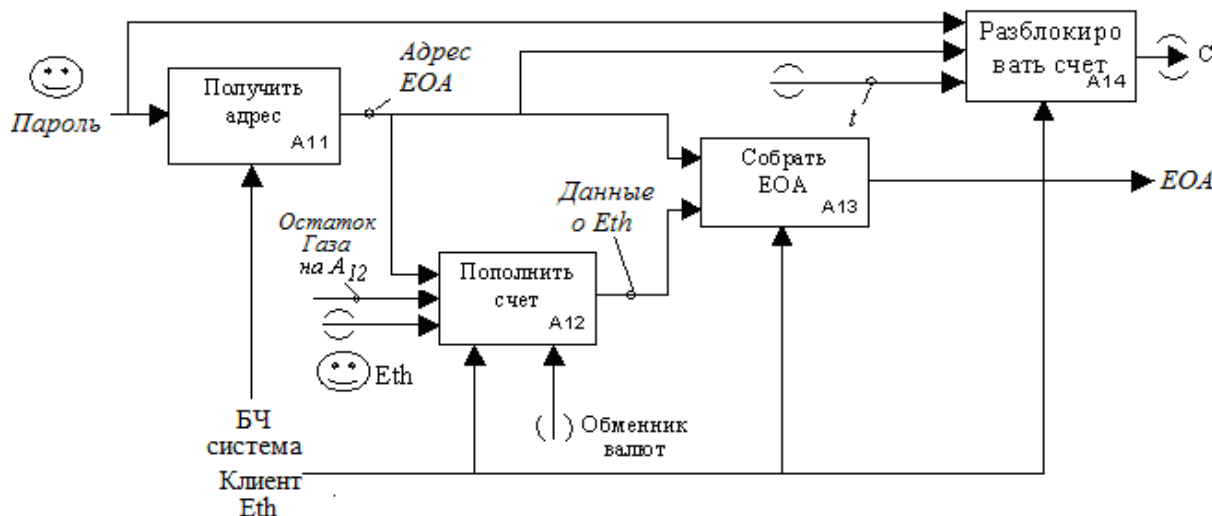


Рис. 3. Декомпозиция процесса «Создать EOA»,  $A_1$

Управление на декомпозиции  $A_1$  представляет стандартные правила работы с Ethereum и его клиентом. Поэтому на рис. 3 оно не показано для улучшения чтения диаграммы. Механизмы декомпозиции  $A_1$  – Ethereum и его клиент (кошелек).

Процесс «Создать S-контракт»,  $A_2$

Декомпозиция процесса «Создать S-контракт» представлена на рис 4.

Функция «Создать исходный код S-контракта»,  $A_{21}$ . Договорные условия предметной области (Вход) программируются на компилируемом языке Solidity. Выходами является Исходный код S-контракта.

Управление – Руководство по объектно-ориентированному, предметно-ориентированному языку программирования Solidity. В качестве средства программирования (Механизм) можно использовать инструмент Remix Solidity IDE.

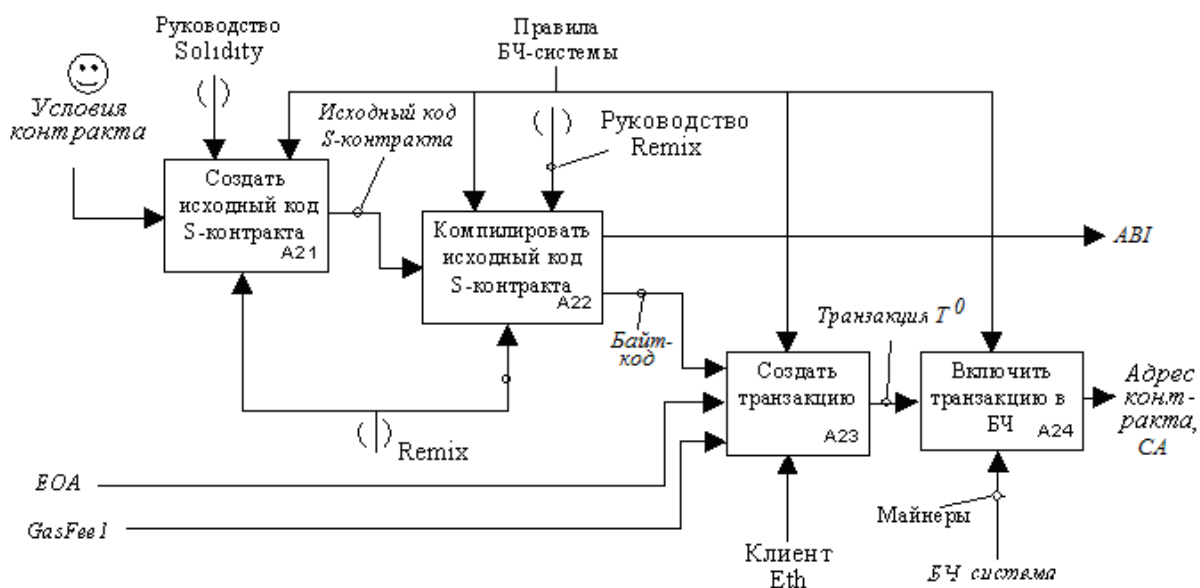


Рис. 4. Декомпозиция процесса «Создать S-контракт»,  $A_2$

Функция «Компилировать исходный код S-контракта»,  $A_{22}$ . Исходный код S-контракта (Вход  $A_{22}$ ) должен быть скомпилирован в байт-код – язык, используемый виртуальной машиной Ethereum (Ethereum Virtule Vachine, EVM). Байт-код S-контракта развертывается в блокчейн.

Для компиляции исходного кода на Solidity также можно использовать онлайн-компилятор Remix Solidity IDE (Механизм и Управление  $A_{22}$ ).

На Выходе  $A_{22}$  также создается бинарный интерфейс приложения (Application Binary Interface, ABI), который необходим для указания вызываемой функции контракта и возвращения данных в ожидаемом формате.

Функция «Создать транзакцию»,  $A_{23}$ . Развертывание (deploy) S-контракта в БЧ осуществляется формированием и исполнением Транзакции «0» (создания). Для этого необходимы полный узел Ethereum или клиент (веб-интерфейс для обращения к полному узлу) и Эфир.

Создание S-контракта производится транзакцией без получателя. Такая транзакция передает байт-код контракта и Газ за исполнение кода создания контракта.

Для оплаты развертывания S-контракта необходимо установить значения *GasLimit* и *GasPrice*. На рис. 4 в качестве одного из входов показана *GasFee 1* (Максимальная комиссия за транзакцию,  $Max\ transaction\ fee = GasLimit \times GasPrice$ ). При недостатке средств (*GasFee 1, 2*) транзакция не выполняется.

Механизмы  $A_{23}$ : БЧ-система и ее клиент.

Функция «Включить транзакцию в БЧ» ( $A_{24}$ ). Транзакция «0» (создания) S-контракта поступает в БЧ-систему, проходит полную обработку Майнерами (Механизм). После исполнения транзакции будет получена «квитанция», содержащая Адрес созданного S-контракта (Contract Account, CA).

Адрес S-контракта определяется в момент его создания (получается из адреса создателя и количества транзакций, отправленных с этого адреса).

Процесс «Исполнять S-контракт»,  $A_3$

Для вызова функций S-контракта, которые меняют его состояние (например, задают значения переменных) должен быть разблокирован кошелек (функция  $A_{14}$ ), создана и направлена в контракт Транзакция  $T^n$ . Транзакция на S-контракт – это вызов его метода. Транзакция, отправленная от ЕОА к СА, предназначена для активации кода СА (исполнения S-контракта). Транзакции обоих видов ( $T^0$  и  $T^n$ ) имеют одинаковые поля и отличаются их значениями, табл. 1 (по [5]).

Таблица 1

#### Элементы транзакций S-контракта

Поле транзакции	$T^0$	$T^n$	Содержание
Nonce	+	+	Уникальный идентификатор транзакции. Количество транзакций, которые были отправлены со счета.
GasPrice	+	+	Стоимость 1 единицы Gas в Wei. Устанавливается отправителем
GasLimit	+	+	Максимальное количество Gas, которое может быть потреблено за проведение данной транзакции. GasLimit задается и оплачивается заранее, прежде чем будут проведены вычисления
TO	0	+	Адрес контракта
Value	+	+	Количество Wei, передаваемых от отправителя к получателю. В транзакциях $T^0$ (создания контрактов) - начальный баланс вновь созданной учетной записи ЕОА
Signature (r, s, v)	+	+	Поля, используемые для создания цифровой подписи, которая идентифицирует отправителя транзакции
Init	Байт-код	-	Поле используется для инициализации вновь созданной учетной записи контракта
Data	-	Data	Входные данные (параметры) для вызова сообщения

Декомпозиция  $A_3$  приведена на рис. 5.

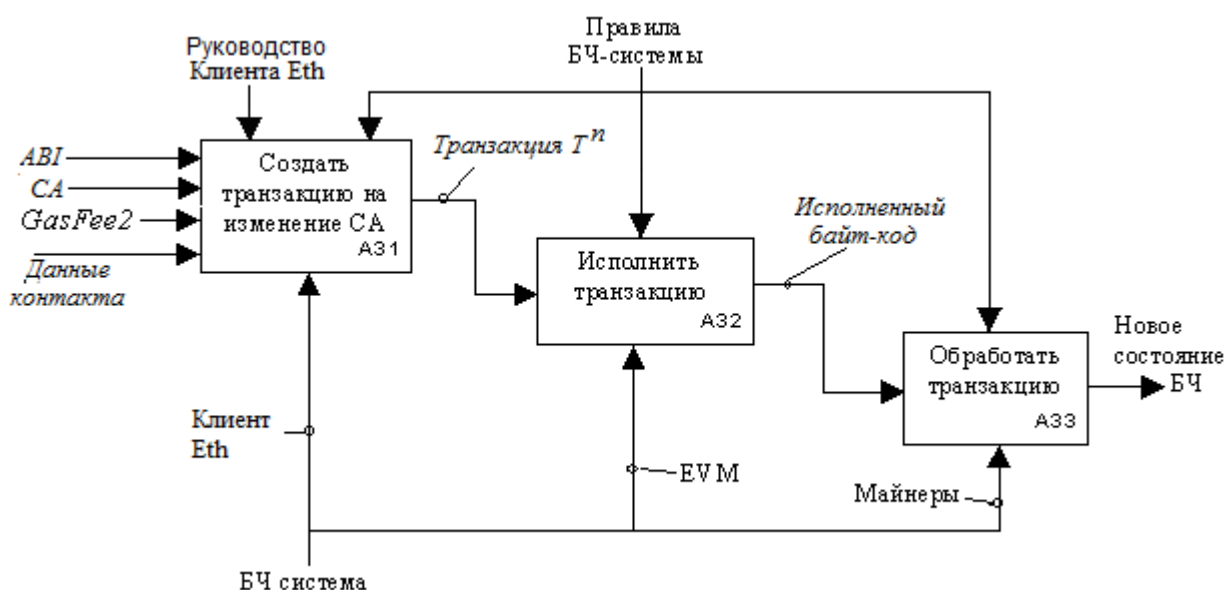


Рис. 5. Декомпозиция процесса «Взаимодействовать с S-контрактом»,  $A_3$

Функция  $A_{31}$  «Создать транзакцию на изменение СА» аналогична функции  $A_{23}$  на создание S-контракта. Отличиями  $A_{31}$  являются наличие адреса S-контракта (Вход CA) и значение  $nonce \neq 0$ . Входы функции  $A_{31}$  приведены на рис. 5. Для взаимодействия с контрактом необходим его *бинарный интерфейс приложения* (Abstract Binary Interface, ABI), который можно получить, скомпилировав исходный код S-контракта,  $A_{22}$ .

Для взаимодействия с созданным S-контрактом используется Eth-клиент (*Механизм*), например, MyEtherWallet.

Функции  $A_{32}$  -  $A_{33}$  – штатные системные функции Ethereum – выполняются с использованием *Механизмов* и под *Управлением* Ethereum.

Функция  $A_{32}$  «Исполнить транзакцию» моделирует в общем виде работу виртуальной машины EVM по исполнению байт-кода S-контракта.

Функция  $A_{33}$  моделирует в работу множества майнеров по включению транзакции в блокчейн.

## Заключение

В представленной модели отражены только основные функции, выполняемые пользователем при создании и взаимодействии с S-контрактом. За пределами детального рассмотрения (декомпозиции) остались «чисто» блок-чейновые функции, например, работа EVM, включение транзакции в новый блок и др. Также необходимо указать на отражение в модели ряда авторских представлений о логике работы S-контракта, в явном виде не описанной в литературе. Важной является вариативность модели в зависимости от используемого Eth-клиента.

Разработанную функциональную модель S-контракта следует в целом рассматривать как первую версию, требующую в соответствии с принципами IDEF0/SADT моделирования итеративной доработки.

**Библиографический список**

1. **Свон, М.** Схема новой экономики / М. Свон. – М.: Олимп-Бизнес, 2016, – 224 с.
2. **Берк, П.** Когда стоит применять программных роботов / П. Берк // ITWeek. – URL: <https://www.itweek.ru/ai/article/detail.php?ID=189893> (дата обращения 18.04.2019).
3. **Карпычев, В.Ю.** Функциональное моделирование (IDEF0) как метод исследования блокчейн-технологии / В.Ю. Карпычев // Труды НГТУ. – 2018. – № 4. – С. 22-32.
4. **Прасти, Н.** Блокчейн. Разработка приложений / Н. Прасти. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – 256 с.
5. **Bashir, I.** Mastering Blockchain / I. Bashir, Packt, 2017, – 531 p.
6. **Марка, Д.А.** Методология структурного анализа и проектирования SADT (Structured Analysis & Design Technique) / Д.А. Марка, К. МакГоуэн. – М.: МетаТехнология, 1993, – 240 с.
7. Integration DEFinition for function modeling (IDEF0). Draft Federal Information Processing Standards Publication 183, 1993 December 21. – URL: <http://idef.com/wp-content/uploads/2016/02/idef0.pdf> (дата обращения 15.04.2019).
8. РД IDEF0-2000. Методология функционального моделирования IDEF0. – М.: Госстандарт России, 2000, – 75 с.
9. Р 50.1.028-2001. Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. – М.: Госстандарт России, 2003, – 50 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 17.09.2018*

**V.Y. Karpychev**

**A FUNCTIONAL MODEL OF SMART CONTRACT  
ON THE ETHEREUM PLATFORM**

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

**Purpose:** Purpose: Development of the client part of a smart contract model using the IDEF0 notation.

**Methodology:** The proposed model of a smart contract is created with the help of SADT / IDEF0, a well-known methodology of structural analysis and design.

**Value:** The proposed model can be used in the development of original smart contracts, as well as in their fundamental research and training.

**Research implications:** Further research consists of the following: extending the model, presenting the structural and parametric characteristics of a smart contract, identifying possible vulnerabilities and limitations of the model, and proposing ways to overcome them.

*Key words:* functional modeling, blockchain technologies, smart contracts, Ethereum.

УДК 004.7.056.5

Н.Г. Лабутин

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН ПО ЗАЩИТЕ ОТ СЕТЕВЫХ АТАК

Приволжский институт повышения квалификации Федеральной налоговой службы

В статье проведен анализ возможностей блокчейн-технологии по защите от основных видов атак в компьютерных сетях. С помощью функциональной модели рассмотрены механизмы, встроенные в блокчейн, позволяющие надежно аутентифицировать участников системы, обеспечить целостность и аутентичность информации, таким образом, защищать ее от подделки и других угроз безопасности информации.

*Ключевые слова:* блокчейн, моделирование процессов, методология IDEF0, целостность и аутентичность информации, электронная подпись, хеширование данных, проверка подлинности.

### Введение

Блокчейн-технология за последние несколько лет обрела большую популярность в различных сферах деятельности человека. Во многом это объясняется использованием принципов децентрализованного обмена данными в распределенных системах, то есть отсутствием посредника, выполняющего функции центра, подтверждающего подлинность участников обмена и передаваемой ими информации [1]. Популярность блокчейн в значительной степени связана также с тем, что она разработана как защищенная технология: в ней применяются, как криптографические способы защиты информации, так и другие способы обеспечения аутентичности, конфиденциальности и целостности информации. Конечно, блокчейн обладает и определенными ограничениями по сравнению с технологиями централизованного обмена. В данной статье не преследуется цель выявления данных позитивных и негативных аспектов; блокчейн-технология рассматривается с позиций защиты информации: функционирование механизмов защиты и предотвращение угроз безопасности информации. В работе представлен вариант анализа механизмов защиты информации, реализованных в блокчейн-системах, который произведен при помощи функционального моделирования IDEF0 [2].

Анализ защитных механизмов блокчейн-технологии важен для определения ее возможностей противостоять известным типам сетевых атак не только в платежных системах, подобных «Биткойн», но и в любых информационных системах с децентрализованным хранением и обработкой данных в компьютерных сетях. Необходимость данного анализа также связана с тем, что, несмотря на большое количество различных данных по рассматриваемой тематике, очень мало источников, в которых представлено формализованное описание работы защитных механизмов блокчейн.

### Анализ защитных механизмов блокчейн при помощи функционального моделирования IDEF0

Заложенные в технологию блокчейн принципы, позволяющие обеспечить целостность и аутентичность данных, передаваемых по сети, могут применяться для защиты информации не только в электронных платежных системах, но и в любых децентрализованных распределенных системах.

Сформулируем основные принципы технологии блокчейн, позволяющие защитить данные участников системы:

- 1) децентрализация хранения данных о транзакциях (децентрализованный реестр транзакций) при использовании технологии одноранговой (P2P) сети;
- 2) использование криптографической защиты информации с помощью электронной подписи транзакций и хеширования транзакций и блоков, с помощью чего достигается надежная аутентификация участников обмена, обеспечение целостности информации в блоках и в цепи блоков;
- 3) практическая невозможность подделки транзакций, сохраненных в цепочке блоков и невозможность, точнее вычислительная сложность подделки цепочки блоков – реестра проведенных операций, так как полная копия текущего реестра сохраняется на всех компьютерах участников сети.

Как на основании этих принципов работают защитные механизмы блокчейн? Для ответа на этот вопрос проанализируем основные процессы в блокчейн-системе (БЧ-системе), направленные на обеспечение безопасности информации в ней. Анализ проведем с использованием функциональных моделей процессов при создании блока и формировании цепочки блоков в БЧ-системе, построенных по методологии IDEF0 [2] и рассмотренных в [3].

Согласно методологии IDEF0, процессы функционирования системы представляются в виде диаграмм, основными элементами которых являются функциональные блоки (функции, процессы). Функциональные блоки должны быть сформулированы как действие, то есть с помощью глаголов и обозначаются в диаграмме прямоугольниками. Каждая сторона прямоугольника играет свою роль: верхняя – управление (управляющее воздействие), нижняя – механизм реализации данной функции, левая – вход, правая – выход. Блоки соединяются интерфейсными дугами, представленными в виде стрелок. Интерфейсная дуга (стрелка) предназначена для отображения элемента системы, который или обрабатывается блоком (вход), или является результатом обработки (выход) или оказывает другое воздействие на функцию, отображенную данным блоком [2].

Модель любой системы представляется сначала в виде основной целевой функции, затем с помощью декомпозиций детализируется до состояния, определяемого разработчиком [2]. На рис. 1 представлена диаграмма с целевой (контекстной) функцией системы, отображающая в общем виде предметную область блокчейн – формирование цепи блоков [3].

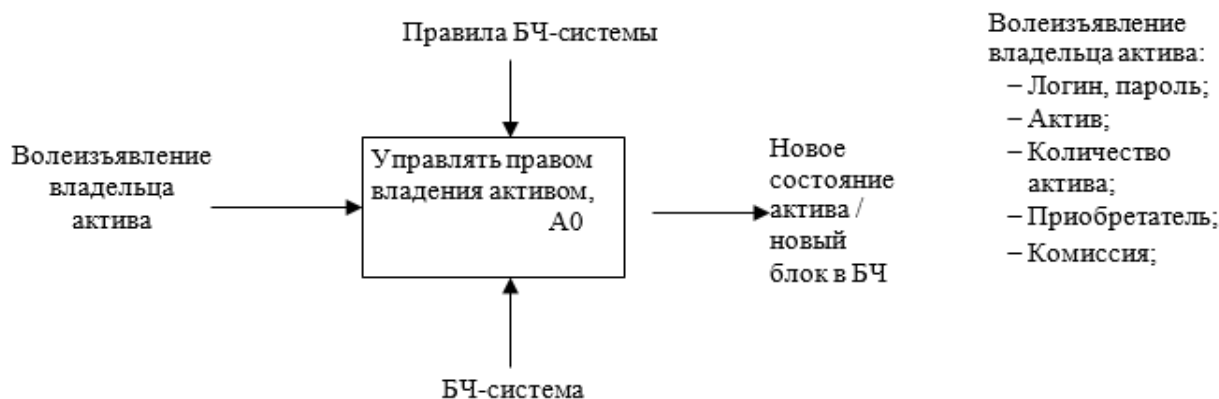


Рис. 1. Контекстная диаграмма функции «Управлять правом владения активом», A0

Проведем декомпозицию функции (процесса) A0 для детализации работы защитных механизмов блокчейн-технологии. Первый уровень декомпозиции представлен на рис.2.

В общем виде декомпозицию целевой функции представим в виде трех процессов:

- «Получить доступ к системе», A1;
- «Подготовить транзакцию для записи в блок», A2;
- «Сформировать блок и добавить его в цепь», A3.

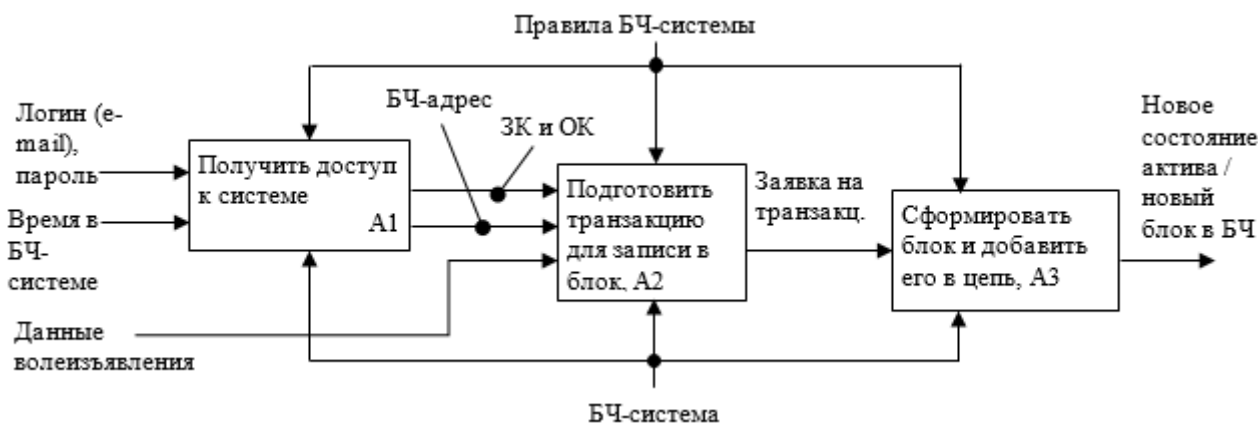


Рис. 2. Декомпозиция целевой функции БЧ-системы, A0

Для получения доступа к активам пользователя и действиям, предоставляемым БЧ-системой, необходимо сначала зарегистрировать пользователя. Декомпозиция функции (процесса) «Получить доступ к системе», A1 может быть представлена в виде двух процессов: «Зарегистрировать нового пользователя в системе», A11 и «Авторизоваться в системе», A12 (рис. 3).

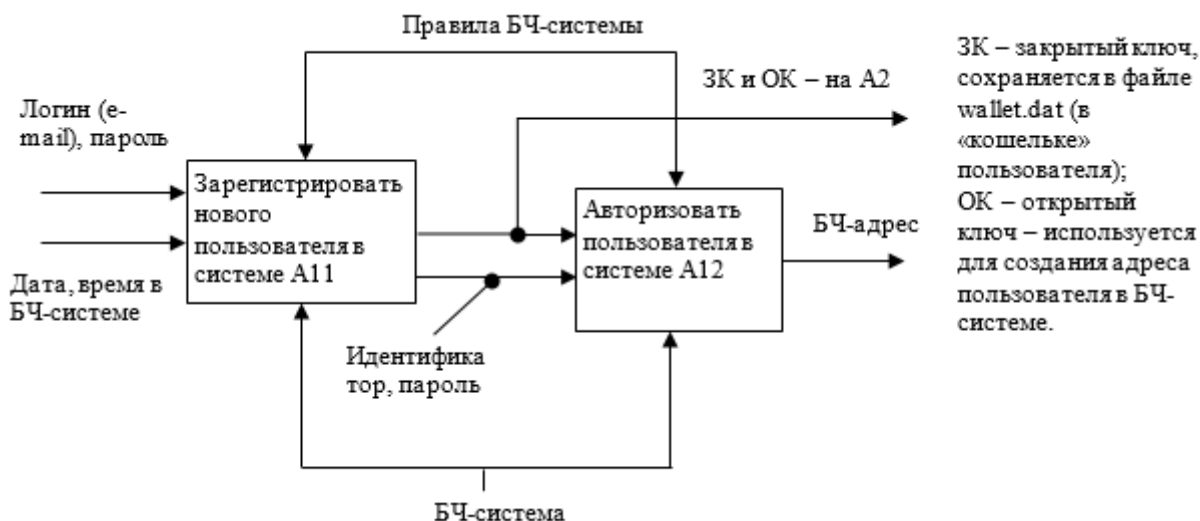


Рис. 3. Декомпозиция функции «Получить доступ к системе», A1

Регистрация нового пользователя является необходимым процессом в работе блокчейн-системы (БЧ-системы), так как при регистрации формируется пара криптографических ключей, являющихся основой криптографической защиты информации, используемой в БЧ-системе.

Для обеспечения аутентичности и целостности данных пользователей в системе применяется асимметричная криптография, основанная на паре ключей. Для каждого пользователя асимметричной криптосистемы должна быть создана уникальная пара ключей: открытый (публичный) и закрытый (приватный), которые связаны между собой математическими зависимостями таким образом, что к закрытому ключу (ЗК) может подойти только открытый ключ (ОК) из этой пары.

Закрытый (секретный) ключ применяется для:

- доступа к своим активам (в Биткоине – для доступа к электронному кошельку);
- постановки криптографической электронной подписи (ЭП) в заявке на транзакцию.

ЭП подтверждает подлинность авторства заявки на транзакцию, то есть подтверждает факт того, что заявка на транзакцию составлена именно тем участником, который поставил подпись. ЗК также обеспечивает защиту доступа к своим активам (кошельку), так как к кошельку можно получить доступ только по ЗК данного пользователя, с которым ассоциирован кошелек при его создании в системе.

ОК используется для проверки ЭП, а также для формирования адреса узла в БЧ-системе. Как формируются криптографические ключи пользователей БЧ-системы? Представим этот процесс в виде диаграммы A11, являющейся декомпозицией процесса A1 (рис. 3).

Процесс «*Зарегистрировать нового пользователя в системе*», A11 описывает действия, осуществляемые при регистрации пользователя в БЧ-системе, например, в системе Биткойн – во время создания биткойн-кошелька. При этом в БЧ-системе происходит генерация пары криптографических ключей и из них формируются идентификатор пользователя для входа в систему и адрес кошелька.

На входы процесса A11 поступают:

- логин, как правило, в различных БЧ-системах это e-mail;
- пароль, созданный пользователем;
- дата, время в БЧ-системе.

*Выходами* процесса A11 является пара ключей данного пользователя: ЗК и ОК, а также идентификатор (имя пользователя) для входа в систему (для доступа к кошельку). Таким образом, БЧ-система переходит в новое состояние, при котором в P2P-сети появился новый узел. ЗК и ОК используются в дальнейшем для создания и проведения транзакции от имени пользователя – владельца пары ключей. ЗК используется для постановки электронной подписи на заявку на транзакцию, ОК, точнее вычисленный хеш ОК передается вместе с транзакцией для проверки электронной подписи.

*Управляющие воздействия* на диаграмме процесса обозначены в общем виде как правила БЧ-системы. *Механизм*, используемый в процессе обозначим «БЧ-система», под которой понимается совокупность вычислительных устройств и пользователей вычислительных устройств, объединенных в одноранговую (P2P) сеть. Пользователя, зарегистрированного на вычислительном устройстве, будем называть узлом сети блокчейн.

*Описание процесса:* при регистрации в системе, новый пользователь предоставляет системе следующие данные: адрес электронной почты, пароль и подтверждение пароля. По этим данным генерируется пара ключей. Пара ключей состоит из закрытого ключа (ЗК) и открытого ключа (ОК). ЗК надежно хранится у пользователя системы (в Биткойн – в кошельке) и никому не предоставляется, ОК является публичным, он используется для проверки ЭП, из него с помощью хеш-функции вычисляется *адрес пользователя*. После регистрации в системе (создания кошелька) на почтовый адрес пользователя приходит письмо со ссылкой, по которой надо перейти для верификации пользователя, и его персональным идентификатором, который в дальнейшем будет использоваться для входа в систему – подключения к кошельку, то есть в качестве имени пользователя в системе. Таким образом, учетной записью для входа в систему служит связка «персональный идентификатор – пароль»; пароль выбирается пользователем при регистрации в БЧ-системе.

Процесс «*Авторизовать пользователя в системе*», A12 происходит по персональному идентификатору в качестве имени пользователя и паролю (*входы* процесса), который задавался при регистрации. *Выходом* процесса A12 является *БЧ-адрес пользователя*, по сути – учетные данные пользователя, используемые для адресации пользователя в БЧ-сети и перевода активов на его кошелек. После авторизации в системе пользователю доступен его кошелек с закрытым ключом и возможностью переводить активы другим пользователям, то есть создавать заявки на транзакции. Так как в системе блокчейн используется одноранговая сеть, то новый пользователь сети становится полноправным членом системы сразу после его авторизации в БЧ-системе.



Результатом процесса «Получить доступ к системе»,  $A1$  является то, что у пользователя системы (владельца актива) сформированы закрытый и открытый ключи и он авторизован в системе, он может инициировать транзакции, то есть создавать заявки на транзакции, которые затем должны быть проверены другими пользователями БЧ-системы для включения их в блок для дальнейшего формирования цепочки блоков (блокчейн). С помощью процесса «Получить доступ к системе»,  $A1$  в БЧ-системе обеспечивается важный защитный механизм – предотвращение несанкционированного доступа к активам пользователя.

*Транзакцией* в блокчейн будем называть процедуру передачи актива, подтвержденную участниками БЧ-системы, по сути, являющуюся записью в децентрализованном реестре всех действий, производимых в системе с начала ее работы. Под *заявкой на транзакцию* будем понимать оформленное по правилам БЧ-системы волеизъявление владельца актива на его передачу новому владельцу, которое требует дальнейшей проверки участниками БЧ-системы для включения его в блок.

Процессы, моделирующие действия по формированию заявки на транзакцию, ее проверку для включения в блок и формирования цепочки блоков в БЧ-системе, с использованием функционального моделирования IDEF0 подробно описаны в [3], в данной статье детализацию этих процессов произведем только до уровня, необходимого для понимания работы механизмов защиты информации в БЧ-системе.

Подлинность и неотрекаемость инициатора транзакции, целостность и валидность транзакции проверяется всеми участниками (пользователями) БЧ-системы, у которых имеется экземпляр всей цепи (полные узлы), с помощью криптографической электронной подписи и открытого ключа ее владельца. Сформированная инициатором заявка на транзакцию широкоэвентальным запросом транслируется в P2P-сети блокчейн и становится доступной для ее проверки всеми участниками системы.

Чтобы лучше понимать процесс формирования и проверки транзакции, рассмотрим упрощенную структуру транзакции с одним входом (input) и одним выходом (output), а также связи между предшествующей, текущей и следующей транзакциями.

В каждую транзакцию включены следующие параметры:

- Previous tx=Hx – хеш предыдущей транзакции, из которой берется актив для текущей транзакции;
- Index – номер выхода предыдущей транзакции, для наглядности *Previous tx u Index* вместе будем называть *ссылкой на транзакцию*;
- ScriptSig- PKx – открытый ключ создателя текущей транзакции;
- ScriptSig- Sigx – ЭП текущей транзакции, созданная на ЗК создателя данной транзакции;
- Value – сумма (количество актива);
- ScriptPubKey- Ax – адрес получателя актива текущей транзакции, представляющий хеш его ОК;
- ScriptPubKey-правила – скрипт на языке БЧ-системы.

Значения параметров ScriptSig и ScriptPubKey участвуют в проверке валидности транзакции. В простейшем виде эта проверка заключается в следующем: если текущая транзакция указывает на «правильную» предыдущую транзакцию, то в результате выполнения скрипта над ScriptSig и ScriptPubKey получится значение «Истина», что означает равенство хеша ОК, указанного в текущей транзакции, и хеша ОК в параметре ScriptPubKey предыдущей транзакции.

Для моделирования процесса формирования заявки на транзакцию с ЭП, представим декомпозицию процесса «Подготовить транзакцию для записи в блок»,  $A2$  (рис. 4), состоящего из трех процессов:

- «Сформировать заявку на транзакцию»,  $A21$ ;
- «Подписать ЭП заявку на транзакцию»,  $A22$ ;
- «Записать заявку на транзакцию в мемпул»,  $A23$ .

Описание процесса «Сформировать заявку на транзакцию», A21. Входами процесса являются:

- данные волеизъявления – информация, указываемая владельцем актива в клиентской программе для доступа к активам БЧ-системы, например, в кошельке Биткоин: сумма перевода, из каких «поступлений» он хочет осуществить перевод;
- БЧ-адрес получателя – адрес получателя в БЧ-системе, например, в Биткоин – это хеш от ОК получателя;
- ОК владельца – открытый ключ владельца актива, который добавляется в транзакцию в параметр ScriptSig;
- системное время – текущее время БЧ-системы, необходимо для привязки транзакции к системному времени и фиксации хронологии действий в системе.

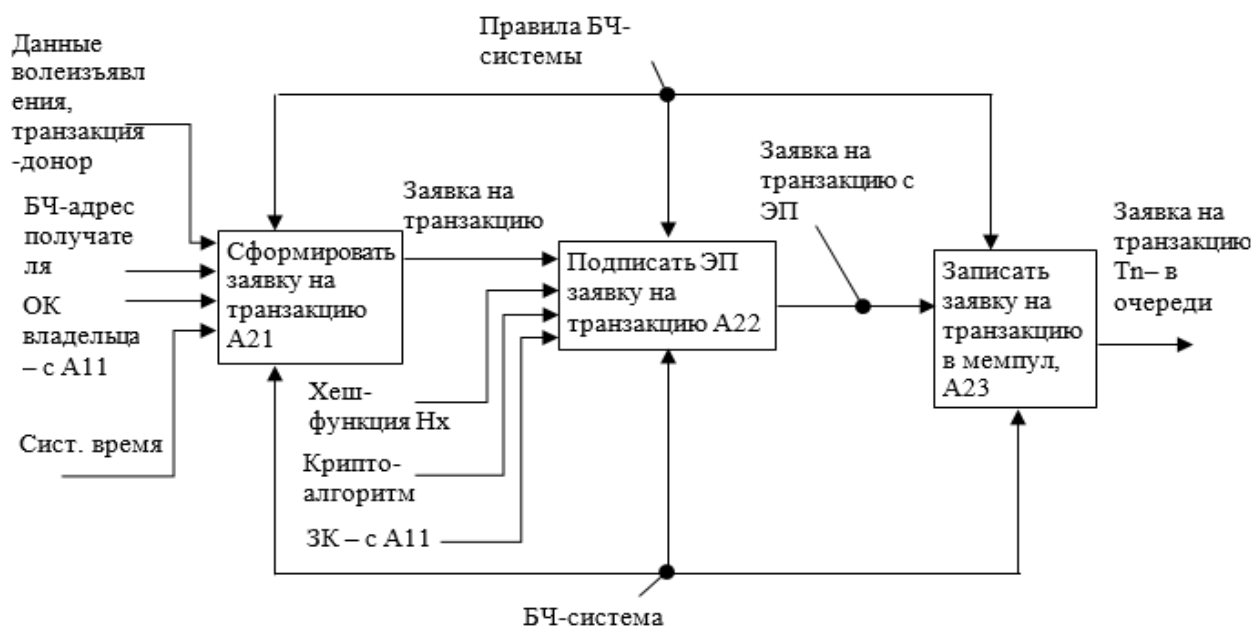


Рис. 4. Декомпозиция процесса «Подготовить транзакцию для записи в блок», A2

Выходом процесса A21 является заявка на транзакцию без электронной подписи в параметре ScriptSig. Разделение процесса A2 на два процесса: «Сформировать заявку на транзакцию», A21 и «Подписать ЭП заявку на транзакцию», A22 выполнено для наглядности работы криптографических защитных механизмов.

Управляющие воздействия на рис.4 обозначены как «Правила БЧ-системы», механизм процесса – «БЧ-система». Заявка на транзакцию формируется под управлением функционала программного обеспечения, которое применяется пользователем БЧ-системы.

Декомпозиция процесса «Подписать ЭП заявку на транзакцию», A22 представлена на рис.5.

Описание процесса A22:

На входы процесса «Вычислить хеш заявки на транзакцию», A221 поступает заявка на транзакцию без ЭП и хеш-функция Hx, применяемая в БЧ-системе, как правило, это SHA-256, SHA-512 или иная. На этой хеш-функции вычисляется хеш-транзакции, которая является уникальным для данной транзакции.

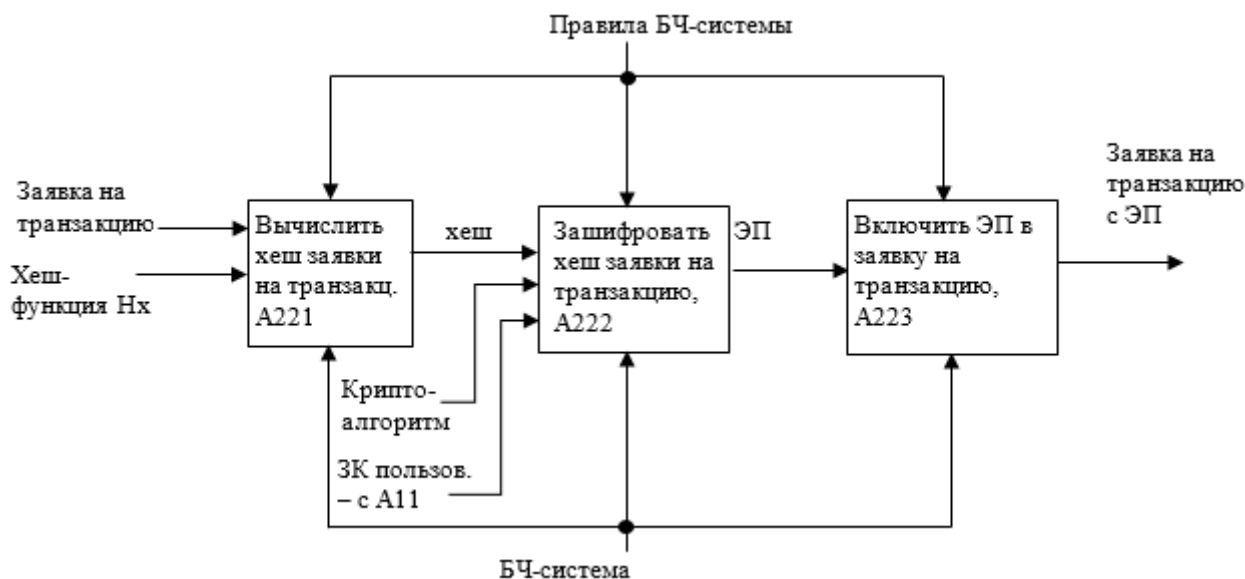


Рис. 5. Диаграмма процесса «Подписать ЭП заявку на транзакцию, A2»

Хеш-функции широко используются в БЧ-системах по нескольким причинам:

- любая хеш-функция необратима, это значит, что по известному хешу задача нахождения исходных данных является вычислительно сложной, то есть это практически невозможно;
- хеш-функция формирует хеш-данные строго фиксированного размера, независимо от размера исходных данных, причем хеш намного меньше самих данных;
- хеш-функция создает уникальный хеш для каждого блока исходных данных, при мельчайшем изменении этих данных значение хеша радикально изменяется;
- эти три свойства хеш-функции определили их использование для защиты данных в БЧ-системах.

Выходом процесса A221 является вычисленный с помощью функции хеширования  $Hx$ -хеш заявки на транзакцию. Далее с помощью процесса «Зашифровать хеш-заявки на транзакцию», A222 хеш зашифровывается на закрытом ключе пользователя, осуществляющего данную транзакцию, с помощью встроенного в БЧ-систему криптоалгоритма. Как правило, используется алгоритм AES, но это может быть любой надежный алгоритм асимметричного шифрования.

Выходом процесса A222 является ЭП заявки на транзакцию.

Созданная ЭП поступает на вход процесса «Включить ЭП в заявку на транзакцию», A223. Выходом данного процесса является заявка на транзакцию с электронной подписью владельца актива-инициатора данной транзакции. Подписанная заявка на транзакцию автоматически распространяется в одноранговой сети, каковой является БЧ-система.

Все узлы одноранговой сети, на которых имеется полная копия цепочки блокчейн, получают подписанную заявку на транзакцию и сохраняют ее в *мемпуле* – распределенной между узлами сети области памяти, предназначенной для хранения непроверенных транзакций. В результате выполнения процесса «Записать заявку на транзакцию в мемпул», A23 заявка на транзакцию с ЭП передается в мемпул, где ожидает своей очереди на дальнейшую обработку и включение ее в блок.

В результате анализа процесса «Подготовить транзакцию для записи в блок», A2 с помощью моделирования IDEF0 становится очевидным тот факт, что подделать транзакцию в БЧ-системе фактически невозможно, то есть в БЧ-системе обеспечена защита от сетевых атак, связанных с модификацией данных.

Фактическая невозможность подделки транзакций вытекает из того, что все транзакции каждого участника системы взаимосвязаны между собой с помощью хеширования и выстраиваются в цепочку, проверенную всеми полными узлами БЧ-сети. Все проведенные транзакции хранятся в блоках, которые также защищены с помощью хеширования. Децентрализация блокчейна также значительно снижает вероятность фальсификации хранимых данных. Для модификации данных в централизованных системах злоумышленники обычно атакуют сервера или майнфреймы, на которых хранятся данные системы. В блокчейне это практически невозможно.

Подписанная заявка на транзакцию поступает на вход процесса «Сформировать блок и добавить его в цепь», АЗ, декомпозиция которого представлена на рис.6 для понимания работы защитных механизмов по обеспечению аутентичности и целостности транзакции при добавлении ее в блок.

На рис. 6 и далее стрелки, обозначающие управляющие воздействия в виде правил БЧ-системы, не отображены для того, чтобы не загружать диаграмму.

Из *мемтула* заявка на транзакцию выбирается узлами БЧ-системы, называемыми майнерами, которые одновременно проверяют ее на аутентичность и валидность. Заявка считается проверенной, если ее проверили и подтвердили не менее определенного количества майнеров. Это количество определяется параметрами БЧ-системы. Например, в Биткоин оно равно 6. Таким образом, обеспечивается фактическая невозможность подделки транзакции.

Если заявка на транзакцию проходит проверку, то она включается в текущий блок в качестве транзакции. Основной задачей майнера является формирование блока определенного формата, в качестве записей которого выступают проверенные транзакции.



Рис. 6. Декомпозиция процесса «Сформировать блок и добавить его в цепь, АЗ

При выполнении процесса «Проверить семантику заявки на транзакцию», А31 осуществляется проверка семантической корректности заявки на транзакцию, которая заключается в проверке формата заявки и ее верификации. Верификация заключается в проверке выполнения следующих правил БЧ-системы:

- количество передаваемого актива не должно превышать количество актива, взятого из источника, или некоторого значения;

- количество передаваемого актива не должно превышать некоторого значения за определенное время;
- количество транзакции данного пользователя не должно превышать установленного значения и т.д.

Выходом процесса A31 является команда «Семантика корректна», которая будет являться управляющей для процессов «Проверить валидность заявки на транзакцию», A32 и «Включить транзакцию в блок», A33.

После семантической проверки заявки на транзакцию, т.е. ее верификации, для включения в блок майнер осуществляет валидацию – проверяет ЭП инициатора данной транзакции. Такие проверки происходят одновременно на всех узлах-майнерах БЧ-системы, на каждом из которых хранится свой экземпляр цепи блокчейн. И только блок того майнера, который первый решит вычислительно сложную задачу формирования нового блока, будет добавлен в цепочку блокчейн. Остальные блоки будут игнорированы системой.

Описание процесса «Проверить валидность заявки на транзакцию», A32.

Входами являются: заявка на транзакцию с открытым ключом инициатора заявки на перевод актива, а также хеш-функция, встроенная в БЧ-систему.

С помощью процесса A32 рассмотрим одну из важнейших функций механизма проверки аутентичности и валидности транзакции, происходящей с помощью проверки ЭП владельца актива, на узле майнера. Декомпозиция процесса «Проверить валидность заявки на транзакцию», A32 представлена на рис.7.

В данном случае, ЭП обеспечивает несколько защитных функций:

- подтверждает подлинность владельца актива, осуществляющего данную транзакцию;
- обеспечивает неотрекаемость подписанта от подписанной им транзакции;
- обеспечивает целостность подписанной транзакции.

Выходом процесса «Проверить валидность заявки на транзакцию», A32 является управляющая команда «Транзакция валидна», которая является разрешающей для выполнения процесса «Включить транзакцию в блок», A33.

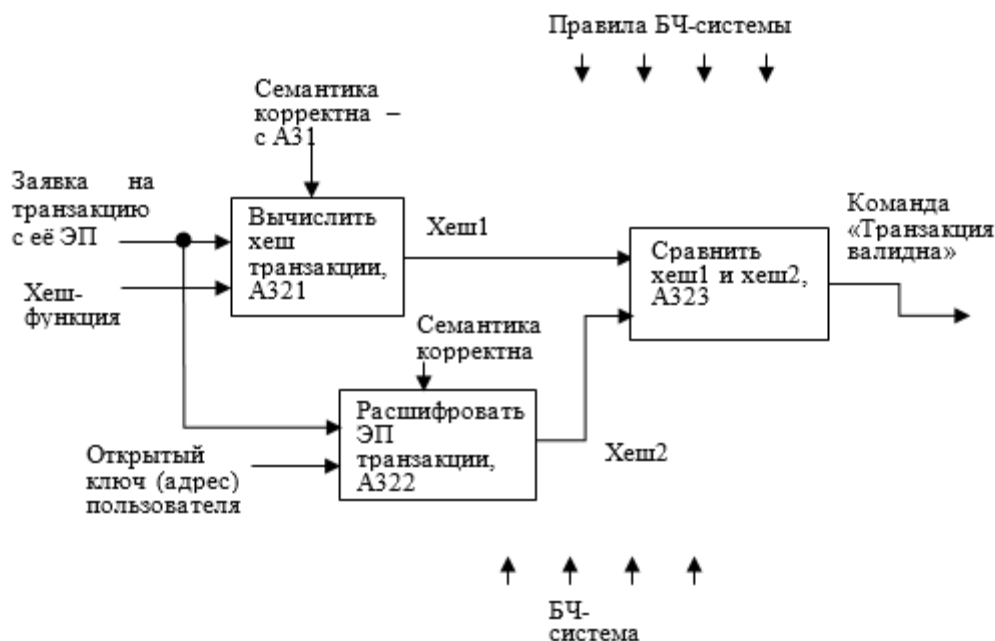


Рис. 7. Диаграмма процесса «Проверить валидность заявки на транзакцию», A32

При выполнении процесса «Включить транзакцию в блок», A33 осуществляется формирование блока, состоящего из заголовка и определенного, заданного правилами

БЧ-системы, количества транзакций. При этом данные о транзакциях защищаются с помощью криптографических функций хеширования следующим образом. *Входом* процесса А33 является очередная проверенная транзакция, *управляющими воздействиями*, кроме правил БЧ-системы, служат разрешающие команды «Семантика корректна» и «Транзакция валидна». *Выходом* процесса А33 является очередной сформированный блок, который добавляется в цепочку по правилам БЧ-системы. Правила добавления блока в БЧ-системе в рамках данной статьи не рассматриваются.

Описание процесса «Включить транзакцию в блок», А33.

После добавления каждой новой транзакции в блок майнер вычисляет хеш – контрольную сумму от всех транзакций по специальному алгоритму, называемому деревом Меркла. Для вычисления хешей используется одна из популярных хеш-функций, например, SHA-512. По этому алгоритму сначала вычисляются хеши от каждой транзакции в блоке, затем вычисляются хеши от пар хешей и так до тех пор, пока не будет сформирован один общий хеш всех транзакций.

Хеш по дереву Меркла (Merkle Root) пересчитывается каждый раз после добавления очередной транзакции. Пустой блок, в который по мере поступления добавляются транзакции, предварительно создается майнером.

Наиболее интересными с позиций анализа работы защитных механизмов БЧ параметрами и данными блока являются следующие.

1. Хеш открытого ключа майнера, являющийся его адресом.
2. Транзакции.
3. Метка времени и рост блока, которые, по сути, идентифицируют блок, то есть являются номером блока.
4. Хеш всего блока (Hash).
5. Хеш от предыдущего блока – последнего на данный момент времени в цепочке блоков (Previous Block).
6. Хеш, вычисленный от всех транзакций в текущем блоке по дереву Меркла.
7. Bits – параметр, от которого зависит сложность расчета, по специальной формуле из него высчитывается максимально возможный хэш блока и, по правилам системы, принимается только тот блок, хэш которого меньше этого значения.
8. Nonce – параметр, который вычисляют майнеры с помощью сложных расчетов: он обеспечивает вычислительную сложность подделки блока.

Анализ структуры блока и процесса его формирования А33 показывает, что с помощью хеша транзакций и хеша всего блока обеспечивается взаимосвязь и целостность информации в блоке: хеш всего текущего блока вычисляется от хеша транзакций по дереву Меркла, хеша предыдущего блока и служебных параметров текущего блока. При любой несанкционированной модификации данных, хранящихся не только в текущем блоке, но и в предыдущих блоках, хеши также изменятся, что сразу будет определено всеми участниками БЧ-системы. Эти особенности БЧ-системы с успехом защищают от сетевых атак типа «человек посередине» [4].

В результате выполнения процесса «Добавить блок в цепочку», А34 очередной блок добавляется к цепи, продублированной на каждом полном узле БЧ-системы. Так как одинаковые экземпляры БЧ хранятся на разных узлах сети и регулярно синхронно перезаписываются при добавлении нового блока, то организовать атаку типа «отказ в обслуживании» [5] на ресурсы БЧ-системы весьма проблематично, фактически невозможно. Действительно, количество полных узлов в сети БЧ исчисляется тысячами и десятками тысяч, например, в сети Биткойн около 10 тыс. полных узлов [6]. Заблокировать одновременно несколько тысяч полных узлов в сети блокчейн, в настоящее время представляется нереальным.

## Заключение

Представленная в статье функциональная модель, по мнению автора, наглядно отображает принципы работы защитных механизмов БЧ-системы, но не претендует на завершённое решение. Моделирование процессов, используемых для защиты информации в БЧ, произведено с точки зрения автора и по тем описаниям блокчейн-технологии, которые были доступны автору статьи. Проведенный при помощи моделирования IDEF0 анализ защитных механизмов блокчейн-технологии позволил сделать выводы о возможности ее применения для защиты от наиболее распространенных в настоящее время сетевых атак, таких как: «распределенный отказ в обслуживании», «подмена или модификация данных», «человек посередине».

Применяемые в блокчейн способы криптографической защиты информации: электронная подпись, хеширование – не новы. Они широко применяются в различных централизованных системах, например, в виртуальных частных сетях организаций, в современных клиент-серверных банковских и платежных системах и т.д. Но, в отличие от них, в блокчейн-системах нет необходимости в едином центре управления ключевой информацией участников сети, который должен быть в любой централизованной системе, защищенной с помощью криптографии. Таким образом, значительно упрощается криптографическая система без снижения ее защищённости. Следует отметить, что применение в блокчейн в комплексе криптографических механизмов защиты и структурных решений децентрализованной обработки данных позволяет достигнуть высокой защищённости информации.

Предполагается, что рассмотрение темы защиты информации при помощи технологии блокчейн будет продолжено автором в следующих публикациях.

## Библиографический список

1. **Лелу, Л.** Блокчейн от А до Я. Все о технологии десятилетия / Л. Лелу. – М.: Эксмо, 2018, – 256 с.
2. Integration DEFinition for function modeling (IDEF0). Draft Federal Information Processing Standards Publication 183, 1993 December 21. – URL: <http://idef.com/wp-content/uploads/2016/02/idef0.pdf>. (дата обращения 19.02.2019 г.).
3. **Карпычев, В.Ю.** Функциональное моделирование (IDEF0) как метод исследования блокчейн-технологии / В.Ю. Карпычев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2018. – № 4 (123). – С. 22-32.
4. **Иванов, О.** Все об атаке «Человек посередине» (Man in the Middle, MitM). – URL: [https://www.anti-malware.ru/analytics/Threats\\_Analysis/man-in-the-middle-attack](https://www.anti-malware.ru/analytics/Threats_Analysis/man-in-the-middle-attack) (дата обращения 29.03.2019 г.).
5. DOS и DDoS-атаки: понятие, разновидности, методы выявления и защиты. – URL: <https://compconfig.ru/net/dos-i-ddos-ataki.html> (дата обращения 29.03.2019 г.).
6. **Дрешер, Д.** Основы блокчейна: вводный курс для начинающих в 25 небольших главах / Д. Дрешер. – М.: ДМК Пресс, 2018, – 320 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 09.04.2019*

**N.G. Labutin**

**ANALYSIS OF OPPORTUNITIES OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY  
ON PROTECTION AGAINST NETWORK ATTACKS**

Volga institute of advanced training of the Federal Tax Service

**Purpose:** the analysis of protective mechanisms a blockchain with use of functional modeling.

**Methodology:** the functional model offered for the analysis of protective mechanisms a blockchain systems is based on the known methodology of SADT/IDEF0

**Value:** the model developed for the analysis of security a blockchain can be used in fundamental researches of blockchain technology.

**Research implications:** the formalized description of work of protection gears a blockchain on counteraction to widespread network attacks can be detailed further.

*Keywords:* blockchain, modeling of processes, IDEF0 methodology, integrity and authenticity of information, digital signature, hashing of data, authentication.



УДК 512

С.В. Лещева, Н.В. Юрова

О КЛАССАХ СОПРЯЖЕННОСТИ В ГРУППЕ  ${}^3D_4(q)$ 

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Данная статья является очередным шагом в решении проблемы, согласно которой неединичный класс сопряженности в конечной простой неабелевой группе содержит коммутирующие элементы. Ранее это утверждение было проверено для спорадических, проективных  $L_n(q)$  и знакопеременных групп  $A_n$ , а также для групп Ри  ${}^2G_2(q)$  и Сузуки  ${}^2B_2(q)$ . Ряд серий простых конечных групп остается непроверенным, среди которых имеются ортогональные  $O_{2n+1}(q)$ ,  $O_{2n}(q)^\pm$ , унитарные  $U_n(q)$  и симплектические  $Sp_{2n}(q)$ . В этой работе для одной из исключительных серий конечных простых групп  ${}^3D_4(q)$  проверяется справедливость выше упомянутого утверждения.

*Ключевые слова:* группа Шевалле, классы сопряженности, конечная простая группа, коммутирующие элементы, централизатор.

Проблема, частный случай которой рассматривается в данной статье, состоит в следующем: в простой конечной (не циклической) группе неединичный класс сопряженности содержит коммутирующие элементы. Гипотеза о наличии коммутирующих элементов возникла при изучении так называемой теории конечных леводистрибутивных квазигрупп, при исследовании бинарных систем  $G(\circ)$  с тождеством левой дистрибутивности (1):

$$x \circ (y \circ z) = (x \circ y) \circ (x \circ z) \text{ для } x, y, z \in G(\circ). \quad (1)$$

Привлекательность тождества левой дистрибутивности состоит в том, что в бинарной системе  $G(\circ)$  с ним отображение  $L_a = (x \rightarrow a \circ x)$  есть, очевидно, эндоморфизм, а если  $G(\circ)$  квазигруппа, то даже и автоморфизм. Данное направление основательно изучено в работе [1]. Описание всех конечных простых групп всегда было одной из главных целей математиков, работающих в теории групп. Одним из крупнейших достижений в теории групп является классификация простых конечных групп [2]. Согласно которой, любая конечная простая группа либо изоморфна одной из 26 так называемых спорадических групп, либо принадлежит одному из следующих трех семейств.

1. Циклические группы простого порядка  $Z_p$  (единственные простые группы, являющиеся абелевыми).
2. Знакопеременные группы  $A_n$  перестановок не менее 5 элементов.
3. Простые группы типа Ли, а именно:
  - а) классические группы Ли над конечным полем, а именно, группы Шевалле (линейная  $L_n(q)$ , симплектическая  $SP_{2n}(q)$ , ортогональная  $O_n(q)$  и унитарная группы  $U_n(q)$ );
  - б) исключительные и скрученные формы групп типа Ли (включая группу Титса).

В фундаментальной работе В.М. Галкина, Л.Н. Ерофеевой, С.В. Лещевой гипотеза проверяется для спорадических, проективных  $L_n(q)$  и знакопеременных групп  $A_n$  [3]. Проверка гипотезы о существовании коммутирующих элементов в произвольной конечной простой неабелевой группе для исключительной группы  $G_2(q)$  и скрученных групп Ри  ${}^2G_2(q)$  и

Сузуки  ${}^2B_2(q)$  изложена в трудах [4] и [5] соответственно. В статье [6] это же утверждение проверено для симплектической группы  $SP_4(q)$ .

В исследовании наибольшую трудность представляет рассмотрение множества вариантов, возникающих при индуктивном подходе. Проблема сводится к исследованию групп небольшой размерности. Исключительные группы трудны тем, что они не допускают «хороших» матричных представлений. В частности, это касается и группы  ${}^3D_4(q)$ , которая замечательна и сама по себе. Она получается так называемым «скручиванием» из ортогональной группы  $O_8(q)$ , которая обладает специфическим автоморфизмом «тройственности», отличающим эту группу от всех остальных.

Приведем необходимые для дальнейшего некоторые определения и обозначения.

1. Представление групп Шевалле с помощью образующих и соотношений [7].

Пусть  $V$  – евклидово пространство со скалярным произведением  $(\alpha, \beta)$ , определенным обычным образом.

Подмножество  $\Sigma \subset V$  называется системой корней в пространстве  $V$ , если выполнены следующие условия:

- а)  $\Sigma$  – конечное множество, порождающее пространство  $V$  и не содержащее нулевого вектора;
- б) для любого вектора  $a \in \Sigma \Rightarrow -a \in \Sigma$  и  $na \notin \Sigma$ , для  $n \in \mathbb{Z}, n \neq \pm 1$ ;
- в)  $\langle \alpha, \beta \rangle = 2(\alpha, \beta)/(\beta, \beta) \in \mathbb{Z}$  для  $\forall \alpha, \beta \in \Sigma$  ( $\langle \alpha, \beta \rangle$  называется числом Картана);
- г)  $\Sigma$  инвариантно относительно всех отражений  $w_\alpha$  ( $\alpha \in \Sigma$ ),  $w_\alpha$  – отражение относительно гиперплоскости, ортогональной к  $\alpha$ , т.е.  $w_\alpha v = v - \frac{2(v, \alpha)}{(\alpha, \alpha)} \alpha$ .

Группа  $W$ , порожденная всеми отражениями  $w_\alpha$ , является конечной группой и называется группой Вейля. Группы Шевалле связаны с диаграммами Дынкина из теории простых комплексных алгебр Ли.

Подмножество  $\Theta \subset \Sigma$  называется базисом системы  $\Sigma$ , если  $\Theta$  – базис векторного пространства  $V$  и все корни  $\beta \in \Sigma$  записываются в виде линейных комбинаций  $\beta = \sum_{\alpha \in \Theta} m_\alpha \alpha$  с целыми коэффициентами  $m_\alpha$ , имеющими один и тот же знак (то есть все  $m_\alpha \geq 0$  или все  $m_\alpha \leq 0$ ). Вместо слова «базис» также используется термин система простых корней, а элементы множества  $\Theta$  называют простыми корнями. Известно [7], что для всякой системы корней существует базис. В диаграмме (схеме) Дынкина простые корни служат вершинами графа, в котором две вершины  $\alpha$  и  $\beta$  соединены ( $\langle \alpha, \beta \rangle \langle \beta, \alpha \rangle$ ) ребрами. Каждая диаграмма Дынкина определяет систему корней соответствующей группы Шевалле с точностью до изоморфизма. Верно и обратное. Построенная таким образом универсальная группа Шевалле может иметь центр. Простые группы получаются факторизацией по нему. Описание центра можно найти в [7].

2. Пусть  $V$  – конечномерное векторное пространство над конечным полем  $k = F_q$ . Для построения ортогональной группы  $O_n(q)$  используется невырожденная симметричная форма  $(x, y)$ . Эта конструкция, правда, пригодна лишь при нечетном  $q$ . В общем случае исходным объектом является квадратичная форма  $Q(x)$ , то есть квадратичная форма координат вектора  $x \in V$  в фиксированном базисе. В нечетной характеристике  $Q(x) = \frac{1}{2}(x, x)$ , но при четном  $q$  получить  $Q(x)$  из билинейной формы нельзя. Это обстоятельство создает дополнительные трудности при работе с ортогональными группами в характеристике 2.

Предполагая  $q$  четным, вводим формулу  $(x, y)$  равенством (2):

$$(x, y) = Q(x + y) + Q(x) + Q(y). \quad (2)$$

Она оказывается билинейной, причем  $(x, x) = 0$ .

В случае  $\dim V = 2n$  требуем невырожденности этой билинейной формы (то есть она должна быть симплектической). Будем в этом случае говорить о невырожденности формы  $Q(x)$ .

Если же  $\dim V = 2n + 1$ , то форма  $(x, y)$  заведомо вырождена. Требуется, чтобы эта вырожденность была «минимальной». Именно, чтобы вектора  $a$  с  $(a, x) = 0$  для  $\forall x \in V$  (ортогональные к  $x$ ) образовывали одномерное пространство  $V^\perp \subset V$ , кроме того, чтобы ограничение  $Q(x)$  на  $V^\perp$  было ненулевым. При выполнении этих условий  $Q(x)$  будем считать невырожденной. Общая ортогональная группа это подгруппа в  $L_n(q)$  ( $n = \dim V$ ) преобразований, сохраняющих невырожденную квадратичную форму  $Q(x)$ .

Ортогональная группа  $O_8^+$  выделяется из остальных ортогональных групп наличием внешнего автоморфизма третьего порядка. Это обстоятельство обеспечивает существование группы  ${}^3D_4(q)$  из заголовка.

Для описания этого автоморфизма удобно рассматривать группу  $O_8^+$  как группу Шевалле, построенную по графу Дынкина (рис. 1).

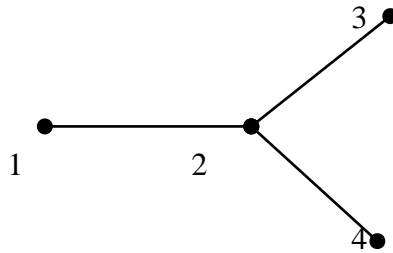


Рис. 1. Группа Шевалле, построенная по графу Дынкина

Вершины (корни) 1,2,3,4 этого графа являются векторами из евклидова пространства  $R^4$  с ортонормированным базисом  $e_1, e_2, e_3, e_4$ . Так,

$$1 = e_1 - e_2,$$

$$2 = e_2 - e_3,$$

$$3 = e_3 - e_4,$$

$$4 = e_3 + e_4.$$

Другие корни имеют вид (3):

$$\pm e_i \pm e_j \quad (i, j = 1, 2, 3, 4, i \neq j). \quad (3)$$

Они являются целочисленными комбинациями корней 1, 2, 3, 4. Например, максимальный положительный корень  $e_1 + e_2 = 1 + 2^2 + 3 + 4$ , где  $2^2$  означает, что корень 2 входит в линейную комбинацию дважды.

Группа  $O_8^+$  или в стандартных обозначениях групп Шевалле  $D_4$  строится над полем  $k$  образующими  $x_\alpha(t)$ ,  $t \in k$ ,  $\alpha$  – корень, известный соотношениями [7]. В частности, корневая подгруппа  $x_\alpha(t)$  подчиняется соотношению (4):

$$x_\alpha(t + u) = x_\alpha(t)x_\alpha(u), \quad (4)$$

а так называемые картановские элементы  $h_\alpha(t)$  с параметром  $t \neq 0$  мультипликативные по аргументу  $t$ .

Перестановка вершин  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1, 2 \rightarrow 2$  в графе Дынкина индуцирует перестановку корневых подгрупп  $x_\alpha(t)$ , осуществляющую нужный внешний автоморфизм третьего порядка  $\varphi$  группы  $D_4$ .

Выбирая в качестве поля  $k$  конечное поле  $F_{q^3}$  из  $q^3$  элементов, определяем «скручивание» в  $D_4$  как автоморфизм, переводящий  $x_\alpha(t)$  в  $x_{\varphi(\alpha)}(t^q)$ . Здесь  $\varphi \rightarrow \varphi(\alpha)$  указанная выше перестановка корней с помощью «графового» автоморфизма. Подгруппа неподвижных элементов в  $D_4$  построенного автоморфизма «скручивания» и есть группа  ${}^3D_4(q)$  или группа Стейнберга. Эта группа оказывается простой.

Необходимые структурные результаты о группе  ${}^3D_4(q)$  можно найти в [8-12], хотя не все результаты из этих статей снабжены доказательствами. Соответствующие сведения будут далее приводиться в процессе доказательства основного результата этой статьи.

**Теорема.** *Неединичный класс сопряженности в группе  ${}^3D_4(q)$  содержит коммутирующие элементы.*

**Доказательство**

Доказательство разбивается на три этапа соответственно трем типам элементов: полупростым, унипотентным и смешанным. Каждый класс сопряженности, не считая единичного, состоит из элементов только одного из отмеченных типов.

**Полупростые классы**

Полупростой элемент содержится в некоторой абелевой подгруппе, называемой максимальным тором. С точностью до сопряженности (правда, иногда с использованием расширения основного поля) максимальный тор вкладывается в картановскую подгруппу

$$H = \langle h_\alpha(t) \rangle,$$

в которой каждый элемент имеет вид

$$h = h_1(t_1)h_2(t_2)h_3(t_3)h_4(t_4).$$

Следующая таблица, взятая из [8] дает информацию о классах максимальных торов.

*Таблица 1*

**Классы максимальных торов**

$T_0$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$
$Z_{q^3-1} \times Z_{q-1}$	$Z_{(q^3-1)(q-1)}$	$Z_{(q^3+1)(q-1)}$	$Z_{q^2+q+1} \times Z_{q^2-q+1}$	$Z^2_{q^2-q+1}$	$Z^2_{q^4-q^2+1}$	$Z_{q^3+1} \times Z_{q+1}$
$D_{12}$	$Z_2 \times Z_2$	$Z_2 \times Z_2$	$SL_2(3)$	$SL_2(3)$	$Z_4$	$D_{12}$

В первой строчке табл. 1 перечисляются все семь классов  $T_i (i = 0, \dots, 6)$  максимальных торов.

Во второй указывается строение каждого тора. Символ  $Z_n$  здесь означает циклическую группу порядка  $n$ , а  $Z^2 = Z \times Z$ .

В третьей строчке указывается нормализатор тора в группе  ${}^3D_4(q)$ , точнее фактор-группа  $N(T)/T$  нормализатора  $N(T)$  по группе  $T$ .

Здесь следует привести некоторые пояснения. Фактор-группа  $N(T)/T$  служит так называемой группой Вейля тора  $T$ . Ее элементами являются элементы группы Вейля  $W$  для группы  $D_4$ , составленные из произведений элементов вида  $w_\alpha$ , где

$$w_\alpha h_\beta(t) w_\alpha^{-1} = h_{w_\alpha(\beta)}(t).$$

Корень  $w_\alpha(\beta)$  является результатом «отображения»  $\beta$  от  $\alpha$ :

$$w_\alpha(\beta) = \beta - (\alpha, \beta) \alpha^n,$$

где  $(\alpha, \beta)$  – скалярное произведение в  $R^4$ .

В группе Вейля  $W(T)$  тора включаются лишь те элементы  $W$ , которые оставляют инвариантной группу  ${}^3D_4(q)$ . Во всех группах  $W(T)$  есть элемент, который переводит при вложении  $T$  в картановскую подгруппу  $H$  элемент  $h_\alpha(t)$  в  $h_{-\alpha}(t)$ . Таковым является произведение отражений от четырех взаимно перпендикулярных корней, например 1, 3, 4 и 1+2+3+4. Но  $h_{-\alpha}(t)h_\alpha(t)$  централизует каждую корневую подгруппу в силу соотношения  $R_8$  [7, С. 32]:

$$h_\alpha(t)x_\beta(u)h_\alpha(t)^{-1} = x_\beta(t^{(\beta, \alpha)}u).$$

Поскольку группа  ${}^3D_4(q)$  проста, то

$$h_{-\alpha}(t) = (h_\alpha(t))^{-1}$$

элементы торов сопряжены со своими обратными.

Это доказывает часть теоремы в случае, если элемент  $x$  тора  $T$  не является инволюцией. Если же  $x^2 = 1$ , что для полупростого элемента включает нечетность  $q$ , то здесь можно сослаться на результат Л. Н. Ерофеевой [3], по которому в любой простой группе класс инволюций содержит коммутирующие элементы.

В прочем, можно дать и непосредственное доказательство, которое мы опустим. Этим рассмотрение полупростых элементов закончено.

### Унипотентные элементы

В табл. 2 дается информация о классах унипотентных элементов в  ${}^3D_4(q)$ , взятые из [9, 10].

Таблица 2

Классы унипотентных элементов

$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_5$	$u_6$ ( $q$ - неч.)	$u_7$ ( $q$ - чет.)	$u_8$ ( $q$ - чет.)
$q^{12}(q^6 - 1)$	$q^{10}(q^2 - 1)$	$2q^8(q^2 + q + 1)$	$2q^8(q^2 - q + 1)$	$q^6$	$q^4$	$2q^4$	$2q^4$

В первой строке табл. 2 перенумерованы классы унипотентов, а во второй указаны порядки централизаторов этих классов. Ни в [9], ни в [10] не указаны представители классов. Их можно найти в [11], но только для нечетного  $q$ .

Поскольку для нечетного  $q$  все централизаторы имеют разные порядки, то каждый унитарный сопряжен со своим обратным. Инволюции здесь исключаются, а поэтому случай нечетного  $q$  рассмотрен.

При четном  $q$  некоторую трудность вызывает исследование классов  $u_7$  и  $u_8$ . Утомительные выкладки с использованием разложения Брюа дают следующую картину:

1. Классы  $u_1$  и  $u_2$  это классы инволюций с представителями  $x_2(1)$  и  $x_1(1)x_3(1)x_4(1)$ , каковые появляются и в нечетной характеристике.
2. Классы  $u_3, u_4, u_5$  содержат элементы четвертого порядка, а потому элемент каждого из этих классов сопряжен со своим обратным.
3. Классы  $u_7, u_8$  состоят из элементов восьмого порядка. Если  $x$  элемент из этих классов, то из четырех элементов  $x, x^3, x^5, x^7$  (их централизаторы имеют тот же порядок  $2q^4$ ) по крайней мере, два попадают в один класс. Перебор всех вариантов показывает, что  $x$  сопряжен с одним из трех оставшихся степеней. Например, если  $x^3 \sim x^5$ , то  $x^9 = x \sim x^{15} = x^{-1}$ . Инволютивные классы  $u_1$  и  $u_2$  можно исключить опять же с помощью теоремы, рассмотренной в работе [3].

### Смешанные элементы

Как известно, смешанный элемент  $x$  разлагает в произведение коммутирующих множителей

$$x = su,$$

где  $s$  – полупрост, а  $u$  – унитарный. Унитарный  $u$  лежит в централизаторе  $C(s)$  полупростой части  $x$ . В табл. 3 приводится информация о  $s, u$  и  $C(s)$ , взятая из [10, 8].

Таблица 3

### Взаимосвязь $s, u$ и $C(s)$

$s$	$u$	$C(s)$	
$s_2$	$u_1, u_2, u_3, u_4$	$(SL_2(q^3) \circ SL_2(q)) \cdot Z_2$	$q$ нечетно
$s_3$	$u_2$	$(SL_2(q^3) \circ Z_{q-1}) \cdot d$	$q \geq 4$
$s_4$	$u_1, u_3$	$(Z_{q^2+q+1} \circ SL_2(q)) \cdot f^+$	
$s_5$	$u_1$	$(SL_2(q^3) \circ Z_{q+1}) \cdot d$	$q \geq 3$
$s_7$	$u_2$	$(Z_{q^3-1} \circ SL_2(q)) \cdot d$	
$s_9$	$u_1, u_4$	$(Z_{q^2-q+1} \circ SU_3(q)) \cdot f^-$	
$s_{10}$	$u_1$	$(Z_{q^3+1} \circ SL_2(q)) \cdot d$	

Здесь

$$d = Z_{(2, q-1)}, f^\pm = Z_{(3, q^2 \pm q+1)}.$$

Символы  $A \circ B$  и  $A \cdot B$  означают центральное произведение групп  $A$  и  $B$  и  $A$  расширение с помощью  $B$ . Унитарные части  $x = su$  лежат в подгруппах централизаторов типа  $SL_2(q^3) \circ SL_2(q)$  и т.д. Поэтому достаточно проверять наличие коммутирующего с  $x$  сопряженного с ним элемента в таких группах. Для этого используем следующую лемму.

**Лемма.** Пусть  $J \triangleleft G$  – центральный нормальный делитель в группе,  $p$  – простое и  $(p, J) = 1$ . Если  $p$  – элемент сопряжены  $u, v \in G$  и коммутируют в факторгруппе  $G/J$ , то они коммутируют и в  $G$ .

### Доказательство

Имеем

$$xu = uxc, \quad c \in J.$$

Отсюда следует, что

$$x^m u = u x^m c^m.$$

Если взять  $m = p^k$  такое, что  $x^m = 1$ ,  $c^m = 1$  и  $c = 1$ , т.к.  $|J|$  не делится на  $p$ .

Возвращаясь к смешанному элементу  $x = su$ , имеем, согласно результатам из [3], что унипотент  $u$  коммутирует с некоторым сопряженным в группах  $L_2(q^3)$ ,  $L_3(q)$  и по выше сформулированной лемме также в  $SL_2(q^3)$  и  $SL_3(q)$ . По лемме сопряженность и коммутативность имеет место и в  $C(x)$ . Наконец, и  $u$  можно заменить на  $su$ , что не меняет заключения.

Рассуждения же проходят при  $s = s_7$  и  $s = s_{10}$ .

Во втором случае  $SL_2(q)$  разрешима при  $q = 2$ , но это препятствие легко преодолевается просмотром классов сопряженных элементов группы  ${}^3D_4(2)$  в Атласе [13].

Случай  $s_7$  сводится к установлению наличия коммутирующих элементов в группе  $SU_3(q)$ . В действительности это так, но, избегая длинных выкладок, приведем идею проверки.

Если выбрать базис  $e_1, e_2, e_3$  в трехмерном пространстве  $V$  над полем  $F_{q^2}$  и построить унитарную метрику следующим образом:

$$\begin{aligned} (e_1; e_1) &= (e_2; e_2) = 0, \\ (e_1; e_2) &= (e_3; e_3) = 1, \\ e_3 &\perp e_1, e_2, \end{aligned}$$

то унипотенты опишутся матрицами вида

$$\begin{pmatrix} 1 & a & b \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -b & 1 \end{pmatrix}, \quad a, b \in F_{q^2}, \bar{b} = b^q.$$

Они составляют абелеву группу – силовскую подгруппу  $SU_3(q)$ . Сопряжения подходящими картановскими (диагональными) элементами и приводит к доказательству утверждения.

Таким образом, рассмотрение смешанных элементов закончено.

## Библиографический список

1. **Ерофеева, Л.Н.** L-группоиды / Л.Н. Ерофеева. – дисс. канд. физ.-мат. наук. – СПб, 2004. – 10 с.
2. **Горенштейн, Д.** Конечные простые группы. Введение в их классификацию / Д. Горенштейн. – М.: Мир, 1985, – 352 с.
3. **Галкин, В.М.** Коммутирующие элементы в классе сопряженности / В.М. Галкин, Л.Н. Ерофеева, С.В. Лещева // Известия вузов. Математика. – 2016. – № 8. – С. 12-20.
4. **Ерофеева, Л.Н.** О простой группе Ри  ${}^2G_2(q)$  / Л.Н. Ерофеева, С.В. Лещева, Н.В. Мохнина, Н.В. Юрова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 3(118). – С. 24-27.
5. **Галкин, В.М.** Коммутирующие элементы в классах сопряженности в группе Сузуки  ${}^2B_2(q)$  / В.М. Галкин, Н.В. Мохнина, Н.В. Юрова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 3(119). – С. 45-49.
6. **Юрова, Н.В.** О классах сопряженности в симплектической группе  $SP_4(q)$  // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 4(123). – С. 56-60.
7. **Стейнберг, Р.** Лекции о группах Шевалле / Р. Стейнберг. – М.: Мир, 1975, – 263 с.
8. **Kleidman, Peter B.** The Maximal Subgroups of the Steinberg Triality Groups  ${}^3D_4(q)$  and of their automorphism groups / Peter B. Kleidman // Journal of Algebra, 1988. – P. 182-199.
9. **Spaltenstein, N.** Characters unipotés de  ${}^3D_4(q)(F_q)$  / N. Spaltenstein // Comment. Maht. helvetici, 1982. – P. 676-691.
10. **Derisiotis, D.I.** Character table and blocks of finite simple Triality groups  ${}^3D_4(q)$  / D.I. Derisiotis, G.O. Michler // Transactions of the Amer. Math. Soc., 1987. – P. 39-49.
11. **Himstedt, F.** Character tablos of parabolic Subgroups of Steinberg Triality Groups / F Himstedt // Tech. Univ. Munchen. F. Math. Report TUM M 0407, 2004.
12. **Лещева, С.В.** О  $\phi$ -структуре на группе  ${}^3D_4(q)$  / С.В. Лещева, О.В. Суворова // Известия вузов. Математика. – 1999. – № 10. – С. 19-22.
13. **Conway, I.H.** Atlas of finite Groups / I.H. Conway. – Oxford, 1965, – 252 p.

*Дата поступления  
в редакцию: 21.02.2019*

**S.V. Leshcheva, N.V. Yurova**

### ON CONJUGACY CLASSES OF THE GROUP ${}^3D_4(q)$

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

**Purpose:** There is the conjecture that every conjugacy class of finite simply group contains the commuting elements. The conjecture for the group  ${}^3D_4(q)$  is verified.

**Design/methodology/approach:** Information on the conjugacy classes of  ${}^3D_4(q)$  is using.

**Findings:** This result is a stage of the testing of the general conjecture.

**Research limitations/implications:** Methods of this paper may be used for the investigation the other groups.

**Originality/value:** The result is new.

*Keywords:* chevalley groups, conjugacy classes, finite simple group, commuting elements.



УДК 624.074.432(539.374)

С.А. Пименов

**КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ФУНКЦИИ МНОГИХ СЛУЧАЙНЫХ АРГУМЕНТОВ**

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики –  
Российский федеральный ядерный центр  
Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова

Рассматриваются методы оценки вероятности безотказной работы конструкций. Приведена концепция построения алгоритмов оценки вероятности безотказной работы конструкций на основе линеаризации функции многих случайных аргументов. Определяющие параметры (случайные аргументы) могут быть независимы или иметь корреляционные связи. Исходя из этого, построены два базовых алгоритма: алгоритм для определения вероятности безотказной работы конструкции в случае отсутствия корреляции определяющих параметров; алгоритм для определения вероятности безотказной работы конструкции в случае корреляции определяющих параметров.

В основе предлагаемых алгоритмов лежит модель «нагрузка – несущая способность», учитывающая: стохастичность механических свойств материалов конструкции; случайность геометрических характеристик; нагрузки вероятностного характера. Предложенные алгоритмы оценки вероятности безотказной работы применимы для любого рода конструкций и независимо от физического аспекта инженерного анализа. Основное условие – нормальное распределение нагрузки и несущей способности.

*Ключевые слова:* вероятность безотказной работы, нагрузка, несущая способность, линеаризация.

**Введение**

Инженерный расчет конструкции проводится с целью получения гарантии того, что за время эксплуатации не наступит ни одно из недопустимых предельных состояний (отказов). Под предельным состоянием здесь понимается предельное состояние по прочности.

Рассмотрим некоторую абстрактную конструкцию (например, консольная балка длиной  $L$  с прямоугольным сечением шириной  $b$ , высотой  $h$ ), нагруженную сосредоточенной силой  $F$ . Расчетная прочность в классической постановке сводится к определению уровня напряжений  $\sigma$  в опасной точке конструкции и дальнейшему сравнению его с допускаемыми напряжениями  $[\sigma]$ , полученными на базе основных механических характеристик материала с учетом коэффициента запаса прочности. Уровень напряжений  $\sigma$  есть функция основных определяющих параметров. Для случая консольной балки  $\sigma = f(F, L, b, h)$ , при этом  $\sigma \leq [\sigma]$ .

В общем случае, согласно (1), условие прочности или условие безотказной работы конструкции можно записать в виде:

$$Q \leq R \quad (1)$$

где  $Q$  – нагрузка, действующая на конструкцию, усилие в элементах конструкции, напряжения;  $R$  – несущая способность, выраженная в тех же единицах, что и величина нагрузки.

Нагрузка и несущая способность являются изменчивыми случайными величинами, законы распределения которых можно установить, систематически накапливая и изучая опытные факты, реализующиеся в однородных условиях. Характер этой изменчивости таков, что в большинстве случаев не существует вполне определенного и имеющего практический смысл верхнего предела для нагрузок, равно как и нижнего предела для несущей способности. Поэтому условие (1) не может быть заменено условием (2):

$$Q_{max} \leq R_{min}. \quad (2)$$

Абсолютное требование выполнения неравенства (1) лишено смысла. Можно лишь поставить условие, чтобы в течение срока службы конструкции это требование было выполнено с той или иной вероятностью, достаточно близкой к единице. Таким образом, инженерные расчеты на прочность следует трактовать с вероятностной точки зрения. Исходя из этого, рассмотрим метод оценки вероятности безотказной работы конструкции.

### Общий подход на основе линейзации аналитических функций

Запишем условие прочности в виде (3):

$$\psi = R - Q > 0. \quad (3)$$

Функцию  $\psi$  принято называть функцией неразрушимости. Значения  $\psi$  являются случайными ввиду того, что значения  $R$  и  $Q$  также случайны. Необходимо отметить, что в общем случае как  $Q$ , так и  $R$  могут иметь различные законы распределения (нормальный, логарифмически нормальный, Релея, Вейбулла, экспоненциальный и др.) Поэтому и функция  $\psi$  в каждом конкретном случае также будет иметь различные законы распределения. Для случая нормального распределения  $R$  и  $Q$  функция  $\psi$  также распределена по нормальному закону (рис. 1), так как является линейной их комбинацией [2].

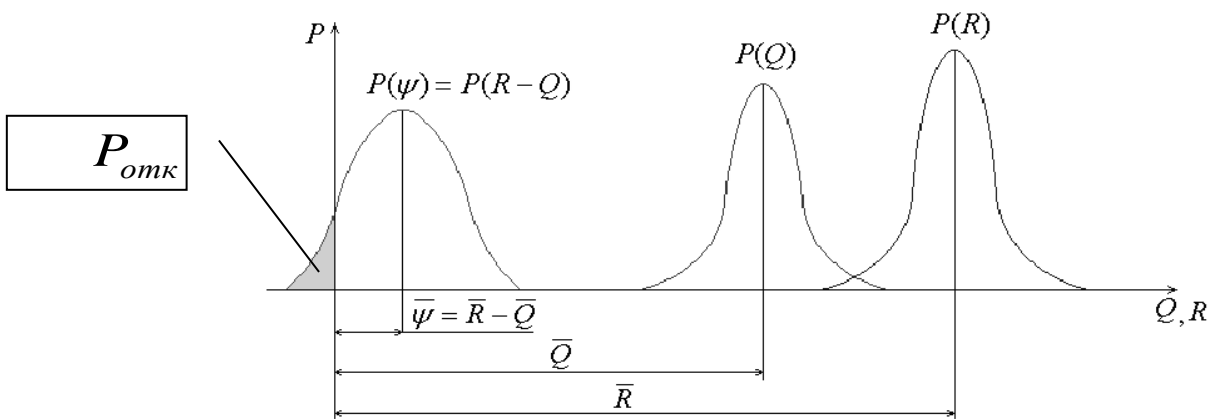


Рис. 1. Распределение функции неразрушимости и вероятность отказа

Также запишем выражение для определения вероятности безотказной работы конструкции (4):

$$N = 1 - P_{отк} \quad (4)$$

Величина  $P_{отк} = P(\psi \leq 0) = \int_{-\infty}^0 p(\psi) d\psi$  есть вероятность разрушения (отказа) конструкции (рис. 1). Если параметры нагрузки и прочности не коррелированы между собой и распределены по нормальному закону, то для квантили  $U_{P_{отк}}$  и вероятности отказа  $P_{отк}$  получаем выражения (5):

$$U_{P_{отк}} = \frac{\bar{R} - \bar{Q}}{\sqrt{S_R^2 + S_Q^2}} = \frac{\eta - 1}{\sqrt{\eta^2 v_R^2 + v_Q^2}}, \quad P_{отк} = \frac{1}{2} - \Phi(U_{P_{отк}}). \quad (5)$$

В выражениях (5):

$$\Phi(U_{P_{отк}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{U_{P_{отк}}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad - \text{нормированная функция [2,3];}$$

$$\begin{aligned}
S_\psi &= \sqrt{S_R^2 + S_Q^2} && - \text{среднее квадратичное значение } \psi; \\
\bar{\psi} &= \bar{R} - \bar{Q} && - \text{среднее значение } \psi; \\
S_R, S_Q &&& - \text{среднеквадратичные отклонения } R \text{ и } Q \text{ соответственно;} \\
\eta &= \frac{\bar{R}}{\bar{Q}} && - \text{условный коэффициент запаса;} \\
v_R &= \frac{S_R}{\bar{R}} && - \text{коэффициент вариации несущей способности;} \\
v_Q &= \frac{S_Q}{\bar{Q}} && - \text{коэффициент вариации нагрузки.}
\end{aligned}$$

Тогда для определения вероятности безотказной работы конструкции  $N$  получаем выражение (6):

$$N = \frac{1}{2} + \Phi(U_{P_{омк}}). \quad (6)$$

Вернемся к рассмотренной ранее конструкции (консольная балка), безотказная работа которой, с вероятностной точки зрения, может быть представлена системой пяти случайных величин:  $F, L, b, h, [\sigma]$ . Здесь в качестве случайных величин выступают определяющие параметры конструкции, часть которых является аргументами функции  $R$ , а часть аргументами функции  $Q$ . В общем случае имеется система  $n$  случайных величин:  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$ . Путем статистической обработки вариационных рядов определяющих параметров  $a_1, a_2, \dots, a_n$  могут быть получены характеристики такой системы: математические ожидания  $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_n$  и корреляционная матрица:

$$\|K_{i,j}\| = \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ & & \dots & \\ & & & K_{nn} \end{vmatrix}.$$

Пусть величина  $\psi$  есть функция случайных аргументов  $a_1, a_2, \dots, a_n$  (7):

$$\psi = \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n). \quad (7)$$

При этом функция  $\psi$  не линейна, но мало отличается от линейной в области практически возможных значений всех аргументов. Следует заметить, что для большинства конструкций это справедливо [1]. Поэтому найдем характеристики величины  $\psi$ , применяя метод линеаризации [2,3].

Рассмотрим функцию  $\psi = \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)$  в достаточно малой окрестности точки  $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_n$  (в окрестности математических ожиданий определяющих параметров конструкции). Поскольку функция в этой окрестности почти линейна, то ее можно приближенно заменить линейной. Это равносильно тому, чтобы в разложении функции в ряд Тейлора около точки  $\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_n$  сохранить только члены первого порядка, а все высшие отбросить (8):

$$\psi = \psi(a_1, a_2, \dots, a_n) \approx \psi(\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_n) + \sum_{i=1}^n \psi'_{a_i}(\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_n)(a_i - \bar{a}_i). \quad (8)$$

Тогда среднее значение  $\bar{\psi}$  и дисперсия  $S_{\psi}^2$  определяются следующим образом (9):

$$\bar{\psi} \equiv \psi(\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_i, \dots, \bar{a}_n); S_{\psi}^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)}{\partial a_i} \right]_{\bar{a}_i}^2 S_{a_i}^2 +$$

$$+ 2 \sum_{i < j} \left[ \frac{\partial \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)}{\partial a_i} \right]_{\bar{a}_i} \left[ \frac{\partial \psi(a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_n)}{\partial a_j} \right]_{\bar{a}_j} k_{ij} S_{a_i} S_{a_j}. \quad (9)$$

В случае, когда определяющие параметры конструкции  $a_i$  не коррелированы ( $k_{ij}=0$  при  $i \neq j$ ), выражение для дисперсия  $S_{\psi}^2$  примет вид (10):

$$S_{\psi}^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)}{\partial a_i} \right]_{\bar{a}_i}^2 S_{a_i}^2, \quad (10)$$

а коэффициент вариации  $V_{\psi}$  определяется следующим образом (11):

$$V_{\psi}^2 = \left( \frac{S_{\psi}}{\bar{\psi}} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)}{\partial a_i} \right]_{\bar{a}_i}^2 \frac{S_{a_i}^2}{\bar{\psi}^2} \cdot \frac{\bar{a}_i^{-2}}{a_i^{-2}}. \quad (11)$$

Далее введем следующие обозначения:

$V_{a_i} = \frac{S_{a_i}}{a_i}$  – коэффициент вариации  $i$ -го определяющего параметра;

$\lambda_i^2 = \left[ \frac{\partial \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)}{\partial a_i} \right]_{\bar{a}_i}^2 \frac{\bar{a}_i^{-2}}{\bar{\psi}^2}$  – коэффициент влияния  $i$ -го определяющего параметра.

Согласно введенным обозначениям, запишем (11) в следующем виде (12):

$$V_{\psi}^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 V_{a_i}^2. \quad (12)$$

В обозначениях и терминах нагрузки  $Q$ , несущей способности  $R$ , определяющих параметров соответственно  $q_j$  и  $r_i$  запишем:

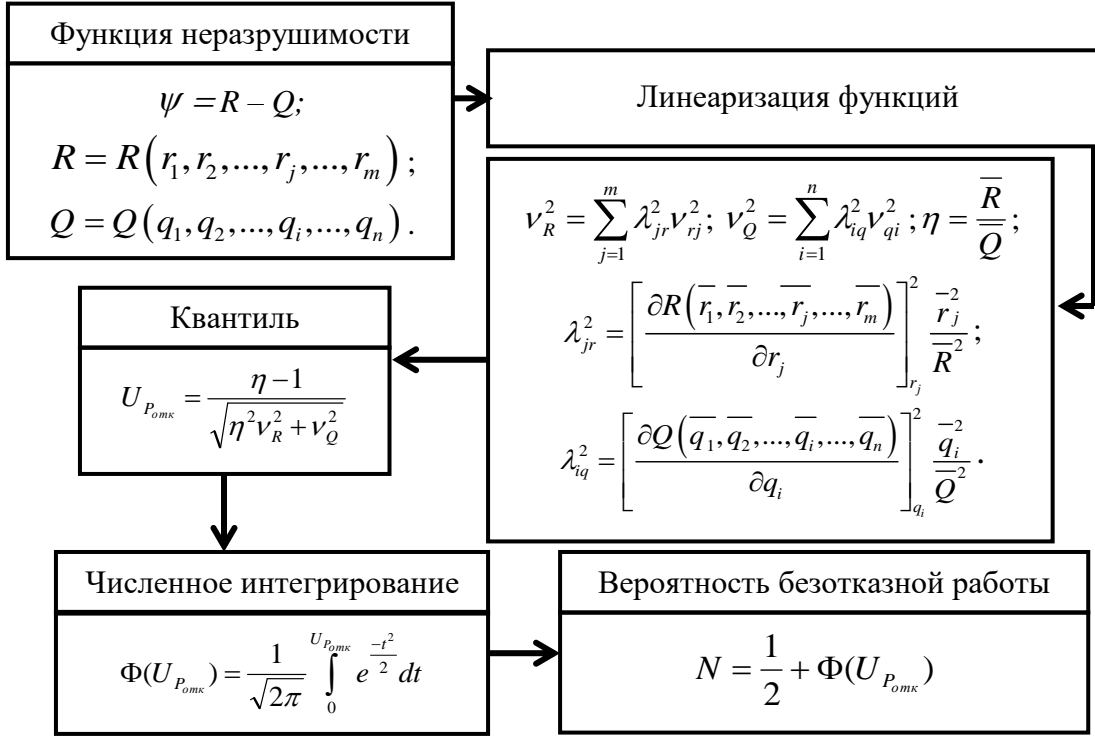
$$U_{P_{омк}} = \frac{\eta - 1}{\sqrt{\eta^2 V_R^2 + V_Q^2}}; V_R^2 = \sum_{j=1}^m \lambda_{jr}^2 V_{r_j}^2; V_Q^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_{iq}^2 V_{q_i}^2;$$

$$\lambda_{jr}^2 = \left[ \frac{\partial R(r_1, r_2, \dots, r_j, \dots, r_m)}{\partial r_j} \right]_{\bar{r}_j}^2 \frac{\bar{r}_j^{-2}}{R^2}; \lambda_{iq}^2 = \left[ \frac{\partial Q(q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n)}{\partial q_i} \right]_{\bar{q}_i}^2 \frac{\bar{q}_i^{-2}}{Q^2}, \quad (13)$$

где  $\lambda_{jr}, \lambda_{iq}$ , – коэффициенты влияния определяющих параметров;  $V_{r_i}, V_{q_i}$  – коэффициенты вариации определяющих параметров.

### Построение алгоритмов оценки вероятности безотказной работы конструкций

Таким образом, с учетом изложенного выше, можно построить общую блок-схему определения вероятности безотказной работы конструкции в случае отсутствия корреляции определяющих параметров (рис. 2).



**Рис. 2. Определение вероятности безотказной работы конструкции в случае отсутствия корреляции определяющих параметров**

Рассмотрим частный случай, когда имеет место корреляция двух определяющих параметров. Обозначим эти параметры как  $a_{i+1} = \Delta$  и  $a_{i+2} = C$ , а коэффициент корреляции этих параметров  $k_{\Delta C}$ . С учетом введенных обозначений и допущений выражение для дисперсии  $S_\psi^2$  примет вид (14):

$$S_\psi^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_n)}{\partial a_i} \right]_{a_i}^2 S_{a_i}^2 +$$

$$+ 2 \left[ \frac{\partial \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_n)}{\partial \Delta} \right]_{\Delta} \left[ \frac{\partial \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_n)}{\partial C} \right]_{C} S_\Delta S_C k_{\Delta C}. \quad (14)$$

Тогда коэффициент вариации  $V_\psi$  определяется следующим образом (15):

$$v_\psi^2 = \left( \frac{S_\psi}{\bar{\psi}} \right)^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_n)}{\partial a_i} \right]_{a_i}^2 \frac{S_{a_i}^2}{\bar{\psi}^2} \frac{a_i^{-2}}{a_i} +$$

$$+ 2 \left[ \frac{\partial \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_n)}{\partial \Delta} \right]_{\Delta} \left[ \frac{\partial \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_n)}{\partial C} \right]_{C} \cdot \frac{S_\Delta}{\bar{\psi}} \cdot \frac{\bar{\Delta}}{\Delta} \cdot \frac{S_C}{\bar{\psi}} \cdot \frac{\bar{C}}{C} k_{\Delta C}. \quad (15)$$

Введем следующие обозначения:

$\nu_{\Delta} = \frac{S_{\Delta}}{\Delta}$ ,  $\nu_C = \frac{S_C}{C}$  – коэффициенты вариации определяющих параметров  $\Delta$  и  $C$  соответственно;

$\lambda_{\Delta} = \left[ \frac{\partial \varphi(a_1, a_2, \dots, a_i, a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_n)}{\partial \Delta} \right]_{\bar{\Delta}} \frac{\bar{\Delta}}{\bar{\varphi}}$  – коэффициент влияния определяющего параметра  $\Delta$ ;

$\lambda_C = \left[ \frac{\partial \varphi(a_1, a_2, \dots, a_i, a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_n)}{\partial C} \right]_{\bar{C}} \frac{\bar{C}}{\bar{\varphi}}$  – коэффициент влияния определяющего параметра  $C$ .

Согласно введенным обозначениям запишем (15) в следующем виде (16):

$$\nu_{\psi}^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 \nu_{a_i}^2 + 2 \lambda_{\Delta} \lambda_C \nu_{\Delta} \nu_C k_{\Delta C}. \quad (16)$$

В общем случае выражение (16) примет вид (17):

$$\nu_{\psi}^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 \nu_{a_i}^2 + 2 \sum_{i < j} \lambda_i \lambda_j \nu_{a_i} \nu_{a_j} k_{ij}, \quad (17)$$

где

$$k_{ij} = \frac{\sum_{\gamma=1}^x (a_{i_{\gamma}} - \bar{a}_i)(a_{j_{\gamma}} - \bar{a}_j)}{\sqrt{\sum_{\gamma=1}^x (a_{i_{\gamma}} - \bar{a}_i)^2 \sum_{\gamma=1}^x (a_{j_{\gamma}} - \bar{a}_j)^2}} - \text{коэффициент корреляции параметров } a_i, a_j;$$

$x$  – объем выборки.

Аналогично (13) запишем выражения для нагрузки  $Q$ , несущей способности  $R$  и определяющих параметров соответственно  $q_j, r_i$  с учетом корреляции (18):

$$\nu_R^2 = \sum_{j=1}^m \lambda_{jr}^2 \nu_{r_j}^2 + 2 \sum_{j < z} \lambda_{jr} \lambda_{zr} \nu_{r_j} \nu_{r_z} k_{jz};$$

$$\nu_Q^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_{iq}^2 \nu_{q_i}^2 + 2 \sum_{i < z} \lambda_{iq} \lambda_{zq} \nu_{q_i} \nu_{q_z} k_{iz};$$

$$k_{jz} = \frac{\sum_{\gamma=1}^x (a_{j_{\gamma}} - \bar{a}_j)(a_{z_{\gamma}} - \bar{a}_z)}{\sqrt{\sum_{\gamma=1}^x (a_{j_{\gamma}} - \bar{a}_j)^2 \sum_{\gamma=1}^x (a_{z_{\gamma}} - \bar{a}_z)^2}}; \quad k_{iz} = \frac{\sum_{\gamma=1}^x (a_{i_{\gamma}} - \bar{a}_i)(a_{z_{\gamma}} - \bar{a}_z)}{\sqrt{\sum_{\gamma=1}^x (a_{i_{\gamma}} - \bar{a}_i)^2 \sum_{\gamma=1}^x (a_{z_{\gamma}} - \bar{a}_z)^2}}; \quad (18)$$

$$\lambda_{jr}^2 = \left[ \frac{\partial R(r_1, r_2, \dots, r_j, \dots, r_m)}{\partial r_j} \right]_{\bar{r}_j}^2 \frac{\bar{r}_j}{\bar{R}^2}; \quad \lambda_{iq}^2 = \left[ \frac{\partial Q(q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n)}{\partial q_i} \right]_{\bar{q}_i}^2 \frac{\bar{q}_i}{\bar{Q}^2},$$

По аналогии с рис. 2 построим общую блок-схему определения вероятности безотказной работы конструкции в случае корреляции определяющих параметров (рис. 3).

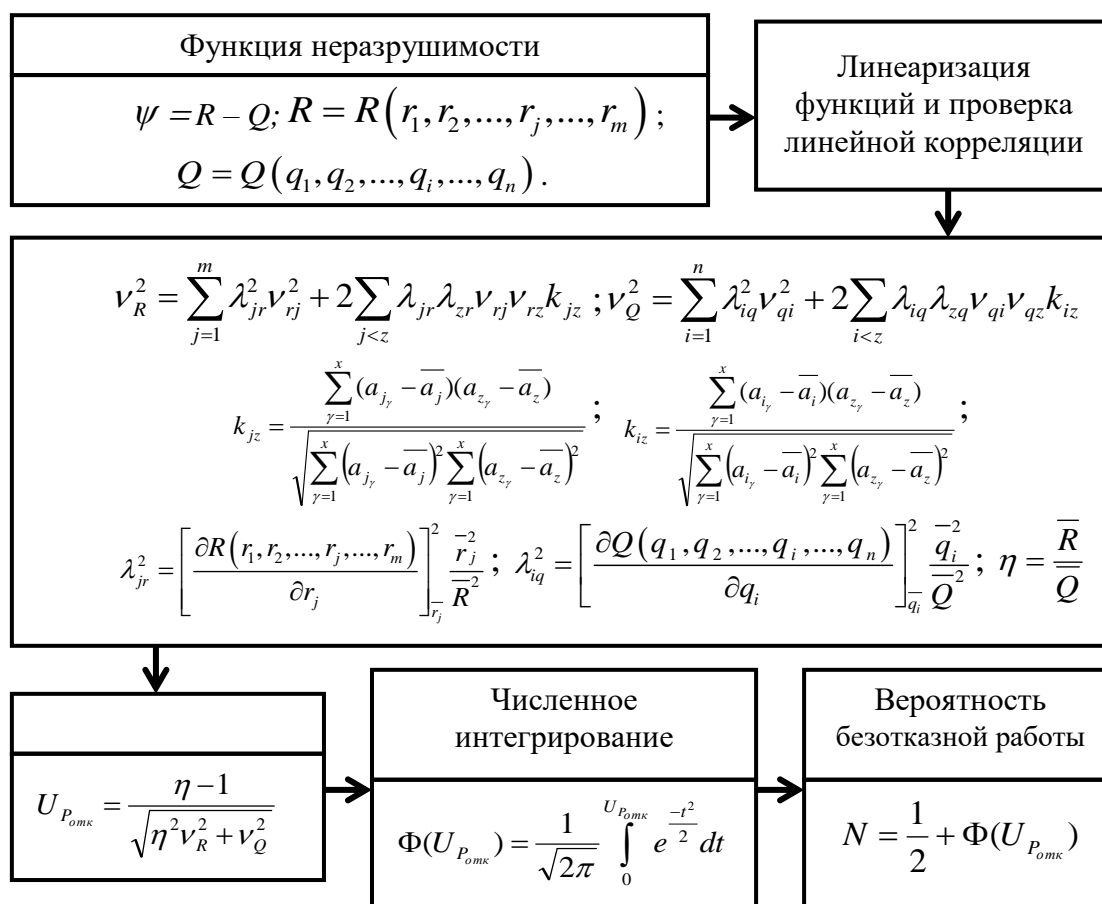


Рис. 3. Определение вероятности безотказной работы конструкции в случае корреляции определяющих параметров

### О погрешности линеаризации

В целях уточнения результата можно при разложении функции неразрушимости в ряд Тейлора в окрестности математических ожиданий определяющих параметров конструкции сохранить члены второго порядка (19):

$$\psi = \phi(a_1, a_2, \dots, a_n) \approx \psi(\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_n) + \sum_{i=1}^n \psi'_{a_i}(\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_n)(a_i - \bar{a}_i) +$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \psi''_{a_i}(\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_n)(a_i - \bar{a}_i)^2 + \sum_{i < j} \psi'_{a_i}(\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_n) \psi'_{a_j}(\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_n) \times$$

$$\times (a_i - \bar{a}_i)(a_j - \bar{a}_j). \quad (19)$$

В этом случае, когда определяющие параметры конструкции  $a_i$  имеют нормальное распределение и не коррелированы ( $k_{ij}=0$  при  $i \neq j$ ), выражения для среднего значения  $\bar{\psi}$  и дисперсии  $S_{\psi}^2$  изменяют вид (20):

$$\begin{aligned} \bar{\psi} &\cong \psi(\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_i, \dots, \bar{a}_n) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial^2 \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)}{\partial a_i^2} \right]_{\bar{a}_i} S_{a_i}^2; \\ S_{\psi}^2 &= \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, a_{i+1}, a_{i+2}, \dots, a_n)}{\partial a_i} \right]_{\bar{a}_i}^2 S_{a_i}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial^2 \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)}{\partial a_i^2} \right]_{\bar{a}_i} S_{a_i}^2 + \\ &+ \sum_{i < j} \left[ \frac{\partial^2 \psi(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)}{\partial a_i \partial a_j} \right]_{\bar{a}_{ij}} S_{a_i} S_{a_j}. \end{aligned} \quad (20)$$

Сопоставляя расчеты по выражениям (20) и по (10), можно оценить погрешность линеаризации. Последние два члена в выражении для дисперсии (20) представляют собой поправку на нелинейность и могут служить для оценки точности метода линеаризации при вычислении дисперсии.

### Определение корреляционных связей

При решении практических задач необходимо выяснить существование корреляционных связей между определяющими параметрами конструкции и, исходя из этого, выбрать соответствующий расчетный алгоритм (рис. 2,3).

Таким образом, следует определить, существенно ли отличается от нуля рассчитанный по ряду измерений объема  $x$  эмпирический коэффициент корреляции  $k_{ij}$  или, иными словами, взята ли выборка из двумерной нормально распределенной генеральной совокупности с коэффициентом корреляции равным нулю, что позволяет сделать вывод о независимости случайных величин  $a_i, a_j$ .

Проверим следующую статистическую гипотезу  $H_0: k_{ij}=0$ . Опровержение гипотезы  $H_0$  означает, что между определяющими параметрами  $a_i, a_j$  существует корреляционная зависимость. В данном случае выборочная функция имеет вид (21):

$$T = K_{ij} \frac{\sqrt{x-2}}{\sqrt{1-K_{ij}^2}}, \quad (21)$$

с реализацией (22):

$$t = k_{ij} \frac{\sqrt{x-2}}{\sqrt{1-k_{ij}^2}}, \quad (22)$$

Выборочная функция  $T$  удовлетворяет распределению Стьюдента с  $K = n - 2$  степенями свободы. Критическое значение статистики  $t_{\alpha, k}$  распределения Стьюдента определяют по таблице справочника [3].

Если окажется, что  $|t| \geq t_{\alpha, k}$ , то эмпирический коэффициент корреляции  $k_{ij}$  существенно отличен от нуля. В этом случае можно принять, что случайные величины  $a_i, a_j$  являются зависимыми.

Если  $|t| < t_{\alpha, k}$ , то отклонения эмпирического коэффициента корреляции  $k_{ij}$  от нуля носят случайный характер (за счет объема выборки). В этом случае можно принять, что случайные величины  $a_i, a_j$  являются независимыми и  $k_{ij} = 0$ .



## Заключение

В настоящей статье изложена концепция построения алгоритмов оценки вероятности безотказной работы конструкций. В основе лежит модель, учитывающая: стохастичность механических свойств материалов конструкции; случайность геометрических характеристик; нагрузки вероятностного характера.

Предложенные алгоритмы оценки вероятности безотказной работы применимы для любого рода металлических конструкций при условии нормального распределения нагрузки и несущей способности.

## Библиографический список

1. **Болотин, В.В.** Статистические методы в строительной механике / В.В. Болотин. – М.: Стройиздат, 1965, – 279 с.
2. **Вентцель, Е.С.** Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969, – 576 с.
3. **Бронштейн, И.Н.** Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1966, – 608 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 04.04.2019*

**S.A. Pimenov**

## THE CONCEPT OF BUILDING ALGORITHMS FOR ASSESSMENT OF RELIABILITY OF DESIGNS ON THE BASIS OF LINEARIZATION OF FUNCTION OF MANY RANDOM ARGUMENTS

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics  
Research Institute of Measuring Systems n.a. Yu.Ye. Sedakov

**Purpose:** Reliability assessment methods for designs are considered. The concept of creation of algorithms for assessment of reliability for designs is provided on the basis of linearization of function of many random arguments. The defining parameters (casual arguments) can be independent or have correlation communications. Proceeding from it two basic algorithms are constructed: algorithm for determination of reliability of a design in case of lack of correlation of the defining parameters; algorithm for determination of reliability of a design in case of correlation of the defining parameters.

**Methodology/approach:** The «loading-bearing strength» model considering is the cornerstone of the offered algorithms: stochasticity of mechanical properties of materials of a design; stochasticity of geometrical characteristics; loadings of probabilistic character.

**Findings:** The offered algorithms of assessment of reliability are applicable for any sort of designs and irrespective of physical aspect in the engineering analysis. The main condition - a condition of normal distribution for load and bearing strength.

*Key words:* reliability, load, bearing strength, linearization.

УДК 658.512

**Н.В. Старостин, С.В. Небайкин****АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМА СИЛОВОЙ УКЛАДКИ ГРАФА  
В ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ УКЛАДКИ КАБЕЛЕЙ В СУДОСТРОЕНИИ**Национальный исследовательский Нижегородский государственный  
университет им. Н.И. Лобачевского

Статья посвящена рассмотрению задачи по автоматизации подбора оптимальной кабельной арматуры для прокладки кабельных изделий в корпусе кораблей. Производится формальная постановка многокритериальной задачи подбора размеров арматуры и расчета способа укладки кабелей. Поиск решения частной задачи расчета порядка и способа укладки в рамках заданной арматуры предлагается построить на базе известного подхода силовой укладки графа (forcedirected), который основан на моделировании сил притяжения и отталкивания между вершинами. Рассмотренная методика решения задачи реализована в программном обеспечении «Компоновщик», которое успешно применяется для решения задач в реальном производстве.

*Ключевые слова:* укладка графа, силовой алгоритм, кабельная арматура, программное обеспечение.

**Введение**

Один из этапов судостроения заключается в прокладке кабельных изделий в корпусе корабля. Кабели укладываются и жестко крепятся в специальных кабельных подвесках типовых размеров. Подобные кабельные трассы могут пересекать естественные преграды на корабле (переборки, палубы и др.) В этом случае подбирается кабельная коробка необходимого размера и монтируется в заранее подготовленное отверстие в преграде. Ошибка в подборе размеров кабельных подвесок и, тем более, кабельных коробок приводит к дополнительным работам, которые требуют дополнительного финансирования и отодвигают этап сдачи судна заказчику.

При монтаже кабелей судовых сетей особое внимание уделяется способам уплотнения кабеля в местах прохода их через водонепроницаемые переборки, определяющие живучесть судна при авариях. Для обеспечения герметичности переборок производится уплотнение пучка кабелей трассы в кабельных коробках и подвесках специальными уплотнительными массами, обеспечивающими водонепроницаемость, что накладывает определенные условия на порядок и способы укладки кабелей.

В настоящее время проблема укладки кабелей в отечественном судостроении нередко решается простой, но неточной инженерной оценкой на стадии проектирования, а в особых случаях используется затратный ручной перебор вариантов. Автоматизация процесса подбора размеров кабельных коробок и подвесок на стадии проектирования, а также автоматический расчет порядка и способа укладки кабелей на стадии монтажа позволили бы сократить издержки в этой сфере.

**Постановка задач в терминах предметной области**

В качестве исходных данных в задаче выступает совокупность кабелей, каждый из которых описывается диаметром оболочки и принадлежностью к одной из групп однородных кабельных изделий (силовые на заданное напряжение, связи, радиочастотные, управления и др.). Также в задаче указаны варианты типовых размеров кабельных коробок или кабельных подвесок.

Задача подбора размеров заключается в выборе оптимального размера кабельной арматуры с учетом технологических ограничений и целевых показателей. Технологические

ограничения связаны с недопустимостью выхода кабеля за пределы коробки или подвески, а также учитывают минимальные допуски по расстояниям между оболочками размещенных кабельных изделий. Нередко в реальной производственной ситуации имеют место особые ограничения, продиктованные спецификой монтажа. Например, в пространстве кабельной коробки над любым кабельным изделием не могут размещаться кабели большего сечения. В качестве целевых показателей выступают допустимые размеры электромонтажной арматуры, высота укладки пучка кабелей, оценка качества взаимного расположения кабельных изделий, которая строится на желании размещать кабельные изделия одной группы взаимно компактно.

Задача расчета порядка и способа укладки в рамках заданной арматуры заключается в построении плана укладки кабельных изделий в пространстве заданной кабельной коробки или подвески с учетом обозначенных выше требований. На основании данного плана укладки для специалиста-электромонтажника уже может быть сформирована производственная схема монтажа кабельных изделий, которая основана на порядной «снизу-вверх» последовательности монтажа кабелей.

### Формальная постановка задач

В задаче подбора размеров имеет место множество  $M$  вариантов кабельной арматуры (типовых кабельных коробок или подвесов), каждый из которых характеризуется собственными габаритами прямоугольной области:  $W_m \in R$  – ширина и  $H_m \in R$  – высота,  $m \in M$ .

В общем случае под моделью в обозначенных задачах предлагается рассматривать размещение набора  $n$  кругов (соответствуют кабельным изделиям) различных диаметров  $d_i \in R$ ,  $i = \overline{1, n}$  в заданной прямоугольной области кабельной арматуры. В этом случае под решением для заданного  $m \in M$  понимается размещение центров кругов  $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ , где  $p_i = (x_i, y_i) \in R^2$ , удовлетворяющее следующим ограничениям.

1. Круги не должны пересекаться (1)

$$\| p_i - p_j \| \geq d_i + d_j, \quad i \neq j, i, j = \overline{1, n}; \quad (1)$$

2. Круги не должны выходить за пределы ограничивающей области (2,3)

$$d_i \leq x_i \leq W_m - d_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

$$d_i \leq y_i \leq H_m - d_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

В рамках заданной арматуры  $m \in M$  под множеством  $D$  будем понимать множество всех возможных размещений кабельных изделий. В задаче подбора размеров требуется подобрать арматуру минимальной ширины (4):

$$W(m) = W_m \xrightarrow{m \in M} \min. \quad (4)$$

При этом величина  $\max_{i=\overline{1, n}} (y_i + d_i)$  описывает высоту общего пучка кабельной арматуры.

Требуется найти допустимую укладку пучка минимальной высоты:

$$T(m, p) = \max_{i=\overline{1, n}} (y_i + d_i) \xrightarrow{m \in M, p \in D} \min. \quad (5)$$

При наличии требований размещения с учетом групп предлагается ввести неориентированный граф  $G(V, E)$ , в котором каждая вершина соответствует кабельному изделию, а каждое ребро графа  $\{v_i, v_j\} \in E$  отражает факт принадлежности соответствующих инцидентным вершинам кабельным изделиям одной группе. В этом случае получаем следующий критерий:

$$C(m, p) = \sum_{\{v_i, v_j\} \in E} \|p_i - p_j\|^a \xrightarrow{m \in M, p \in D} \min . \quad (6)$$

Здесь коэффициент  $a \geq 0$ , он определяет важность компактной упаковки групп кабельных изделий в общем пространстве коробки или подвеса.

Задачу (1-6) будем называть многокритериальной задачей подбора размеров и расчета способа укладки. Очевидно, что задача расчета порядка и способа укладки в рамках заданной арматуры является частным случаем задачи (1-6), в которой  $|M| = 1$ . Переход от трех критериев (4-6) к однокритериальному случаю можно осуществить ранжированием критериев по степени важности. В этом случае задачу (1-3) с лексикографической сверткой критериев (4-6) будем называть общей задачей подбора размеров и расчета способа укладки. Таким образом, имеем 6 вариантов постановки задач.

### Сложность и обзор подходов

Данная задача (1-6) имеет важное практическое значение, и, помимо судостроения, возникает в различных областях, например, при транспортировке и складировании товаров, когда требуется разместить заданный набор элементов на минимальной площади, производстве различных деталей и элементов, предполагающих вырезание их из заготовок с минимизацией отходов и других.

Указанная задача относится к классу задач раскроя и упаковки и является комбинаторной NP-трудной задачей [1,2], поэтому получение точного решения за полиномиальное время в общем случае не представляется невозможным. Стоит отметить, что в открытой печати встречаются работы с положительным примером применения точных переборных схем решения [3] для относительно небольших задач. Актуальность проблемы «больших» трудно-решаемых задач привела к появлению значительного числа работ, в которых предлагаются различные приближенные и эвристические подходы. На практике нередко выбирается «жадные» стратегии [4] упаковки. Много работ посвящено применению итерационных методов и рандомизированным стратегиям, направленным на преодоление локальных экстремумов [4, 5], таких как имитации отжига [6], запретных направлений и многократного рестарта [7], генетических алгоритмов [8, 9] и других. Отдельный практический интерес имеют так называемые многоуровневые алгоритмы [10], основанные на последовательной редукции исходных данных, переходу к более простой задаче, ее решению и восстановлении решения в терминах исходной задачи. В работе [11] продемонстрировано, как использование итерационного поиска и техники многоуровневой редукции позволяет преодолевать локальные экстремумы.

В данной работе для решения задачи укладки кабелей предлагается итерационный метод, в основу которого положены принципы силовой укладки графов и многоуровневой редукции.

### Метод подбора типовых размеров кабельной арматуры

Решение общей задачей подбора размеров и расчета способа укладки предполагает последовательный перебор вариантов типовых размеров кабельной арматуры и для каждого варианта решения задачи расчета порядка и способа укладки. Если число типовых размеров относительно невелико, а трудоемкость алгоритма решения частной задачи невысока, то процесс поиска подбора размера арматуры можно построить на переборе всех вариантов из множества  $M$ .

Однако в ряде случаев можно сократить издержки без уменьшения точности решения задачи. Рассмотрим случай лексикографическая свертки вида ((4), (5), (6)) или ((4), (6), (5))<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>«Важность» критерия (4) больше «важности» критериев (5) и (6)

Допустим, структура множества вариантов типовых размеров кабельной арматуры  $M$  такова, что всегда выполняется условие: для любой пары типовых размеров  $a$  и  $b$ , если ширина  $a$  больше ширины  $b$  следует, что высота  $a$  не меньше высоты  $b$ .

В этом случае предлагается осуществлять выбор размера кабельной арматуры по схеме дихотомии [8] на множестве  $M$ , упорядоченном согласно (7):

$$a < b \Leftrightarrow (W_a < W_b) \vee (W_a = W_b \wedge H_a < H_b), \quad a, b \in M \quad (7)$$

На каждой итерации дихотомии происходит выбор значения  $m \in M$  и находится решение одного частного случая задачи (1-6). Общее число итераций определяется как  $\log_2 |M|$ .

### Силовая модель укладки кабелей

Поиск решения частной задачи расчета порядка и способа укладки в рамках заданной арматуры предлагается построить на базе известного подхода силовой укладки графа (forcedirected) [5], который основан на моделировании сил притяжения и отталкивания между вершинами. Классические алгоритмы силовой укладки построены на итерационной схеме поиска экстремума функции энергии системы, которая описывается в виде интегральной характеристики системы сил (8):

$$\lambda F_{attr} + (1-\lambda)F_{repu} = \lambda \sum_{(i,j) \in E} w_{ij} \|p_i - p_j\|^a + (1-\lambda) \sum_{(i,j): i \neq j} u_i u_j \|p_i - p_j\|^r \quad (8)$$

Здесь  $F_{attr}$  и  $F_{repu}$  описывают энергию сил притяжения и отталкивания, соответственно. Коэффициент линейной свертки  $\lambda$  и показатели степени  $a$  и  $r$  определяют степень влияния каждого компонента на итоговую укладку. Общепринятыми ограничениями являются:  $\lambda \in [0,1]$ ,  $a \geq 0$  и  $r \leq 0$ , т.е., силы притяжения растут, а силы отталкивания убывают с увеличением расстояния.

Принимая во внимание особенности метода, рефлекслируем все ограничения рассматриваемой задачи (1-6) и переформулируем требования в терминах сил, действующих на вершины графа.

Ограничения (1), обеспечивающие отсутствие пересечений, предлагается описать как (9):

$$F_1(p_i, p_j) = F_1(r_{ij}) = \begin{cases} r_{ij}^{-2}, & r_{ij} \leq d_i + d_j; \\ r_{ij}^{-1}, & r_{ij} > d_i + d_j. \end{cases} \quad (9)$$

где  $r_{ij} = \|p_i - p_j\|$ ,  $i \neq j$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ .

Ограничения (2) и (3), контролирующие выход  $i$ -го кабеля  $i = \overline{1, n}$  за пределы ограничивающей области, задаются как силы отталкивания от граничных областей (10), (11):

$$F_2(p_i) = \begin{cases} |d_i - x_i|^3, & x_i < d_i; \\ |x_i - W_m + d_i|^3, & x_i > W_m - d_i; \\ 0, & d_i \leq x_i \leq W_m - d_i. \end{cases} \quad (10)$$

$$F_3(p_i) = \begin{cases} |d_i - y_i|^3, & y_i < d_i; \\ |y_i - H_m + d_i|^3, & y_i > H_m - d_i; \\ 0, & d_i \leq y_i \leq H_m - d_i. \end{cases} \quad (11)$$

Требование (4) в силу того, что  $|M| = 1$  можно отбросить.

Требование (5), направленное на минимизацию высоты укладки пучка кабелей, с точки зрения силы, действующей на  $i$ -ый кабель  $i = \overline{1, n}$ , пример вид (12):

$$F_5(p_i) = -y_i. \quad (12)$$

Требование (6), направленное на компактное размещение групп кабелей, с точки зрения каждой пары вершин графа примет вид (13):

$$F_6(p_i, p_j) = \|p_i - p_j\|^a. \quad (13)$$

В результате система требований задачи (1-6) трансформировалась в систему сил, действующих на вершины графа (9-13). Обобщенную функцию цели в этом случае можно записать через сумму норм всех действующих сил на все объекты графа (14):

$$F(p) = \sum_{v_i \in V} F_V(p_i) + \sum_{\{v_i, v_j\} \in E} F_E(p_i, p_j) \xrightarrow{p \in D} \min, \quad (14)$$

где  $F_V(p_i) = F_2(p_i) + F_3(p_i) + F_5(p_i)$ ,  $F_E(p_i, p_j) = F_1(p_i, p_j) + F_6(p_i, p_j)$ .

Задача поиска оптимального расположения вершин графа с точки зрения критерия (14) будем называть силовой моделью задачи (1-6). Для решения данной задачи будем использовать итерационные алгоритмы, основанные на градиентной оптимизации.

### Реализация алгоритма силовой укладки вершин графа

Алгоритм силовой укладки графа стартует с некоторого начального решения. На каждой итерации алгоритм для каждой вершины вычисляет суммарный вектор сил (9-13), оказывающих влияние на ее расположение. Далее выполняется пересчет положения вершин, вычисляется общее значение функции цели (14). Наилучшее с точки зрения функции цели расположение вершин сохраняется в качестве рекордного результата. Нередко в реализацию классического алгоритма включают условия останова: по числу итераций, по времени работы, по переходу в стадию стагнации – некоторое время (количество итераций) не наблюдается регистрация нового рекорда.

Особенностью данного алгоритма является его квадратичная вычислительная сложность для каждой итерации, которая оценивается как  $O(n^2)$ , что ограничивает его использование при решении задач сверх больших размерностей. На практике, производительности классического алгоритма силовой укладки графа достаточно для решения задач укладки кабелей. Количество кабелей в реальных задачах, как правило, находится в пределах нескольких сотен. При появлении задач большей размерности, возможно применение подходов, изложенных в [10, 11].

Алгоритм силовой укладки должен стартовать с некоторого начального размещения вершин на плоскости. В этом качестве может быть использовано либо случайное размещение, либо размещение, сгенерированное при помощи некоторого «жадного» алгоритма [4]. В простом случае это может быть алгоритм, помещающий кабели в область укладки в порядке убывания их диаметров.

### Описание программного обеспечения

На основе приведенного алгоритма разработано программное обеспечение (далее – ПО) «Компоновщик», которое позволяет автоматизировать решение задач размещения кабелей в кабельных коробках и подвесках.

Пользователю допустима возможность формирования базы данных кабельной арматуры и кабельных изделий. Для формирования задачи Пользователь выбирает из базы данных (рис. 1) варианты арматуры, задает перечень кабелей, задает параметры ограничений. В частности, кабельные коробки характеризуются не только линейными размерами,

но и расположением (горизонтальное или вертикальное исполнение), коэффициентом заполнения, который определяет, в каких пределах допустимо размещать кабели внутри. Кабели идентифицируются названием согласно проекту, типу кабеля (выбирается из базы), а также параметрам допуска в процентах (рис. 2).

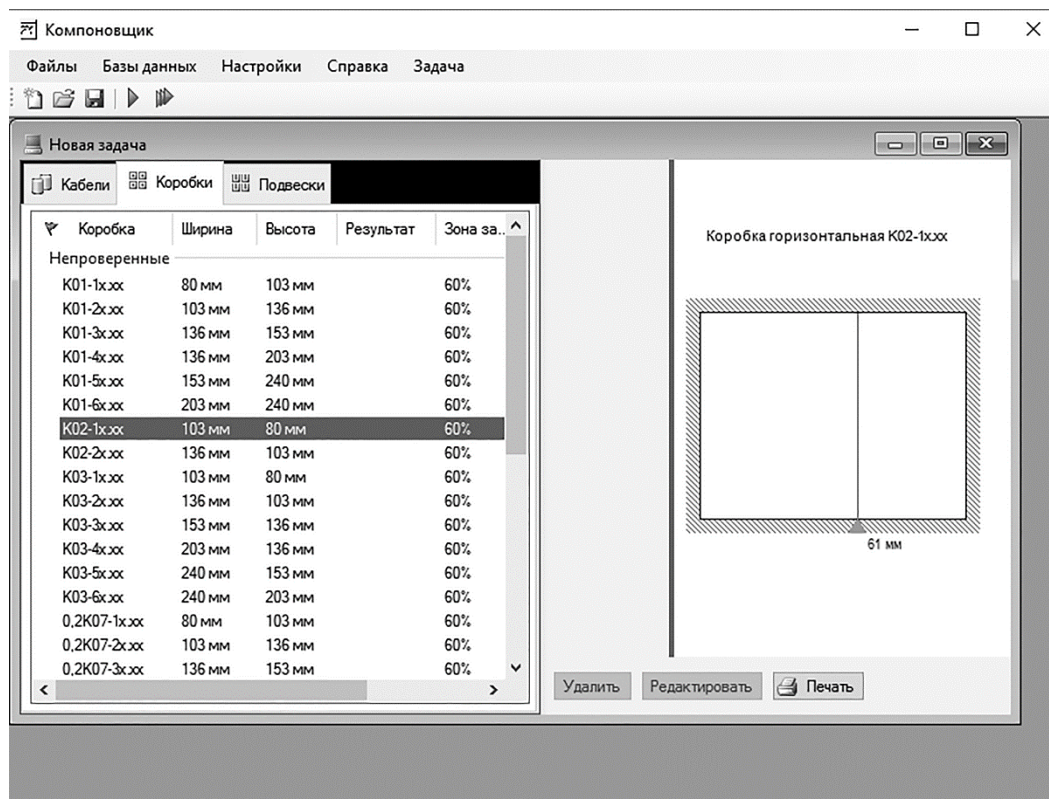


Рис. 1. Перечень кабельной арматуры

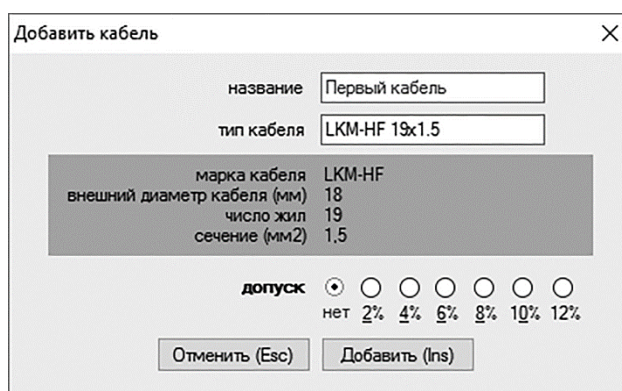


Рис. 2. Добавление кабеля в задачу

Расчет можно выполнить как для отдельно выбранной коробки или подвески, так и для всего списка. После выполнения расчета список элементов кабельной арматуры разделяется на две части – подходящих и не подходящих для размещения заданного набора кабелей (рис. 3). Для каждой кабельной коробки и подвеса отображается полученный результат, выражаемый в процентах заполнения кабелями внутренней площади коробки или подвески. Элементы списка отсортированы в порядке процента заполнения. Пользователь может выбрать любой вариант арматуры и ознакомиться с детальным планом укладки кабелей. Для уточнения параметров полученной компоновки возможно непосредственное ее редактирова-

ние. Пользователь имеет возможность в интерактивном режиме осуществить перемещение любого кабеля, при этом система автоматически пересчитывает и уточнит решение с учетом коррекции Пользователя. Данный функционал продиктован производственной необходимостью, различными нюансами, исключениями, которые невозможно заранее предсказать и учесть.

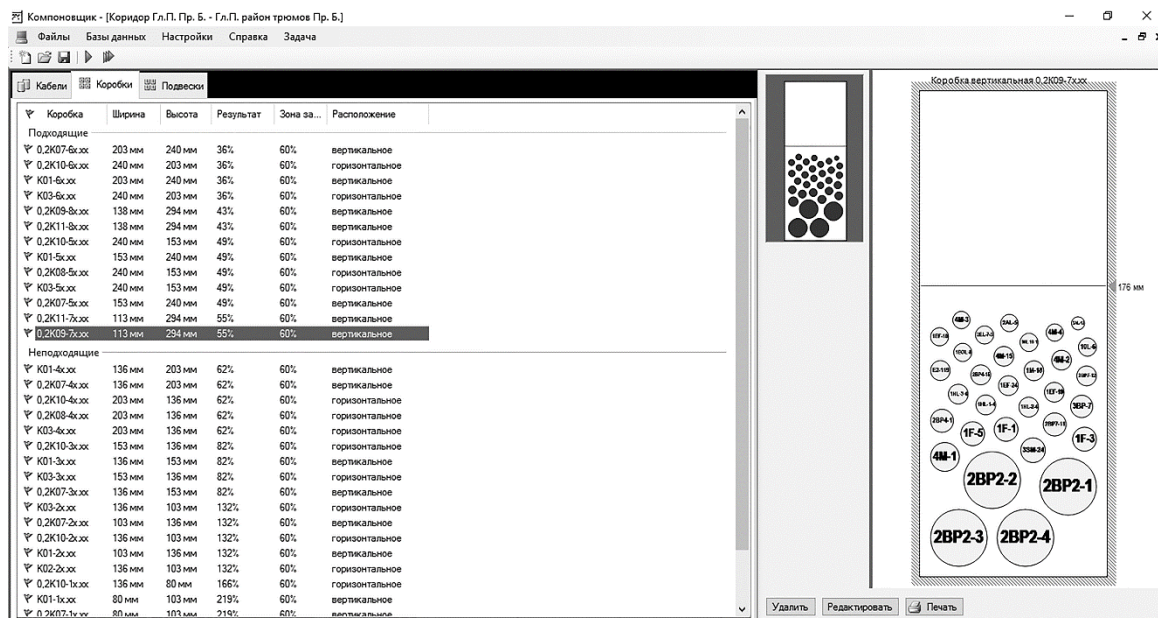


Рис. 3. Решение задачи

Пользователь имеет возможность вывести на печать любое из полученных решений, как непосредственно после автоматического расчета, так и после редактирования – для использования в производственном процессе.

### Результаты промышленной эксплуатации системы

ПО «Компоновщик» прошло апробацию и внедрено в промышленную эксплуатацию в ЗАО «Сормовское Электромонтажное Предприятие» (г. Нижний Новгород). До внедрения ПО использовались расчеты в «ручном режиме», что на практике приводило либо к завышенным габаритам коробок/подвесов, в результате чего не оптимально использовались материалы, либо к обратной ситуации, когда габариты кабельной арматуры оказывались заниженными, что вело к дополнительным работам и затратам. За период эксплуатации ПО общее число некорректного подбора кабельной арматуры практически отсутствует, что говорит о его высокой эффективности и надежности.



## Заключение

В рамках данной работы была исследована прикладная задача компоновки (укладки) кабельных изделий в кабельные короба и подвески прямоугольного сечения типовых размеров, построена математическая модель и разработан метод решения на основе алгоритма силовой укладки графа. Разработанная методика была реализована в программном обеспечении «Компоновщик», позволяющем решать практические задачи укладки кабелей в корпусе судна при его проектировании. ПО внедрено в промышленную эксплуатацию и более 10 лет успешно функционирует в ЗАО «Сормовское Электромонтажное Предприятие» (г. Нижний Новгород).

## Библиографический список

1. **Hifi, M.** Approximate algorithms for constrained circular cutting problems / M. Hifi, R. M'Hallah // *Computers & Operations Research*. Volume 31, Issue 5, 2004. – P. 675-694.
2. **Гэри, М.** Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон. – М.: Мир, 1982, – 416 с.
3. **Новокрещенов, А.А.** Программно-аппаратные средства повышения эффективности использования вычислительных ресурсов в полнопереборных задачах автоматизированного размещения элементов. Информационно-измерительные и управляющие системы / А.А. Новокрещенов, В.П. Хранилов. – 2013. – Т. 11. – № 7. – С. 77-80.
4. **Huang, W.Q.** Greedy algorithms for packing unequal circles into a rectangular container / W.Q. Huang, Y.Li, H Akeb & C.M. Li // *Journal of the Operational Research Society*, 2005, – P. 539-548.
5. **Fruchterman, T.** Graph drawing by force-directed placement / T. Fruchterman, E. Reingold // *Software. Pract. Exp.* – 1991. – № 21(11). – P. 1129-1164.
6. **Zhang, Defu & Liu** Packing Different-sized Circles into a Rectangular Container Using Simulated Annealing Algorithm / Defu & Liu Zhang, Yanjuan & Chen Shengda // *International Conference on Computational Intelligence*, – Istanbul, Turkey, Proceedings 2004, – P. 388-391.
7. **Fu, Zhanghua** Iterated tabu search for the circular open dimension problem / Zhanghua Fu, Huang Wenqi, Lü Zhipeng // *European Journal of Operational Research*. – 2013. – Vol. 225. – P. 236-243.
8. **Старостин, Н.В.** Генетические алгоритмы решения задачи отображения графа / Н.В. Старостин, М.А. Панкратова // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. – 2013. – № 5-1. – С. 204-209.
9. **Старостин, Н.В.** Многоуровневый эволюционно-генетический метод размещения прямоугольников на плоскости / Н.В. Старостин, И.О. Седых, А.Н. Силаев // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. – 2009. – № 5. – С. 163-168.
10. **Батищев, Д.И.** Многоуровневый алгоритм решения задачи компоновки интегральных схем / Д.И. Батищев, Н.В. Старостин, А.В. Филимонов // *Системы управления и информационные технологии*. – 2007. – Т. 29. – № 3. – С. 48-52.
11. **Старостин, Н.В.** Многоуровневый итерационный алгоритм декомпозиции графа // *Системы управления и информационные технологии*. – 2015. – Т.61. – №3. – С. 27-30.

*Дата поступления  
в редакцию: 04.04.2019*

**N.V. Starostin, S.V. Nebaikin**

**ASPECTS OF USING FORCE-DIRECTED GRAPH-DRAWING ALGORITHM IN INDUSTRIAL TECHNOLOGY OF CABLE INSTALLATION IN SHIPBUILDING**

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

**Purpose:** Cable fittings selection is an important part of ship engineering. The paper considers cable fittings selection automation task for choosing a minimal size fitting to house the defined cable set. We formalized the multicriterial fittings size choice and evaluation of cable placement into the fittings task.

**Approach:** We use the lexicographical convolution of criteria to formalize the task. Considering the particular properties of cable fittings, we propose to use a dichotomy for a process of choosing. Modeling cable set as weighted graph allows using the force-directed algorithm to evaluate the cable set placement for the different fittings.

**Results:** We used the considered methods while implementing the software, which allows solving applied tasks of finding an optimal cable fitting. One of the companies specialized on electrical installation (including one in the shipbuilding) successfully uses this software for several years.

*Key words:* graph drawing, force-directed algorithm, cable fittings, software.

УДК 519.63

Е.С. Тятюшкина

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАВЕРНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ ПРИ ПАДЕНИИ ТЕЛА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты численного исследования изменений параметров каверны в зависимости от угла входа тела в воду. Расчеты выполнены в рамках уравнений Навье-Стокса с использованием вычислительного комплекса ЛОГОС. Изучены размеры области возмущения и выявлены закономерности изменения параметров каверны. Представлены картины изменения водной поверхности, а также графики зависимости параметров каверны от скорости входа и от угла входа тела в воду. Показано, что существует критическая скорость, до достижения которой параметры изменяются интенсивно, и после ее достижения рост параметров практически прекращается. На основе результатов численного моделирования построена функция, которая описывает изменения параметров каверны от скорости и от угла входа тела в воду.

*Ключевые слова:* уравнения Навье-Стокса, поверхностные волны, падение тела, каверна, скорость падения, угол падения, закономерность.

### Введение

Исследованиям взаимодействия тел с жидкостью, в частности, при вхождении метеорита в воду, посвящены многие работы [1-5]. В них приводятся аналитические и численные решения, результаты экспериментальных и лабораторных исследований. Взаимодействие тела с поверхностью жидкости и его дальнейшее погружение определяется многими факторами: скоростью и углом вхождения тела, массой и формой тела, физическим состоянием воздушной и жидкой сред в момент взаимодействия, свойствами тела и многими другими факторами, учет влияния которых существенно усложняет анализ. В исследованиях падения тел в воду основными изучаемыми характеристиками являются силы, действующие на тело, и параметры возникающих волн на поверхности воды. Для аналитических оценок популярной моделью является теория идеальной жидкости без учета влияния воздуха [2], позволяющая рассчитать волновое поле, а также волновое сопротивление.

В работе [6] представлены результаты численного исследования падения тела в воду при различных углах входа и разных скоростях. Для численных экспериментов используется модель, основанная на уравнениях Навье-Стокса для многофазных течений со свободной поверхностью. В рамках этой модели исследован процесс генерации возмущений в воде и на ее поверхности, и определены размеры области возмущения. Показано, что изменение параметров каверны наиболее интенсивно происходит при углах падения тела в воду более  $20^\circ$  и подчиняется квазилинейному закону. Интенсивность изменения растет по мере увеличения скорости, а тенденция линейного изменения сохраняется.

Исследования работы [6] были проведены для падения тела одного диаметра с разными скоростями. Наиболее полную картину закономерности изменения параметров каверны можно получить, исследуя процесс падения тел разного диаметра с различными скоростями в бассейны различной глубины. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования вхождения тела в воду с диаметрами 1 м, 5 м, 10 м и 20 м под углами  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$  со скоростями 50 м/с, 100 м/с, 200 м/с, 500 м/с и 1000 м/с. Моделирование проводилось с целью исследования закономерностей изменения параметров образовавшейся каверны, а именно: глубины каверны, внутреннего и внешнего радиусов, а также высот возникающих волн.

### Основные уравнения и метод расчета

Рассмотрим систему «воздух-вода» как совокупность двух несжимаемых сред, разделенных границей раздела. Будем использовать односкоростное приближение, в котором уравнение неразрывности и уравнение сохранения импульса едины, как для воды, так и для воздуха, и решаются для результирующей среды, свойства которой линейным образом зависят от объемной доли [7]. Такой подход достаточно распространен и дает хорошие результаты при решении задач со свободной поверхностью [8, 9], в том числе и для волн цунами [10, 11].

В рамках этого приближения движение данной системы описывается уравнениями Навье-Стокса, включающими уравнения неразрывности, сохранения импульса, а также уравнением для объемных долей фаз [8, 15, 19] (1):

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \sum_k \alpha^{(k)} \rho^{(k)} \mathbf{u} = -\nabla \cdot \sum_k (\alpha^{(k)} \rho^{(k)} \mathbf{u} \mathbf{u}) + \nabla \cdot \sum_k (\alpha^{(k)} \mu^{(k)} \nabla \mathbf{u}) - \nabla p + \sum_k \alpha^{(k)} \rho^{(k)} \mathbf{g}, \\ \frac{\partial}{\partial t} \alpha^{(k)} \rho^{(k)} + \nabla \cdot (\alpha^{(k)} \rho^{(k)} \mathbf{u}). \end{cases} \quad (1)$$

где  $\mathbf{u}$  – трехмерный вектор скорости,  $\rho^{(k)}$  – плотность фазы  $k$ ,  $\alpha^{(k)}$  – ее объемная доля,  $\sum_k \alpha^{(k)} = 1$ ),  $p$  – давление,  $\mu^{(k)}$  – молекулярная вязкость фазы  $k$ ,  $\mathbf{g}$  – ускорение свободного падения.

Данная система решается без использования осреднения по Рейнольдсу и последующего замыкания уравнений для моментов турбулентности, т.е. турбулентность разрешается прямым численным моделированием (DNS – Direct Numerical Simulation). Это позволяет разрешить турбулентные структуры, минимальный масштаб которых определяется сеточным разрешением. Для сеточных моделей, используемых при расчетах в рамках данной статьи, разрешиваются только достаточно крупные вихри. Поскольку целью расчетов является анализ параметров источника до начала обрушения образовавшейся каверны и образования мелких вихрей, то данный подход можно считать справедливым. Отметим здесь, что, так как разрешиваются только крупные вихревые структуры, ослабляются достаточно жесткие требования, предъявляемые к схемной вязкости и диссипативности численных схем, которые необходимо использовать для моделирования турбулентных течений [13, 14].

Дискретизация системы уравнений (1) осуществляется методом конечных объемов на произвольной неструктурированной сетке, а для ее численного решения используется полностью неявный метод [15, 18, 19], основанный на известном алгоритме SIMPLE [16, 17]. Моделирование течений со свободной поверхностью подразумевает определенные модификации алгоритма SIMPLE. Описание основных формул модифицированного алгоритма SIMPLE, граничных условий и реализации в пакете программ ЛОГОС детально описано в [15, 18, 19]. Для моделирования движения тела используется подход, основанный на применении многообластных сеток с перекрытиями (сетки «Химера») [20, 21]. В этом случае, основная расчетная область представляет собой «базовую» сетку, по которой движется отдельная расчетная сетка, окружающая твердое тело. Полученные геометрические модели объединяются в одну сетку, представляющую исходную задачу. Взаимодействие «базовой» и дополнительной сеток осуществляется с использованием интерполяционного шаблона, предназначенного для корректного взаимодействия топологически несвязанных регионов. Одним из достоинств данного подхода является возможность использования достаточно больших расчетных областей. Сеточное разрешение может быть грубым в областях, расположенных вдалеке от твердого тела, тогда как в его окрестности строится расчетная сетка с подробным разрешением. Отслеживание границ твердого тела происходит автоматически.

Описанная физико-математическая модель реализована в пакете программ ЛОГОС – отечественном программном продукте, предназначенном для решения сопряженных трехмерных задач конвективного теплопереноса, аэродинамики и гидродинамики на параллельных ЭВМ [17]. Параллельная реализация модели основана на алгебраическом многосеточном методе [18, 22], позволяющем эффективно использовать сотни вычислительных ядер, а также существенно улучшить сходимость численного метода [22]. Пакет программ ЛОГОС ориентирован на решение задач вычислительной гидродинамики на произвольных неструктурированных сетках. Пакет программ ЛОГОС успешно прошел верификацию и показал достаточно хорошие результаты на серии различных гидродинамических задач, включая расчеты турбулентных [13, 14, 23] и геофизических течений [6, 11, 15].

### Моделирование возмущений при падении тел в воду в различных условиях

Рассмотрим падение сферических твердых тел диаметрами 1 м, 5 м, 10 м и 20 м в воду при различных скоростях падения и под различными углами атаки. Плотность тел взята равной  $3,3 \text{ г/см}^3$ , параметры воды и воздуха стандартные. Расчетная область – цилиндр диаметром 1400 м и высотой 600 м представляет собой неструктурированную трехмерную сетку, состоящую из усеченных многогранников произвольной формы (рис. 1). Расчетная сетка построена средствами препроцессора пакета программ ЛОГОС.

Невозмущенная глубина воды равна 100 м. Высота невозмущенного воздушного потока над уровнем воды составляет 500 м. На рис. 1 представлена расчетная сетка, характерный размер ячейки которой был выбран 50 м. Для более детального разрешения образовавшейся каверны было построено несколько сеточных блоков со сгущением, характерные размеры ячеек в которых были следующими: от –100 до 210 м по вертикали –  $\Delta z = 5 \text{ м}$ ; от –5 м до 150 м –  $\Delta z = 1 \text{ м}$ , от 210 м до 320 м –  $\Delta z = 10 \text{ м}$ . Данные размеры представлены для сетки, построенной для моделирования падения тела диаметром 10 м. Сеточные модели для тел других диаметров, строились аналогично, изменялись только размеры ячеек в дополнительных сеточных блоках.

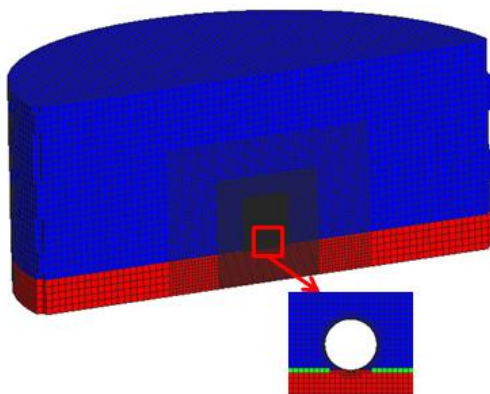
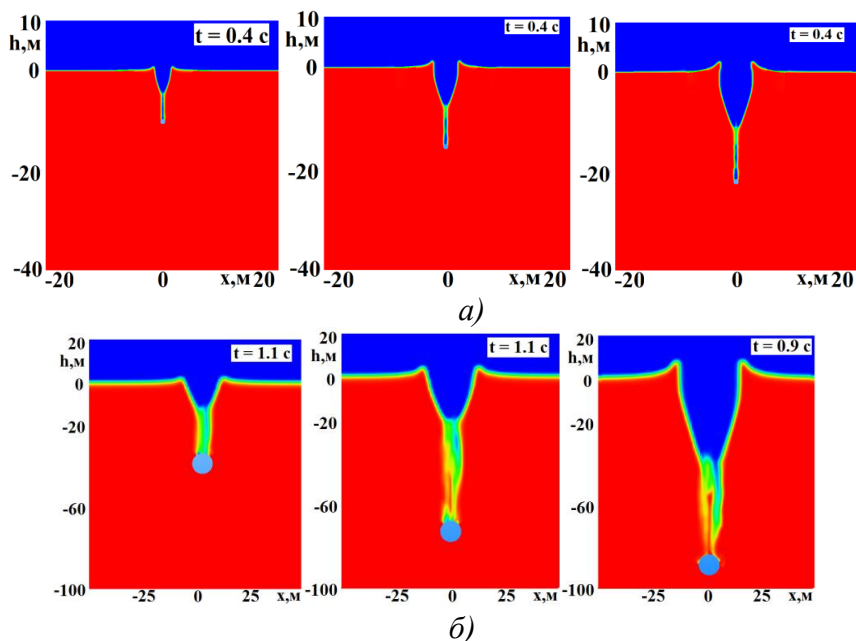


Рис. 1. Модельная дискретная область

Расчеты проводились с начальной скоростью вхождения тела в воду 50 м/с, 100 м/с, 200 м/с, 500 м/с и 1000 м/с, угол входа равен  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$  относительно поверхности воды, диаметр тела – 1 м, 5 м, 10 м и 20 м. Полет тела в воздухе не моделируется, движение тела начинается от поверхности воды, а при достижении дна тело автоматически останавливается.

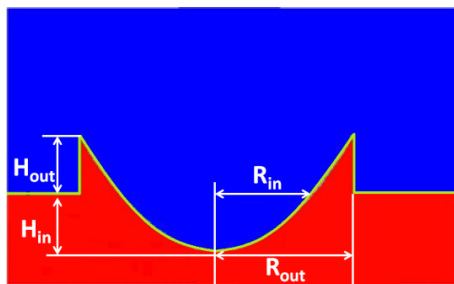
На рис. 2 представлены картины изменения водной поверхности при моделировании падения тел диаметрами 1 м и 10 м вертикально вниз. При падении тела вертикально вниз образовавшаяся каверна имеет симметричную структуру (рис. 2). Детальный анализ вертикального падения тела в воду в рамках данной модели приведен в [24]. Отметим, что карти-

ны изменения водной поверхности для тел всех диаметров примерно одинаковы, поэтому здесь приведены только для тел диаметрами 1 м и 10 м со скоростями падения 50 м/с, 100 м/с и 200 м/с.



**Рис. 2. Падение тела вертикально вниз: а – 1 м; б – 10 м**  
(скорости 50 м/с, 100 м/с, 200 м/с (слева направо), красная фаза – вода, синяя – воздух)

Структура каверны при падении тела характеризуется такими параметрами, как глубина, внутренний и внешний радиусы и высота волн, на «краях» каверн (рис. 3):  $R_{in}$  – внутренний радиус каверны,  $R_{out}$  – внешний радиус каверны,  $H_{in}$  – глубина каверны,  $H_{out}$  – высота подъема каверны.



**Рис. 3. Основные параметры каверны, образованной при вертикальном падении**

Оценить закономерность изменения каверны можно именно по этим параметрам. Слишком точно определить величины этих параметров для произвольного падения тела весьма проблематично ввиду размытости границ, поэтому здесь приводятся приблизительные (оценочные) данные.

На рис. 4 представлена логарифмическая зависимость параметров каверны от скорости падения для вертикального падения тела. Наиболее интенсивно изменения параметров каверны происходит до скорости 200 м/с, дальше их рост слабее. Таким образом, для всех диаметров при достижении определенной критической скорости в дальнейшем параметры каверны почти не меняются, а до достижения этой критической скорости, они меняются квазилинейно, что соответствует исследованиям в статье [6]. Так как на графиках (рис. 4) наблюдается квазилинейная зависимость до скорости 200 м/с, можно попробовать подобрать определенную функцию, которая описывала бы изменения параметров каверны. Численные

расчеты показали, что все геометрические размеры каверны в зависимости от скорости движения тела  $V$  близки к степенной зависимости:  $\sqrt{V}$  до критической скорости 200 м/с, а выше – к зависимости  $V^{3/10}$ .

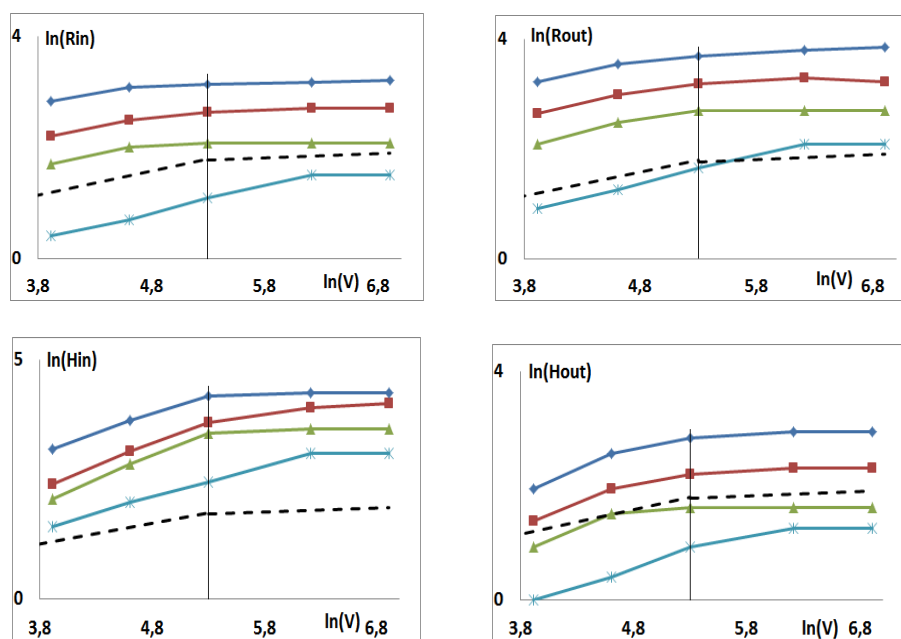


Рис. 4. Логарифмическая зависимость параметров каверны от скорости:

\* - 1 м, ▲ - 5 м, ■ - 10 м, ◆ - 20 м, - - - степенная аппроксимация  
(вертикальная черта соответствует значению скорости 200 м/с)

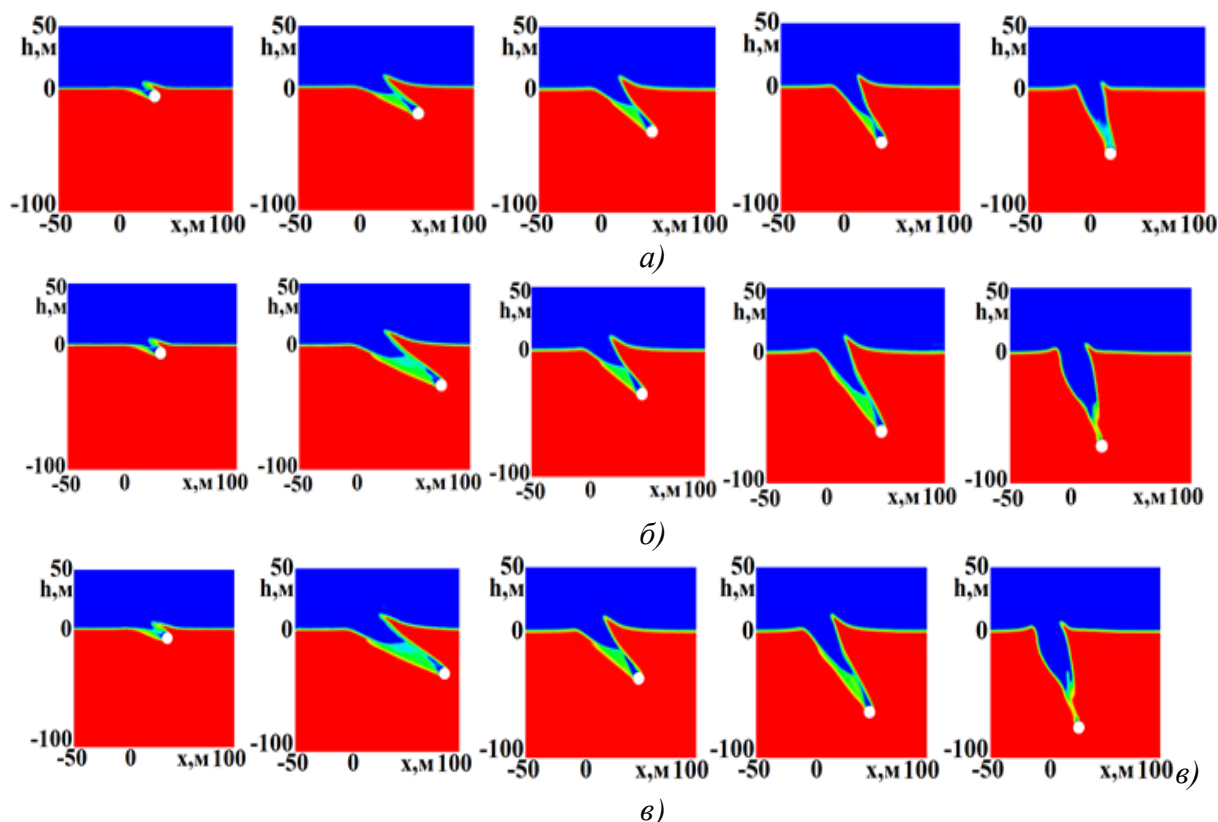


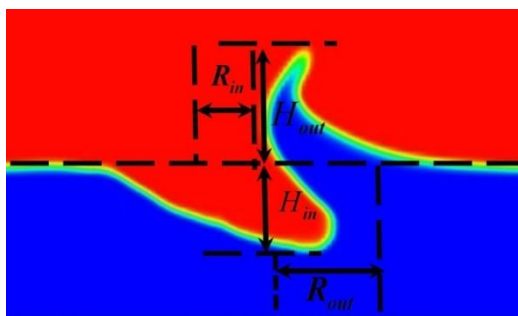
Рис. 5. Падение тела диаметром 10 м: а – 100 м/с; б – 500 м/с; в – 1000 м/с  
(слева направо угол падения  $20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ , красная фаза – вода, синяя – воздух)

На рис. 5 представлены картины изменения водной поверхности при моделировании падения тел диаметром 10 м под углами  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ . Для других диаметров картины выглядят аналогично.

При вхождении тела в воду под углом перед ним наблюдается сильный всплеск, в то время как за телом всплеск практически не наблюдается или существенно меньше переднего всплеска (рис. 6). По мере увеличения скорости падения высота переднего всплеска увеличивается, увеличивается также глубина каверны. Передний всплеск имеет «серповидную» форму и поэтому будет обрушаться как на внутреннюю сторону каверны, так и на внешнюю по ходу падения тела.

При угле падения  $20^\circ$  каверны почти не наблюдаются. Увеличение угла падения уменьшает величину переднего всплеска и увеличивает величину заднего, при этом увеличивается размер полной каверны. При увеличении угла падения форма передней волны меняется: от «серповидной» переходит к вертикальному всплеску вверх. Обрушение этого всплеска будет происходить по схеме падения тела вертикально вниз с уклоном на внутреннюю часть каверны, практически не захватывая внешней ее стороны по ходу падения тела. Во внутреннюю часть каверны будет обрушаться и задний всплеск. При увеличении угла падения до  $75^\circ$  задний всплеск еще увеличивается и становится незначительно ниже переднего.

На рис. 7 представлены логарифмические зависимости параметров каверны (рис. 6), образованной падением тела под углом, от угла падения.



**Рис. 6. Основные параметры каверны, образованной падением тела под углом**

Из представленных графиков (рис. 7) видно, что с увеличением угла входа внешний и внутренний радиус каверны уменьшаются, передний всплеск также уменьшается, а глубина каверны увеличивается.

Для зависимости параметров каверны от угла входа тела также можно подобрать степенную аппроксимацию (рис. 7), которая описывала бы изменения параметров каверны. Для внутреннего и внешнего радиусов, а также для высоты всплеска эта зависимость близка к  $\alpha^{-9/5}$ , а для глубины каверны  $\alpha^{6/5}$ , где  $\alpha$  – угол входа тела в воду.



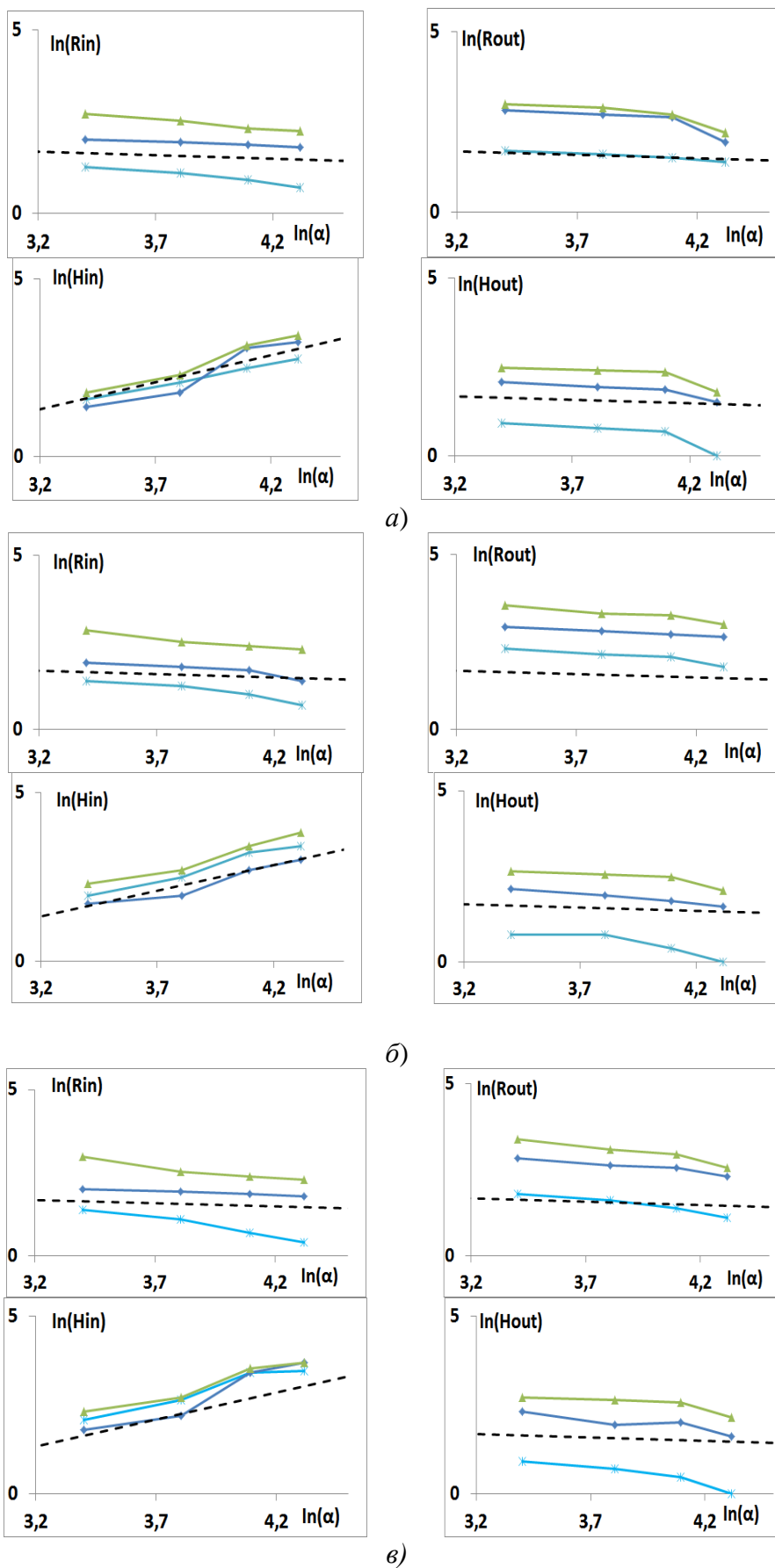


Рис. 7. Логарифмическая зависимость параметров каверны от угла при падении тел со скоростью: *a* – 100 м/с; *б* – 500 м/с; *в* – 1000 м/с диаметрами (\* – 1 м, ◆ – 5 м, ▲ – 10 м, - - - степенная аппроксимация)

### Заключение

В работе представлены результаты численного исследования падения тел разных диаметров в воду при различных углах входа и разных скоростях. Для численных экспериментов используется модель, основанная на уравнениях Навье-Стокса для многофазных течений со свободной поверхностью. Модель основана на односкоростном приближении и базируется на полностью неявной связи скорости и давления.

В рамках этой модели исследован процесс генерации возмущений в воде и на ее поверхности, и определены размеры области возмущения. Показано, что при угле падения тела в воду  $20^\circ$  каверны почти не наблюдаются, а наиболее интенсивно изменение параметров каверны происходит после  $20^\circ$  и подчиняется квазилинейному закону. Показано, что скорость падения тела 200 м/с является критической, т.е. наиболее сильно изменения параметров происходит до этой скорости, дальше их рост слабее.

При увеличении угла входа внешний и внутренний радиус каверны уменьшаются, передний всплеск также уменьшается, а глубина каверны увеличивается.

Также показано, что экспериментальным путем можно выявить параметризацию, которая бы хорошо описывала изменения параметров каверны. Для зависимости параметров от скорости падения были выявлены степенные аппроксимации  $V^{1/2}$ , описывающая изменение параметров до достижения критической скорости 200 м/с, и  $V^{3/10}$ , описывающая изменение параметров после достижения критической скорости, где  $V$  – скорость падения тела. Для зависимости параметров каверны от угла входа тела подобрана аппроксимация вида  $\alpha^{-9/5}$  – для внутреннего и внешнего радиусов, а также для высоты всплеска, и  $\alpha^{6/5}$  – для глубины каверны ( $\alpha$  – угол входа тела в воду).

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке научных исследований молодых российских ученых-докторов наук МД-4874.2018.9 и ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2685.2018.5.*

### Библиографический список

1. **Aristoff, J.M.** The water entry of decelerating spheres / J.M. Aristoff, T.T. Truscott, A.H. Techet, J.W.M. Bush // *Physics of Fluids*. – 2010. – V. 22. – P. 032102.
2. **Shuvalov, V.V.** Numerical Modeling of Marine Target Impacts / V.V. Shuvalov, I.A. Trubetskaya // *Solar System Research*. – 2002. – V. 36. – №. 5. – P. 417-430.
3. **Gekle, S.** Supersonic Air Flow due to Solid-Liquid Impact / S. Gekle, I.R. Peters, J.M. Gordillo, D. van der Meer, D. Lohse // *Physical Review Letters*. – 2010. – V. 104. – P. 024501.
4. **Aristoff, J.M.** On falling spheres: the dynamics on water entry and descent along a flexible beam / J.M. Aristoff // PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2009.
5. **Pierazzo, E.** Validation of numerical codes for impact and explosion cratering: Impacts on strengthless and metal targets / E. Pierazzo, N. Artemieva, E. Asphaug, E.C. Baldwin, J. Cazamias, R. Coker, G.S. Collins, D.A. Crawford, T. Davison, D. Elbeshausen, K.A. Holsapple, K.R. Housen, D.G. Korycansky, K. Wunemann // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2008. – V. 43. – №. 12. – P. 1917–1938.
6. **Козелков, А.С.** Влияние угла входа тела в воду на высоты генерируемых волн / А.С. Козелков, А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. – 2016. – № 2. – С. 166-176.
7. **Hirt, C.W.** Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries / C.W. Hirt, B.D. Nichols // *Journal of Computational Physics*. – 1981. – V. 39. – P. 201-225.
8. **Ubbink, O.** Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces / O. Ubbink // PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering Imperial College of Science, Technology & Medicine, 1997.
9. **Waclawczyk, T.** Remarks on prediction of wave drag using VOF method with interface capturing approach / T. Waclawczyk, T. Koronowicz // *Archives of civil and mechanical engineering*. – 2008. – V. 8. – P.5-14.

10. **Horrillo, J.** A simplified 3-D Navier-Stokes numerical model for landslide-tsunami: Application to the Gulf of Mexico / J. Horrillo, A. Wood, G.B. Kim, A. Parambath // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2013. – V. 118. – P. 6934–6950.
11. **Козелков, А.С.** Моделирование возмущений в озере Чебаркуль при падении метеорита в 2013 году / А.С. Козелков, А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский, В.В. Курулин, Е.С. Тятюшкина // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. – 2015. – № 6. – С. 134-143.
12. **Khrabry, A.I.** Free surface flow computations using the MCICCSAM scheme added with a sharpening procedure / A.I. Khrabry, E.M. Smirnov, D.K. Zaytsev // *Proceedings of the 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012)*, Vienna, Austria, 10-14 September 2012.
13. **Козелков, А.С.** Численная схема для моделирования турбулентных течений несжимаемой жидкости с использованием вихреразрешающих подходов / А.С. Козелков, В.В. Курулин // *Вычислительная математика и математическая физика*. – 2015. – Т. 55. – № 7. – С. 135-146.
14. **Козелков, А.С.** Моделирование турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости на неструктурированных сетках с использованием модели отсоединенных вихрей / А.С. Козелков, В.В. Курулин, О.Л. Пучкова, Е.С. Тятюшкина // *Математическое моделирование*. – 2014. – Т. 26. – № 8. – С. 81–96.
15. **Козелков, А.С.** Методика численного моделирования цунами оползневого типа на основе уравнений Навье-Стокса / А.С. Козелков // *Вычислительная механика сплошных сред*. – 2016. – Т. 9. – № 2. – С. 218-236.
16. **Ferziger, J.H.** *Computational Method for Fluid Dynamics* / J.H. Ferziger, M. Peric. – New York: Springer-Verlag, 2002, – 423 p.
17. **Волков, К.Н.** Параллельная реализация алгебраического многосеточного метода для решения задач вязкой несжимаемой жидкости / К.Н. Волков, А.С. Козелков, С.В. Лашкин, Н.В. Тарасова, А.В. Ялозо // *Вычислительная математика и математическая физика*. – 2017. – Т. 57. – № 12. – С. 2079-2097.
18. **Kozelkov, A.S.** Three dimensional numerical simulation of tsunami waves based on the Navier-Stokes equations / A.S. Kozelkov, V.R. Efremov, A.A. Kurkin, E.N. Pelinovsky, N.V. Tarasova, D.Yu. Strelets // *Science of tsunami Hazards*. – 2017. – V. 36. – №. 4. – P.183-196.
19. **Kozelkov, A.S.** An implicit algorithm of solving Navier–Stokes equations to simulate flows in anisotropic porous media / A.S. Kozelkov, S.V. Lashkin, V.R. Efremov, K.N. Volkov, Yu.A. Tsibereva, N.V. Tarasova // *Computers and Fluids*. – 2018. – V. 160. – P. 164–174.
20. **Benek, J.A.** A 3-D Chimera Grid Embedding Technique / J.A. Benek, P.G. Buning, J.L. Steger // *AIAA Paper*. – 1985. – P 85-1523.
21. **Wang, Z.J.** A Fully Automated Chimera Methodology for Multiple Moving Body Problems / Z.J. Wang, V. Parthasarathy // *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. – 2000. – V. 33. – № 7. – P. 919-938.
22. **Козелков, А.С.** Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач гидродинамики в промышленных приложениях / А.С. Козелков, Р.М. Шагалиев, В.В. Курулин, А.В. Ялозо, С.В. Лашкин // *Вычислительная математика и математическая физика*. – 2016. – Т. 56. – № 8. – С. 1524–1535.
23. **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.
24. **Козелков, А.С.** Моделирование цунами космогенного происхождения в рамках уравнений Навье-Стокса с источниками различных типов / А.С. Козелков, А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский, В.В. Курулин // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. – 2015. – № 2. – С. 142-150.

*Дата поступления  
в редакцию: 17.04.2019*

**E.S. Tyatyushkina**

**INVESTIGATION OF PARAMETERS OF A CAVITY ON WATER SURFACE  
IMPACTED BY A FALLEN BODY**

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

**Purpose:** The paper discusses the effect of the dimensions, velocity and water entry angle of a body on the parameters of a cavity on the water surface generated by the body fallen from a height.

**Design/methodology/approach:** Physical-mathematical and computational models for the simulation of flows of a viscous incompressible fluid with a free surface form the basis for the numerical investigations.

**Results:** Regularities have been revealed in the variation of parameters depending on the body dimensions, its velocity and angle of water entry.

**Area of applicability:** The obtained results may be useful for the simulation of bodies entering water from a height.

*Key words:* Navier-Stokes equations, surface waves, fall of a body, cavity, velocity of fall, angle of entry from a height, regularity.

УДК 330.4

Р.В. Шамин<sup>1,2</sup>, Р.А. Чурсин<sup>2</sup>, А.Г. Шмелева<sup>1,2</sup>, Е.А. Галемина<sup>1</sup>,  
С.Ю. Обыденнова<sup>3</sup>, Е.В. Фролагина<sup>3</sup>

## ОПТИМИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ИНВЕСТИЦИЙ НАУКОЕМКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

МИРЭА – Российский технологический университет<sup>1</sup>

Российский университет дружбы народов<sup>2</sup>

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>3</sup>

В статье рассматривается имитационная модель, описывающая импульсные инвестиции для наукоемких предприятий. Под импульсными инвестициями понимается единовременное финансирование предприятия в заданные моменты времени. Предложена новая оптимизационная задача для количественных расчетов плана инвестиций для достижения заданных целевых показателей. Показано, что полученная экстремальная задача является некорректной по Тихонову, поэтому для построения вычислительных процедур необходимо использовать регуляризацию некорректных экстремальных задач по Тихонову. Для численного нахождения оптимального плана инвестиций используется метод роения частиц, который является эффективным при многомерной оптимизации для негладких функций. Представлен пример расчета оптимальной схемы импульсного финансирования в рамках предложенной экономико-математической модели.

*Ключевые слова:* имитационная модель, инвестиции, наукоемкие предприятия, оптимизационная задача, регуляризация некорректных экстремальных задач.

### Введение

Проблема инвестиций в наукоемкие предприятия носит фундаментальный характер, поскольку финансирование НИР и НИОКР имеет собственную специфику [1]. В настоящей работе рассматриваются импульсные инвестиции, под которыми понимается единовременное финансирование предприятия в заданные моменты времени в течение длительного промежутка времени. В реальности эта модель хорошо отражает ситуацию, когда финансирование происходит раз в месяц или раз в год, и т.д. Предполагается, что в результате финансирования увеличивается результативность деятельности предприятия. Под результативностью мы понимаем некоторый интегральный количественный показатель. Разумеется, при отсутствии дальнейшего финансирования результативность должна снижаться. Основная проблема состоит в оптимальном распределении импульсного финансирования таким образом, чтобы обеспечить заданную результативность предприятия [2].

В работе предложена оригинальная математическая модель для описания процесса импульсного финансирования и построена оптимизационная задача для количественного расчета оптимальной схемы импульсных инвестиций. При этом следует учесть, что построенная оптимизационная задача является некорректной экстремальной задачей, поскольку решения этой задачи не зависят непрерывно от исходных данных [3]. Поэтому мы рассматриваем метод регуляризации этой некорректной задачи по Тихонову.

### Математические обозначения

Рассмотрим экономико-математическую модель распределения инвестиций в наукоемкое предприятие. Ее целью является вычисление оптимального распределения инвестиций в рассматриваемое предприятие таким образом, чтобы поддерживать заданный уровень результативности инвестиций.

Мы будем рассматривать некоторое предприятие  $P$ , управление которым будет состоять в распределении финансирования. При этом целью управления предприятием является обобщенный показатель результативности деятельности предприятия. Под результативностью можно понимать различные показатели, например, следующие:

- прибыль;
- уровень инновационности;
- конкурентоспособность и т.д.

Введем соответствующие обозначения. Будем рассматривать математическую модель с непрерывным временем, которое будем обозначать через  $t$ .

Распределение инвестиций мы будем описывать функцией  $u(t)$ , при этом будем считать, что эта функция представляет собой линейную комбинацию обобщенных функций, поскольку по своему экономическому смыслу – финансирование является импульсной функцией. Показатель результативности финансирования мы обозначим через  $I(t)$ . По экономическому смыслу – функции  $u(t)$  и  $I(t)$  являются неотрицательными.

### Динамическая модель

Чтобы задать связь функций  $u(t)$  и  $I(t)$ , необходимо ввести передаточную функцию  $K(t)$ , которая будет показывать результат вклада в функцию результативности  $I(t)$  при импульсном воздействии функции  $u(t)$  в момент времени  $t = 0$ . Используя передаточную функцию, связь между функцией финансирования и результативности можно записать в виде интегрального уравнения (1)

$$I(t) = \int_0^t K(t-s)u(s)ds. \quad (1)$$

Передаточная функция имеет следующие свойства:

- 1)  $K(t) \geq 0$ .
- 2)  $K(t) = 0, t \leq 0$ .
- 3)  $K(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$ .

Первое свойство показывает, что влияние финансирования на результативность не может быть отрицательным. Разумеется, в некоторых реальных ситуациях это свойство может нарушаться, но в нашей модели мы рассматриваем крупные инвестиции, поэтому считаем, что это влияние не может быть отрицательным.

Второе свойство показывает, что прошлое не зависит от будущего. Естественным образом финансирование влияет только на будущее, а не на прошлое.

Третье свойство отражает тот факт, что любые инвестиции имеют конечное время действия на результативность, и с течением времени их влияние нивелируется.

Уравнение (1) представляет собой линейное интегральное уравнение первого рода.

### Импульсные инвестиции

Как мы уже отмечали, в экономических ситуациях мы должны рассматривать не непрерывные функции финансирования, а импульсные инвестиции. Будем рассматривать финансирование в заданные моменты времени

$$0 < t_1 < t_2 < \dots < t_N.$$

В каждый из моментов  $t_k$  уровень финансирования мы будем обозначать через  $u_k$ . Используя формализм  $\delta$  – функций, функцию импульсных инвестиций можно записать следующим образом (2):

$$u(t) = \sum_{k=1}^N u_k \delta(t - t_k). \quad (2)$$

Подставляя эту функцию в интегральное уравнение (1), получаем следующее уравнение (3)

$$I(t) = \sum_{k=1}^N K(t-t_k) u_k. \quad (3)$$

Пусть мы имеем желаемый уровень результативности нашего предприятия, который выражается в виде функции  $J(t)$ . Тогда задача сводится к нахождению таких значений

$$u_1^*, u_2^*, \dots, u_N^*,$$

которые при подстановке в равенство (2) приведут к тождеству (4):

$$J(t) = \sum_{k=1}^N K(t-t_k) u_k^*. \quad (4)$$

С математической точки зрения, эта задача является некорректной, поскольку она может не иметь точного решения, может иметь не единственное решение, а также она может быть неустойчивой по отношению к возмущениям.

### Метод расчета плана инвестиций

Планом инвестиций мы будем называть величины:

$$u_1, u_2, \dots, u_N.$$

Оптимизировать план инвестиций мы будем таким образом, чтобы минимизировать следующую величину (5):

$$D(t, u_1, u_2, \dots, u_N) = \left( \int_0^T |I(t) - J(t, u_1, u_2, \dots, u_N)|^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min. \quad (5)$$

Таким образом, мы имеем задачу минимизации функции  $N$  переменных.

Как мы уже отмечали, эта задача является некорректной, поэтому для численных расчетов необходимо использовать регуляризацию по Тихонову [4]. Для этого мы модифицируем исходную задачу, добавляя к функции  $D$  новую функцию с малым параметром (6):

$$D(t, u_1, u_2, \dots, u_N) + \alpha \Omega(u_1, u_2, \dots, u_N) \rightarrow \min. \quad (6)$$

Здесь  $\alpha > 0$  – это малый параметр, а функция  $\Omega$  называется стабилизатором, которая вычисляется по следующей формуле (7):

$$\Omega(u_1, u_2, \dots, u_N) = \sum_{k=1}^N u_k^2. \quad (7)$$

Использование стабилизатора позволяет регуляризовать исходную задачу.

Для численного нахождения оптимального плана инвестиций предполагается использовать метод роения частиц, который оказывается эффективным при многомерной оптимизации для негладких функций [5].

### Результаты численного моделирования

Рассмотрим модельный пример оптимизации импульсных инвестиций. Мы будем рассматривать финансирование при  $N = 10$ . Будем рассматривать ситуацию, когда нам необходимо обеспечить результативность:

$$I(t) = 10,$$

в безразмерных величинах.

В качестве переходной функции возьмем следующую функцию (8):

$$K(t) = \frac{t}{1+t^2}. \quad (8)$$

Легко видеть, что эта функция удовлетворяет необходимым условиям. Кроме того, эта функция хорошо отражает экономический эффект от импульсных инвестиций.

Приведем полученные результаты. Оптимальный план импульсных инвестиций приведен на рис. 1. График результативности приведен на рис. 2. Можно видеть, что предложенный план импульсных инвестиций быстро приводит результативность до нужных значений, после чего поддерживает нужный режим результативности.

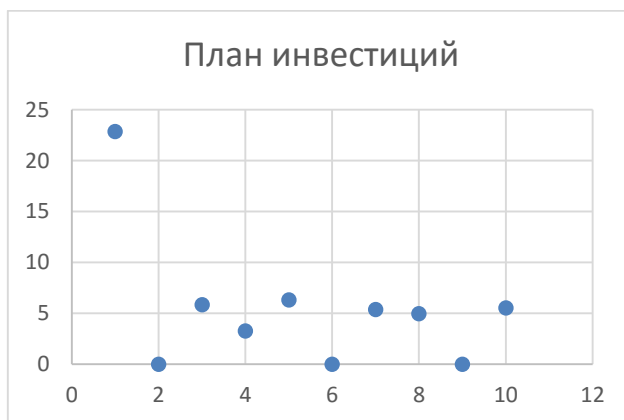


Рис. 1. Оптимальный план импульсных инвестиций

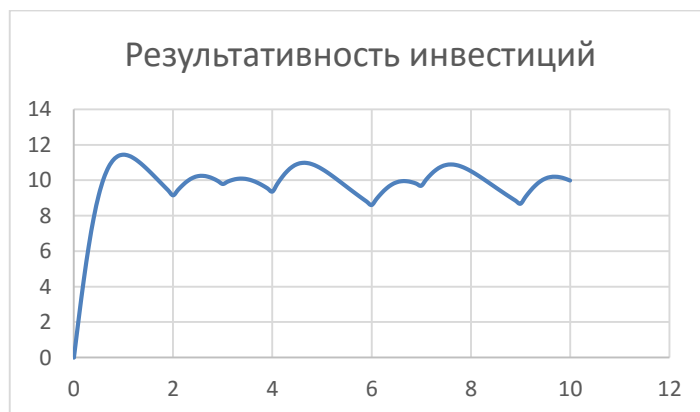


Рис. 2. Результативность оптимальных инвестиций

### Заключение

В работе предложена оригинальная экономико-математическая модель импульсных инвестиций наукоемких предприятий. С помощью этой модели сформулирована экстремальная оптимизационная задача для описания оптимальной схемы импульсных инвестиций с целью поддержания заданного уровня результативности предприятия.

Показано, что полученная экстремальная задача является некорректной по Тихонову, поэтому для построения вычислительных процедур необходимо использовать регуляризацию некорректных экстремальных задач по Тихонову.

Приведен модельный пример расчета оптимальной схемы импульсного финансирования, который демонстрирует рассмотренную экономико-математическую модель.



## Библиографический список

1. **Чурсин, А.А.** Инвестиции и инновации и их роль в повышении конкурентоспособности организаций / А.А. Чурсин, Р.В. Шамин // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2011. – Вып. 2. – С. 83-87.
2. **Чурсин, А.А.** Методика количественной оценки конкурентоспособности наукоемкой промышленности / А.А. Чурсин, Р.В. Шамин, Т.В. Кокуйцева // Экономика и управление в машиностроении. – 2012. – № 3. – С. 41-47.
3. **Васильев, Ф.П.** Методы решения экстремальных задач / Ф.П. Васильев. – М.: Наука, 1981. – 552 с.
4. **Тихонов, А.Н.** Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 285 с.
5. **Gurevich, P.L.** Reaction-diffusion equations with spatially distributed hysteresis / P.L. Gurevich, R.V. Shamin, S.B. Tikhomirov // SIAM J. Math. Anal. – 2013. – V. 45. – №. 3. – P. 1328-1355.

*Дата поступления  
в редакцию: 17.04.2019*

**R.V. Shamin<sup>1,2</sup>, R.A. Chursin<sup>2</sup>, A.G. Shmeleva<sup>1,2</sup> E.A. Galemina<sup>1</sup>,  
S.Yu. Obydenova<sup>3</sup>, E.V. Frolagina<sup>3</sup>**

**THE OPTIMIZATION OF KNOWLEDGE-INTENSIVE ENTERPRISES  
IMPULSE INVESTMENTS**

MIREA – Russian technological university<sup>1</sup>  
Russian University of peoples' friendship<sup>2</sup>  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev<sup>3</sup>

**Purpose:** Simulation model aimed to describe knowledge-intensive enterprises impulse investments is considered.

**Design/methodology/approach:** The problem is formulated within an original simulation model while numerical results are obtained with particle swarming method.

**Findings:** The proposed concept allows to estimate impulse investments.

**Research limitations/implications:** The obtained extremum problem is incorrect according to Tikhonov, therefore, to construct computational procedures, according to Tikhonov, it is necessary to use regularization for ill-posed extremal problems.

**Originality/value:** New quantitative calculations considering investment plan target indicators achieving optimization problem is proposed. There are presented numerical modeling results for the proposed economic-mathematical model.

*Key words:* simulation model, investments, knowledge-intensive enterprises, optimization problem, regularization of ill-posed extremal problems.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 532.542

Ю.И. Аношкин, А.А. Добров, М.М. Кузьма, И.В. Минеев,  
М.М. Мулин, М.А. Субарев

### РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ФТ-18 ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ В МОДЕЛЯХ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье представлены разработка и обоснование экспериментального стенда, предназначенного для исследования процессов смешения потоков рабочих сред в моделях проточных частей с различной геометрией. Актуальность работы обусловлена возможностью проведения исследований гидродинамики смешивающихся потоков при режимах с большими числами Рейнольдса. Описанный в работе экспериментальный гидродинамический стенд ФТ-18 разработан на базе лабораторного комплекса НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Дано обоснование выбора циркуляционного оборудования, обеспечивающего требуемые режимные параметры – числа Рейнольдса в диапазоне  $20\ 000 \div 40\ 000$ . Представлено описание экспериментальной модели «Круглый канал». Выполнен расчет детурбулизирующего элемента, предназначенного для снижения паразитных пульсаций потока.

*Ключевые слова:* гидродинамика потоков, исследование смешения потоков, экспериментальный стенд, детурбулизирующие решетки.

В настоящее время существует ряд установок, в оборудовании которых необходимо создать такие условия, чтобы несколько потоков жидкостей или газов, отличающихся температурами, химическим составом или концентрациями переносимых примесей, имели наименьшую степень смешения на проектируемом участке. Анализ отечественной и зарубежной литературы по данной тематике показал, что исследования проводились для больших диапазонов чисел Рейнольдса  $10\ 000 \div 20\ 000$  [1-4]. Другие области остаются слабоизученными, что актуализирует исследования процессов смешения потоков рабочих сред для диапазонов чисел Рейнольдса порядка  $20\ 000 \div 40\ 000$ .

На базе лабораторного комплекса НГТУ им. Р.Е. Алексеева был разработан экспериментальный гидродинамический стенд ФТ-18, предназначенный для моделирования и визуализации гидродинамических процессов потоков рабочих сред в моделях проточных частей с различной геометрией исследовательского участка.

На процесс смешения потоков большое влияние оказывает масштаб турбулентности на входе в измерительный канал. Она складывается из турбулентности, определяемой характером потока, и из паразитной турбулентности. Применительно к стенду ФТ-18 паразитная турбулентность обусловлена дискретностью подачи насоса, вибрацией насоса, наличием вдоль трассы циркуляции местных сопротивлений (поворотов, задвижек и конфузоров, выходов в большой объем, столкновение потока с центральной трубой), геометрией трассы. Эта составляющая турбулентности способствует интенсификация перемешивания потоков сред в общем объеме, в частности, приводит к уменьшению длины смешения. Для решения данной проблемы существуют специальные устройства (направляющие лопатки, хоннейкомб (струевыпрямитель), детурбулизирующие решетки, плавные входы в канал). Установка каждого из этих устройств сопряжена с определенными трудностями, и каждое из этих технических решений имеет различную эффективность. Из [5-12] следует, что существенное влияние с точки

зрения детурбулизации потока оказывает детурбулизирующая решетка, устанавливаемая перед входом в исследовательский канал в успокоительном баке-ресивере.

### Разработка и обоснование экспериментального стенда

Экспериментальный гидродинамический стенд ФТ-18 проектировался как двухконтурная установка с принудительной циркуляцией рабочей среды по обоим контурам с возможностью циркуляции как по открытой, так и по закрытой схеме. На начальном этапе была проработана принципиальная схема (рис. 1) двухконтурной установки с принудительной циркуляцией рабочей среды по открытой схеме.

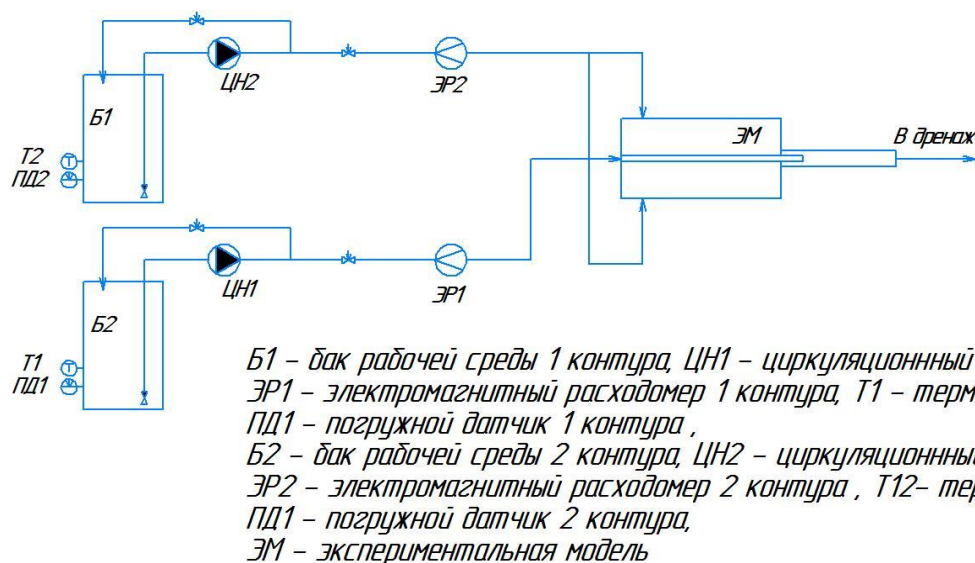
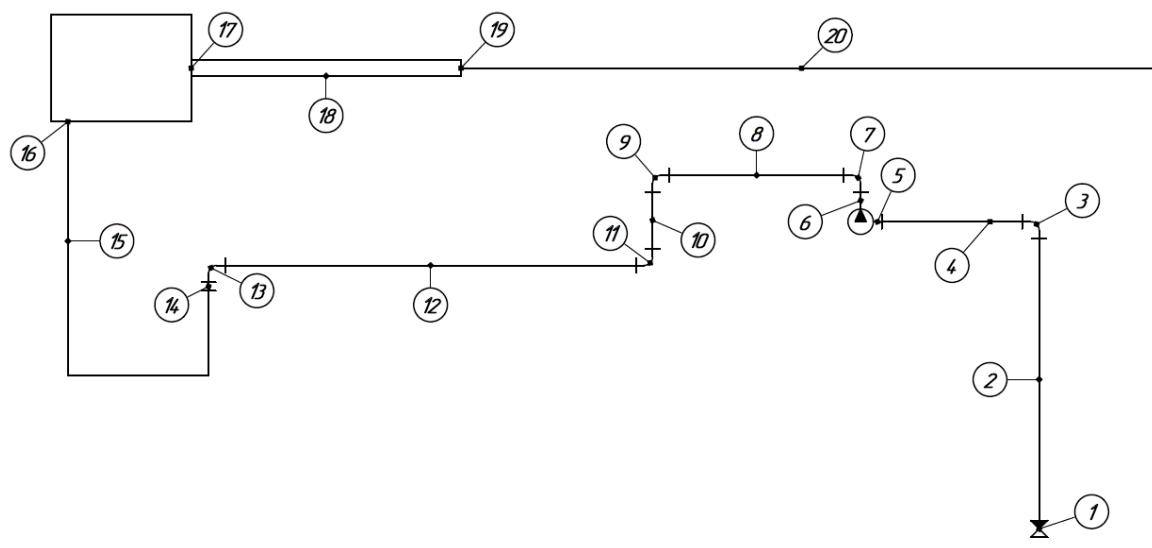


Рис. 1. Принципиальная схема стенда

В состав стенда входит следующее оборудование:

- емкости запаса воды объемом 100 л, предназначенные для запаса воды в каждом контуре и позволяющие обеспечить достаточную продолжительность эксперимента при добавлении трассера – красителя (контроль уровня жидкости в емкостях осуществляется с помощью погружных датчиков уровня; контроль температуры в емкостях осуществляется термоэлектрическими преобразователями градуировки «хромель-алюмель»);
- центробежные насосы DAB KI 30/120M – обеспечивающие циркуляцию сред по контурам;
- электромагнитные расходомеры жидкости Yokogawa ADMAG AXF – необходимые для измерения объема и расхода электропроводящей жидкости в контурах стенда;
- экспериментальные модели каналов, имитирующих проточные части элементов технических установок, в которых исследуются и визуализируются процессы гидродинамики потока движущейся среды;
- система автоматизированного управления с подключаемым к ней персональным компьютером;
- трубопроводы и арматура.

При проектировании стенда был выполнен гидравлический расчет основного контура циркуляции рабочей среды для предполагаемой трассы с целью определения потерь давления на преодоление гидравлического сопротивления трассы в зависимости от расхода рабочей среды. Гидравлический расчет проводился в соответствии с расчетной схемой (рис. 2) основного контура циркуляции.



**Рис. 2. Расчетная схема основного контура циркуляции**

Схема разбивалась на характерные участки, для каждого из которых, в соответствии с расчетными соотношениями справочника [13], определялись следующие параметры.

1. Величины коэффициентов гидравлического сопротивления на трение (1):

$$\Delta P = \lambda(Re) \cdot \frac{L_i}{d_i} \cdot \frac{\rho \cdot w_i^2}{2}, \quad (1)$$

где  $L_i$  – длина трубопровода участка сопротивления;  $d_i$  – диаметр трубопровода участка сопротивления;  $w_i = \frac{4Q}{\pi \cdot d_i^2}$  – средняя скорость среды в трубопроводе;  $\lambda(Re)$  – коэффициент гидравлического трения определяется по [13];  $Re_i = \frac{d_i \cdot w_i}{\nu_i}$  – критерий Рейнольдса.

2. Величины коэффициентов местных гидравлических сопротивлений (2)

$$\Delta P_i = \xi_i \frac{\rho \cdot w_i^2}{2}, \quad (2)$$

где  $\xi_i$  – коэффициент местного гидравлического сопротивления, значения которого подбирались по [13] в зависимости от конструктивной особенности местного сопротивления.

3. Общее значение перепада давления определялось как сумма перепадов по всем рассмотренным участкам (3):

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{20} \Delta P_i \quad (3)$$

Полученное расчетное значение суммарного перепада давления с учетом инженерного запаса, обусловленного погрешностями расчетных формул и упрощенной расчетной схемой, увеличивалось на 20 %. В результате гидравлического расчета была получена гидравлическая характеристика трассы экспериментального стенда  $\Delta P_{\Sigma}(Q)$ .

По полученной гидравлической характеристике контура по каталогам подбирался насос. Для обеспечения режимных параметров рабочей среды, в частности, высоких чисел Рейнольдса, был выбран центробежный одноступенчатый насос DAB KI 30/120M. По наложению гидравлических характеристик выбранного насоса и циркуляционного контура, была получена рабочая точка (рис. 3). Расход в рабочей точке составил  $0,00215 \text{ м}^3/\text{с}$  (129 л/мин), напор 22 м (216 кПа). По полученному результату можно сказать, что насос по основному контуру циркуляции при заданной геометрии трассы сможет обеспечить необходимые режимные параметры – число  $Re = 48883 > 40000$ .

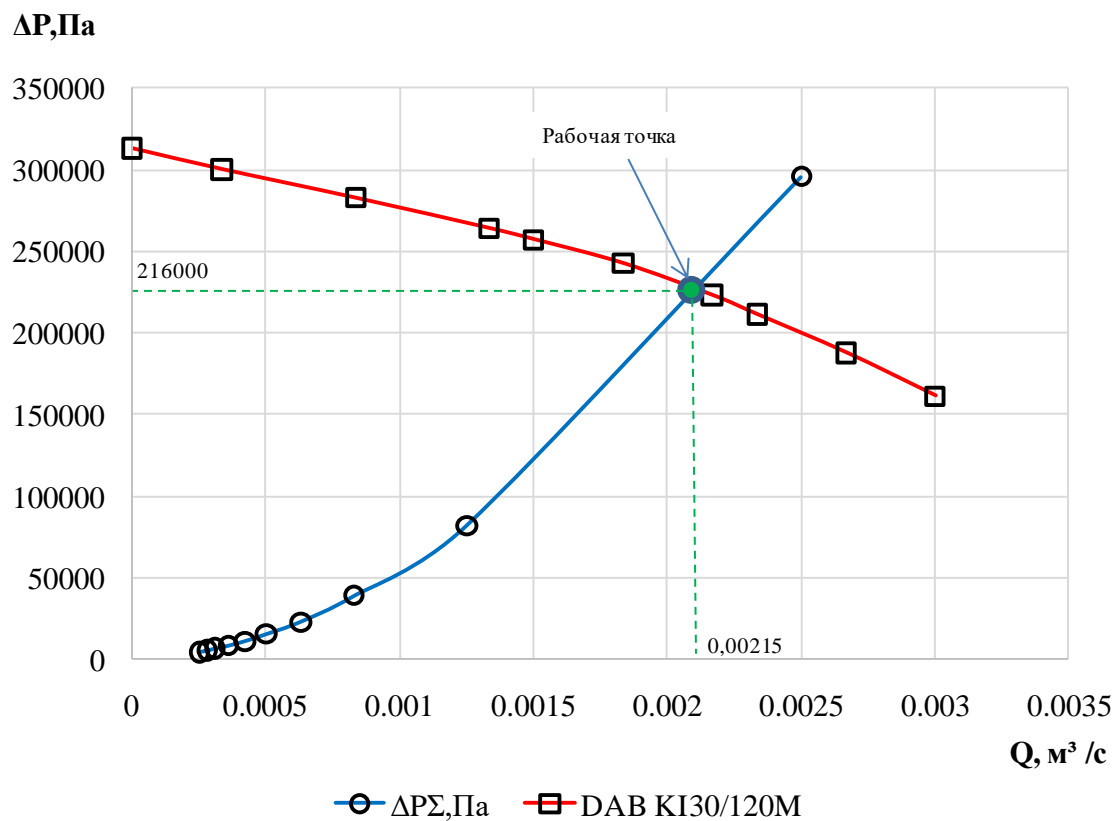


Рис. 3. Определение рабочей точки

### Описание экспериментальной модели «Круглый канал»

Экспериментальная модель с каналом круглого сечения (рис. 4) предназначена для проведения пуско-наладочных работ на стенде ФТ-18 и отработки методики проведения экспериментальных исследований по исследованию процесса смешения потоков рабочих сред.

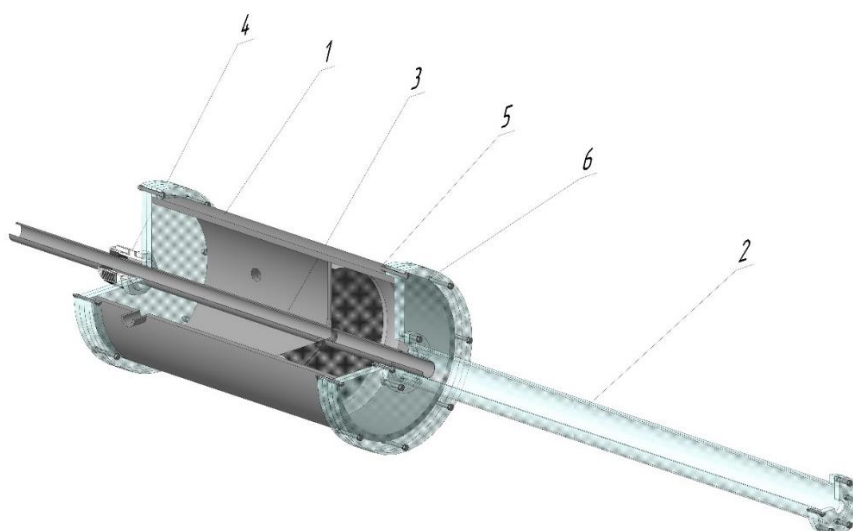


Рис. 4. Общий вид экспериментальной модели «Круглый канал»

Модель состоит из следующих основных элементов:

- успокоительный бак-ресивер (1);
- наружная прозрачная труба круглого сечения  $\text{Ø}60 \times 2$  мм (2);
- внутренняя труба круглого сечения  $\text{Ø}28 \times 1,5$  мм для подвода подкрашенного потока рабочей среды (3);
- детурбулизирующая решетка (6).

Бак-ресивер выполнен из полиэтиленовой трубы  $\text{Ø}250 \times 10$  мм. Наружная прозрачная труба  $\text{Ø}60 \times 2$  мм изготовлена из оргстекла и соединена с баком-ресивером посредством фланцевого соединения. Внутри бака-ресивера расположена внутренняя труба  $\text{Ø}28 \times 1,5$ , которая вводится в бак с помощью гермоввода (4). Внутри бака труба поддерживается центрирующим кольцом (5), что обеспечивает соосное расположение внутренней трубы, бака ресивера и внешнего прозрачного канала. Часть трубки  $\text{Ø}28 \times 1,5$  обточена до внешнего диаметра 26 мм для уменьшения толщины стенки и снижения ее влияния на процесс смешивания потоков рабочих сред. Эта часть выходит из бака-ресивера и входит внутрь прозрачной внешней трубы, образуя тем самым с ней кольцевой канал. Длину части трубы в кольцевом канале можно менять путем ослабления обжатия гермоввода и перемещения на требуемое расстояние.

### Расчет детурбулизирующей решетки для установки на вход рабочего участка измерительного канала стенда ФТ-18

Степень турбулентности потока в измерительном канале можно регулировать с помощью проволочных сеток, установленных в успокоительном баке-ресивере перед каналом (рис. 4). В экспериментальном стенде ФТ-18 сетки планируется использовать для гашения имеющейся в потоке турбулентности. В связи с этим возникает проблема выбора оптимальной геометрии сетки, способной наиболее эффективно гасить турбулентные пульсации при минимальном сопротивлении. В существующих теоретических и экспериментальных отечественных и зарубежных исследованиях нет единой точки зрения по этому вопросу [5-12]. Рассматривалось 16 двухплоскостных и 18 плетеных сеток [5] (рис. 5).

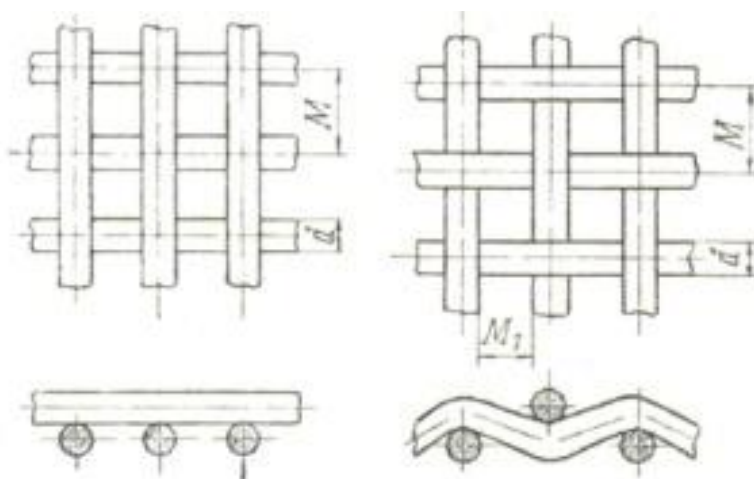


Рис. 5. Двухплоскостная и плетеная сетки

Характерное число Рейнольдса для каждой сетки зависит как от скорости набегающего потока, так и от номера сетки (4) [5, с.15]:

$$Re_{dm} = \omega d / (1 - S) \nu \quad (4)$$

где  $\omega$ , м/с – скорость набегающего потока;  $d$ , мм – диаметр прутка;  $S$  – коэффициент заполнения сетки;  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с – кинематическая вязкость среды.

При использовании проволочной сетки для снижения турбулентности набегающего потока степень турбулентности  $\varepsilon_1$  за сеткой зависит, как от уровня турбулентности  $\varepsilon_0$  (относительная интенсивность поперечной составляющей пульсаций скорости [15, с. 87]) в набегающем потоке, так и от уровня собственной турбулентности  $\varepsilon_c$ , порождаемой сеткой (образованием вихрей при прохождении потока через сетку). При этом качество сетки характеризуется величиной коэффициента уменьшения турбулентности  $F = \varepsilon_1/\varepsilon_0$ , который определяется как отношение степени турбулентности  $\varepsilon_1 = \varepsilon_1(x)$  за сеткой на расстоянии  $x$  от сетки к величине  $\varepsilon_0 = \varepsilon_0(x)$ , измеренной в той же точке при отсутствии сетки [5, с. 17].

Анализ опытных данных показывает, что результаты измерений удобно представлять в виде отношения  $\varepsilon_1/\varepsilon_0$  в функции от  $\varepsilon_c/\varepsilon_0$ . Один из важных выводов, следующих из проведенных расчетов, состоит в том, что существует некоторое оптимальное значение  $(\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}$ , при котором наблюдается минимум  $(\varepsilon_1/\varepsilon_0)_{min}$ , т.е. сетка наиболее эффективно подавляет турбулентность набегающего потока.

Отношение  $\varepsilon_1/\varepsilon_0$  выражается эмпирической зависимостью (5) [5, с. 18]:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} = \sqrt{\frac{1+3\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2}{2(1+K)}} \quad \text{при} \quad \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} > \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)_{opt}. \quad (5)$$

Для разных гасящих сеток величина  $(\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}$  принимает различные значения, зависящие как от  $K$ , так и от числа  $Re_{dm}$ , и может быть определена из следующего эмпирического соотношения (6) [5, с. 18]:

$$\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)_{opt} = 1 - 0.7 \cdot \left(\frac{Re_{dm}}{100\sqrt{1+K}}\right)^{-0.6} \quad \text{при} \quad \frac{Re_{dm}}{\sqrt{1+K}} \geq 75. \quad (6)$$

В случае  $\varepsilon_c/\varepsilon_0 < (\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}$  зависимость  $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = f(\varepsilon_c/\varepsilon_0)$  может быть определена по формуле (7) [5, с. 19]:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} = 1 - \frac{1 - (\varepsilon_1/\varepsilon_0)_{min}}{(\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}} \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \quad \text{при} \quad \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} < \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)_{opt}, \quad (7)$$

где значение  $(\varepsilon_1/\varepsilon_0)_{min}$  определяется из соотношения (5) при  $\varepsilon_c/\varepsilon_0 = (\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}$ , рассчитанном по формуле (6).

Совместное решение (5) и (7) с учетом (6) представлялось в виде зависимости  $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = f(\varepsilon_c/\varepsilon_0)$  для каждого значения расхода и каждого типа сеток, которые входил в функцию  $f(\varepsilon_c/\varepsilon_0)$  как параметры:  $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = f(\text{тип сетки, расход, } \varepsilon_c/\varepsilon_0)$ . Расчет выполнен для двухплоскостных сеток С1-С16 (рис. 6) и для плетеных сеток С17-С34 (рис. 7).

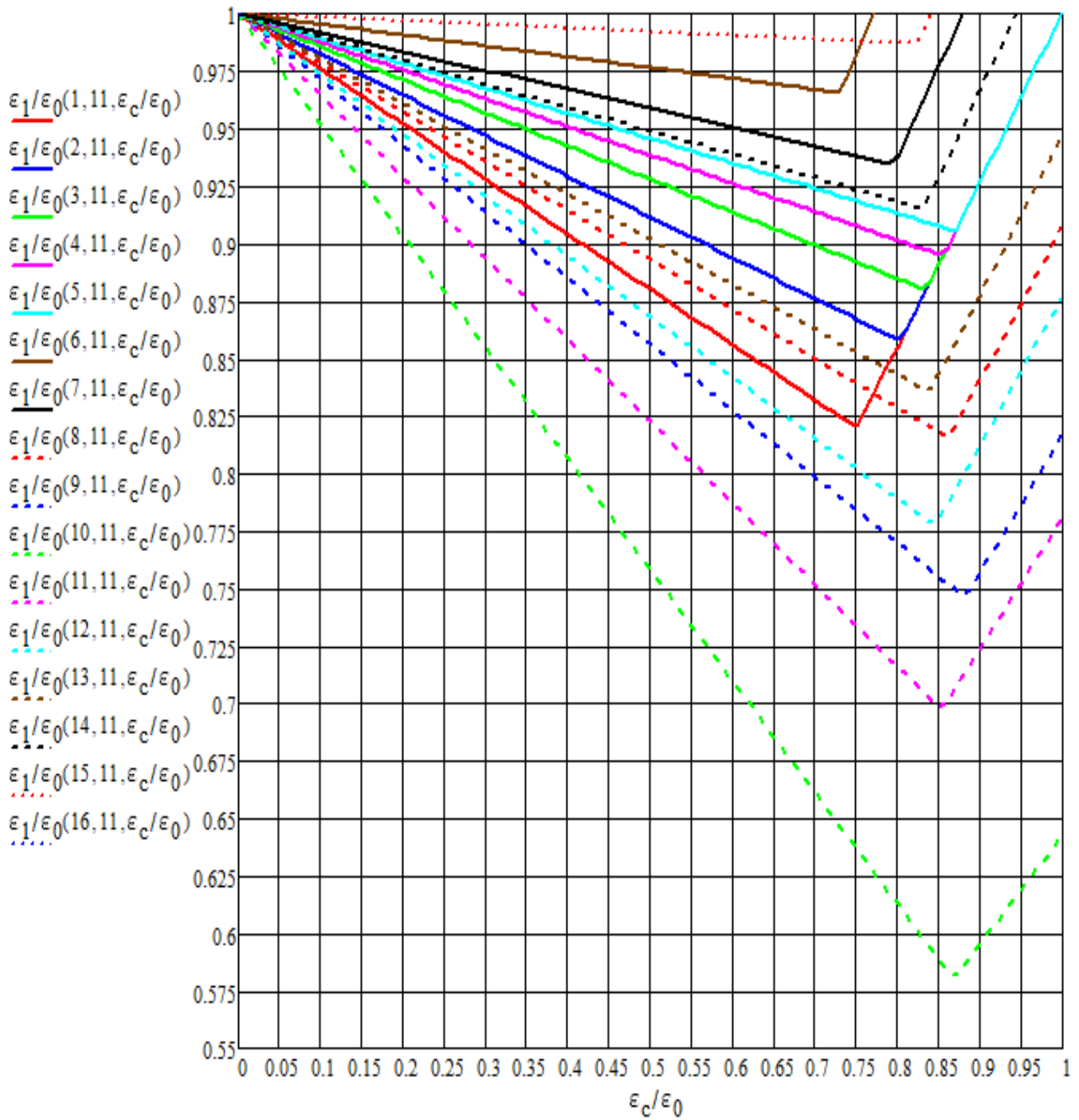
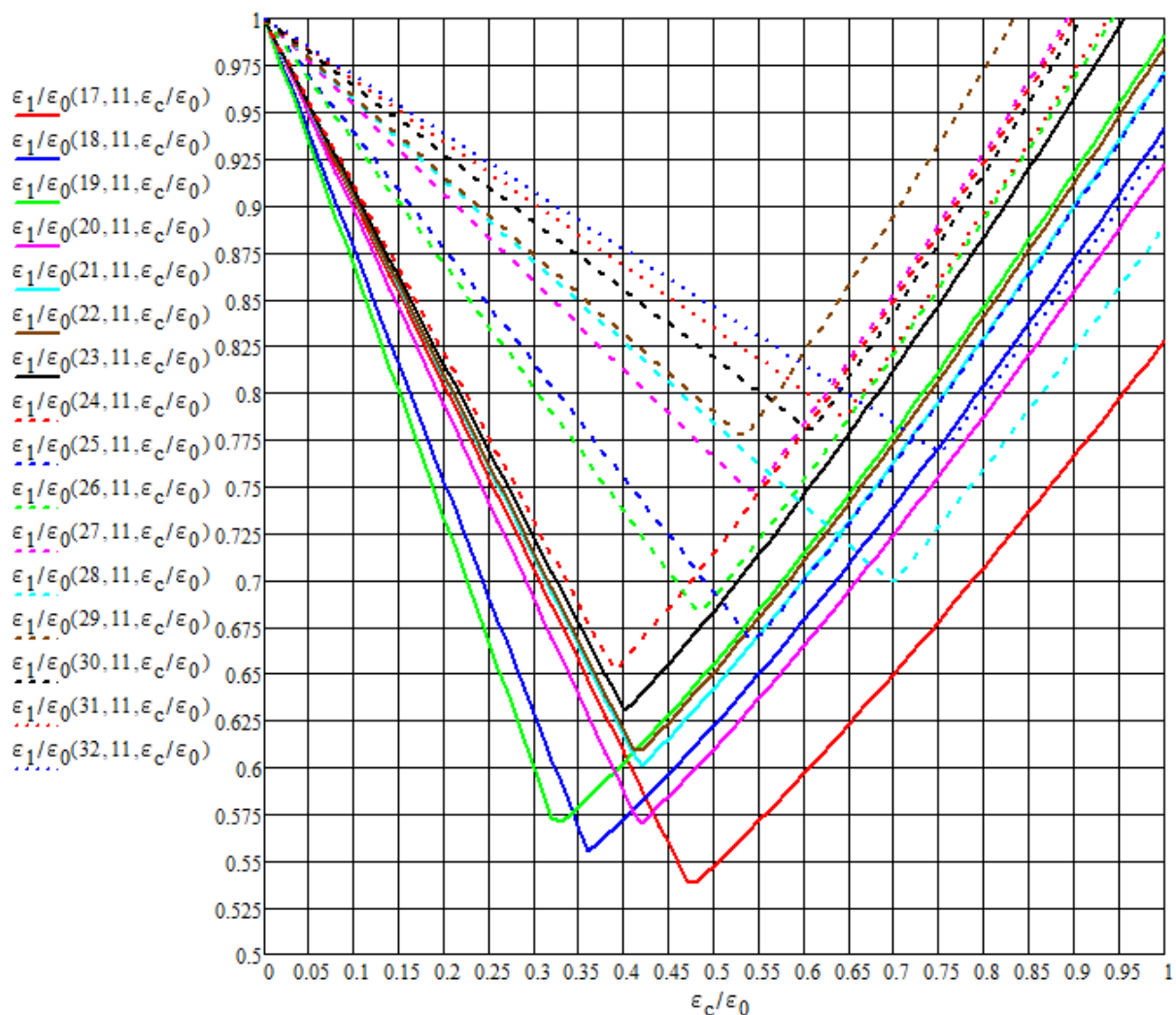


Рис. 6. Зависимость  $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = f(\varepsilon_c/\varepsilon_0)$  для двухплоскостных сеток C1 – C16 при номинальном расходе 50 л/мин





**Рис. 7. Зависимость  $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = f(\varepsilon_c/\varepsilon_0)$  для плетеных сеток C17 – C34 при номинальном расходе 50 л/мин**

Из приведенных графиков видно, что наиболее оптимальное значение коэффициента уменьшения турбулентности  $\varepsilon_1/\varepsilon_0$  набегающего потока имеет двухплоскостная сетка с порядковым номером C10 ( $M = 4$  мм,  $d = 2$  мм) и плетеная сетка с номером C17 ( $M = 0,68$  мм,  $d = 0,25$  мм).

Полученные графики подтверждают вывод теоретических выкладок о наличии некоторого оптимального отношения  $(\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}$ , при котором наблюдается минимум  $(\varepsilon_1/\varepsilon_0)_{min}$ , т.е. сетка наиболее эффективно подавляет турбулентность набегающего потока в измерительный канал.

Приведем графические зависимости коэффициента уменьшения турбулентности  $(\varepsilon_1/\varepsilon_0)_{min}$  при  $(\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}$  как функция расхода (рис. 8).

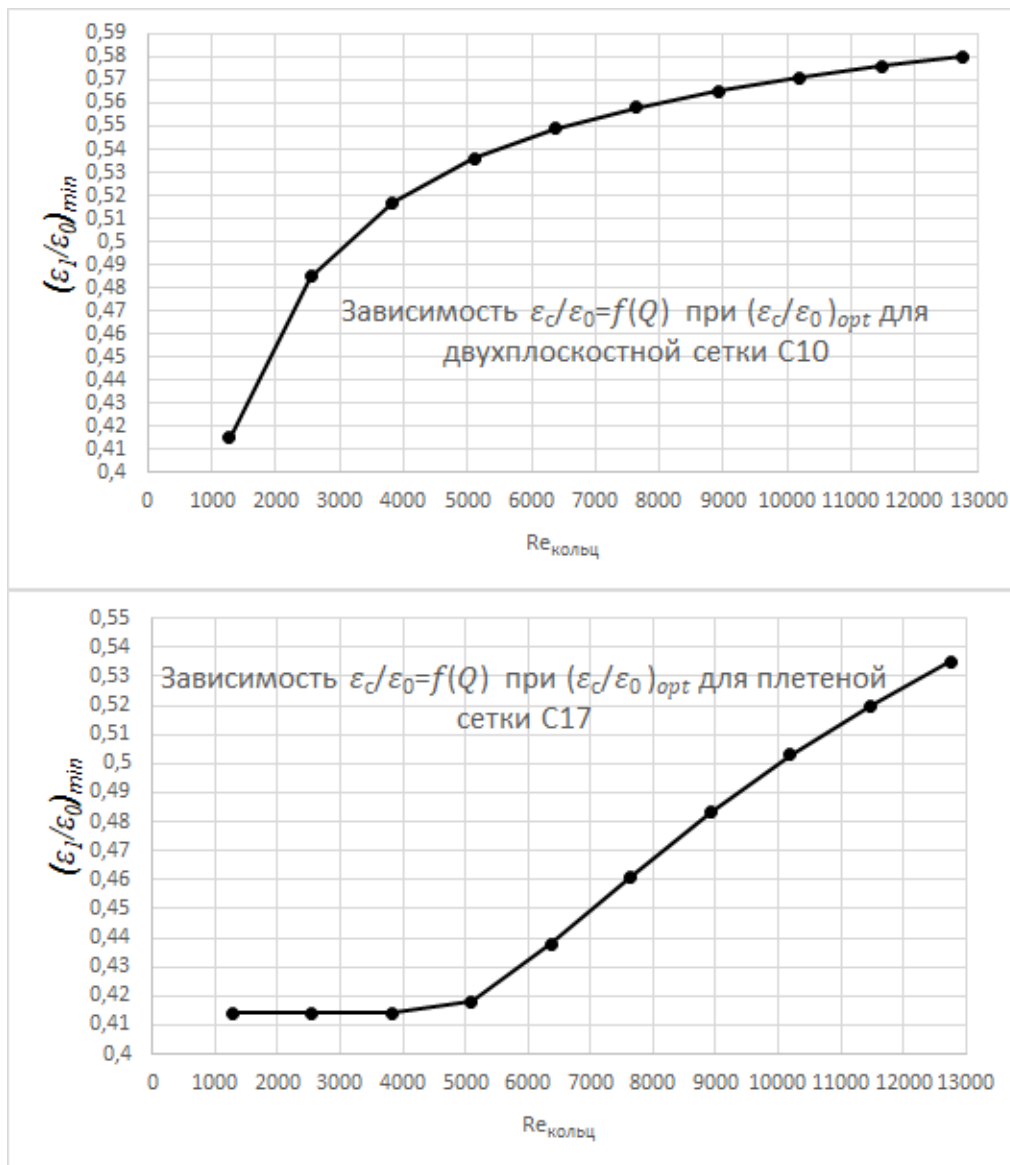


Рис. 8. Зависимость  $(\varepsilon_1/\varepsilon_0)_{min}$  при  $(\varepsilon_c/\varepsilon_0)_{opt}$  от расхода

### Заключение

В статье отражены основные этапы разработки экспериментального стенда ФТ-18. Представлено обоснование выбора циркуляционного оборудования, обеспечивающего требуемые режимные параметры – числа Рейнольдса в диапазоне 20000 ÷ 40000. Приведено конструктивное исполнение экспериментальной модели «Круглый канал». Выполнен комплексный анализ детурбулизирующих решеток, на основе которого получены размеры детурбулизирующей сетки, предназначенной для установки в успокоительном баке-ресивере. Наилучшим из рассмотренных вариантов является плетеная сетка С17 (размер ячейки  $M = 0,68$  мм, диаметр прутка  $d = 0,25$  мм), имеющая оптимальное значение коэффициента уменьшения турбулентности  $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = 0,58$  набегающего потока.

## Библиографический список

1. **Фрост, У.** Турбулентность. Принципы и применения / У. Фрост, Т. Моулден. – М.: Мир, 1980. – 535 с.
2. **Шлихтинг, Г.** Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг., М.: Наука, 1974. – 712 с.
3. **Хинце, И.О.** Турбулентность. Ее механизм и теория. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 680 с.
4. Методы расчета турбулентных течений / под. ред. В. Кольмана. – М.: Мир. 1984. – 464с.
5. **Дербунович, Г.И.** Использование сеток для управления структурой турбулентного потока в аэродинамических трубах / Г.И. Дербунович, А.С. Земская, Е.У. Репик, Ю.П. Соседко // Ученые записки ЦАГИ. – 1982. – Т. 8, – №1. – С.17.
6. **Дербунович, Г.И.** К вопросу о гидравлическом сопротивлении сеток / Г.И. Дербунович, А.С. Земская, Е.У. Репик, Ю.П. Соседко // Ученые записки ЦАГИ. – 1980. – Т. 11. – №2. – С.135.
7. **Михайлов, Н.П.** Сочетание хонейкомба с сеткой для подавления турбулентности потока / Н.П. Михайлов, Е.У. Репик, Ю.П. Соседко // Ученые записки ЦАГИ. – 1998. – Т. 19. – №1-2. – С. 86.
8. **Козелков, А.С.** Моделирование турбулентных сечений на сетках гибридной структуры с использованием схем высокого порядка точности / А.С. Козелков, Р.Н. Жучков, А.А. Уткина, К.Б. Володченкова // ВАНТ. Серия Математическое моделирование физических процессов. 2014. – С.18.
9. **Дербунович, Г.И.** Оптимальные условия гашения турбулентности потока в рабочей части аэродинамической трубы с помощью сеток, установленных в форкамере / Г.И. Дербунович, А.С. Земская, Е.У. Репик, Ю.П. Соседко // Ученые записки ЦАГИ. – 1989. – Т. 20, – №3. – 1989. – С. 37.
10. **Дербунович, Г.И.** Оптимальные условия детурбулизации потока с помощью набора сеток / Г.И. Дербунович, А.С. Земская, Е.У. Репик, Ю.П. Соседко // Известия АН СССР, МЖГ. – 1993. №1. – С. 15-20.
11. **Dryden, H.L.** The use of damping screens for the reduction of wind-tunnel turbulence / H.L. Dryden, G.V. Schubauer // J. Aeron. Sci. – 1947. – Vol. 14. – № 4.
12. **Groth, J.** Turbulence reduction by screens / J. Groth, A.V. Johansson //J. Fluid Mech. – 1988. – V. 197.
13. **Идельчик, И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение. – 1975. – 672 с.
14. **Михайлова, Н.П.** Сочетание хонейкомба с сеткой для подавления турбулентности потока / Н.П. Михайлова, Е.У. Репик, Ю.П. Соседко // Ученые записки ЦАГИ. – 1998. – Т. 29. – № 1-2. – С. 86-94.

*Дата поступления  
в редакцию: 01.04.2019*

**Y.I. Anoshkin, A.A. Dobrov, M.M. Kuzma, I.V. Mineev, M.M. Mulin, M.A. Subarev**

**DEVELOPMENT AND VALIDATION OF EXPERIMENTAL STAND FT-18  
TO STUDY PROCESSES OF MIXING IN MODELS OF DIFFERENT GEOMETRY**

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

**Purpose:** The article is devoted to the development and validation of an experimental stand designed to study the processes of mixing the in models of different geometry. The relevance of the work is due to the possibility to study the hydrodynamics of mixing flows under conditions with large Reynolds numbers.

**Approach:** Development of the concept of the stand. Hydraulic validation of the main circulation loop in order to obtain a working point to justify the selection of circulation equipment that provides operating parameters of the flow. The design of the experimental model of the «Round channel». Calculation of deturbulating elements to reduce parasitic turbulence in the mixing zone.

**Results:** An experimental test bench has been developed and substantiated for the study of the hydrodynamic processes of working medium flows in models of flow parts of technical installation elements, in particular, for studying the processes of mixing working medium flows. An experimental model «Round channel» has been developed. The calculation of the deturbulating element designed to reduce parasitic pulsations of the flow has been performed.

*Key words:* hydrodynamics flows, the study of mixing flows, experimental stand, deturbulating grid.

УДК 620.178.3

В.Е. Десятников, Н.А. Миронов, С.Н. Пичков, А.Ю. Сидоров

**МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ  
УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ  
В УСЛОВИЯХ МНОГОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

В работе представлено исследование сопротивления усталостному разрушению стали 08X18H10T, широко используемой при создании оборудования и элементов судовых ядерных энергетических установок (ЯЭУ): трубопроводных систем, ГЦН, парогенераторов, арматуры и др. Проведен численный анализ с использованием метода конечных элементов для определения оптимальной формы образца и расчета первой собственной частоты. Получены значения числа циклов до разрушения образцов в зависимости от амплитуды деформаций при симметричном цикле нагружения с коэффициентом асимметрии  $R = -1$ , построена кривая многоциклового усталости, используемая при расчетах прочности и ресурса оборудования ЯЭУ. Приведена методика построения кривой многоциклового усталости.

*Ключевые слова:* атомное машиностроение; численное моделирование; собственные частоты; полные деформации; многоцикловая усталость (МнЦУ); образец из стали 08X18H10T; симметричный цикл нагружения.

В современном атомном машиностроении выдвигаются жесткие требования по металлоемкости конструкций, наряду с обоснованием их ресурса на 60 и более лет. Поскольку современные вычислительные мощности позволяют избежать высоких затрат на проведение экспериментальных исследований при обосновании прочности конструкций, данные требования ведут к более детальному изучению и численному моделированию механизмов деградации материалов конструктивных элементов оборудования и трубопроводных систем реакторных установок [1]. Вместе с тем, при решении задач прочности, используя высокопроизводительное численное моделирование процессов деформирования и расчета ресурса конструкций невозможно обходиться без фактических данных по свойствам конструкционным материалам. Определенную сложность в данный вопрос вносит то, что для конструкционных сталей и сплавов имеется существенный разброс по ресурсным характеристикам, вследствие технологических особенностей изготовления полуфабрикатов материалов (прутки, поковки и др.) Соответственно, необходимы современные методы определения ресурсных характеристик сталей и сплавов, которые будут отвечать таким требованиям как: достоверность получаемых характеристик, минимальные временные затраты, представительность исследований.

**Методика проведения исследований**

В данной работе рассматриваются результаты исследований по определению ресурсных характеристик конструкционных материалов при многоцикловом нагружении на примере конструкционной стали аустенитного класса 08X18H10T.

В исследованиях использованы образцы, изготовленные из трубы 60x5 стали 08X18H10T. Проведение исследований по построению кривой многоциклового усталости проводилось в два этапа:

- на первом этапе проводился численный анализ для определения оптимальной формы образцов и расчету первой собственной частоты. Критерием оптимальной формы выступало равномерное распределение полей напряжений и деформаций в наиболее нагруженной области образца;

- проведение экспериментальных исследований по построению кривой многоцикло-вой усталости.

Выбор формы образца осуществлялся с помощью метода конечных элементов [2], исходя из следующих требований:

- 1) размеры образца: длина  $\leq 70$  мм, ширина  $\leq 15$  мм, толщина  $\leq 4$  мм. Данные требования являются необходимыми для оптимального использования материала трубы;
- 2) определения вида и способа закрепления образца на актуаторе вибростенда для достижения наибольшей жесткости с минимальными массогабаритными характеристиками узла крепления;
- 3) максимальные полные продольные деформации при изгибе должны быть равномерно распределены по ширине и длине наиболее нагруженного участка образца в целях обеспечения нулевого градиента поверхностного распределения деформаций в месте установки тензодатчиков.

Были приняты следующие граничные условия при численном моделировании:

- верхняя и нижняя поверхности широкой части образца закреплены по всем направлениям;
- на консоли задано смещение в вертикальном направлении (ось  $Y$  рис. 2-4) равное 0,5 мм.

### Результаты

Результат выбора формы образца для испытаний на многоцикловую усталость после проведения численного моделирования приведен на рис. 1. Номинальная толщина образца принята равной 2 мм. Количество образцов для испытаний на МнЦУ, изготовленных из одной трубы составило 8 шт.

Результат распределения полных продольных деформаций по образцу приведен на рис. 2 (по длине образца, ось  $Z$ ). Из анализа результатов расчета следует, что центр зоны равномерно распределенных по ширине образца полных продольных деформаций находится на расстоянии 38 мм от широкой части образца, а длина этой зоны равна  $\approx 7,5$  мм. Таким образом, место наклейки тензорезистора (середина его рабочей базы) для проведения экспериментальных исследований расположено на расстоянии 38 мм от широкой части образца.

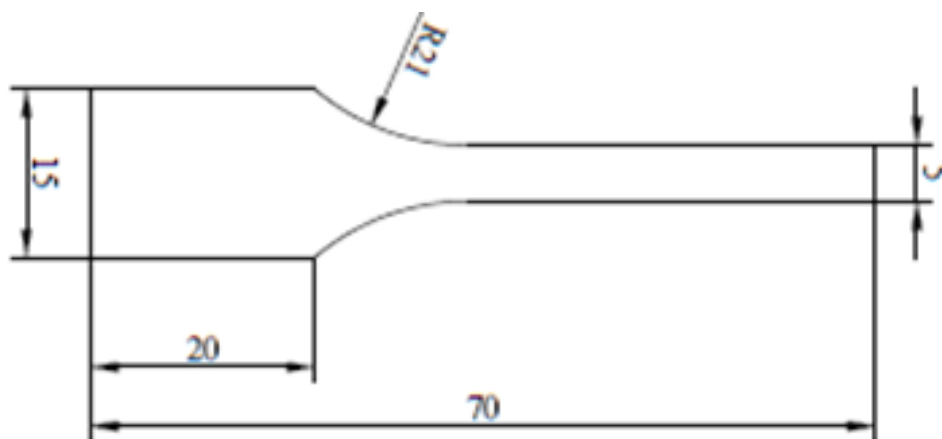


Рис. 1. Образец номинальной толщиной 2,0 мм для испытаний на МнЦУ

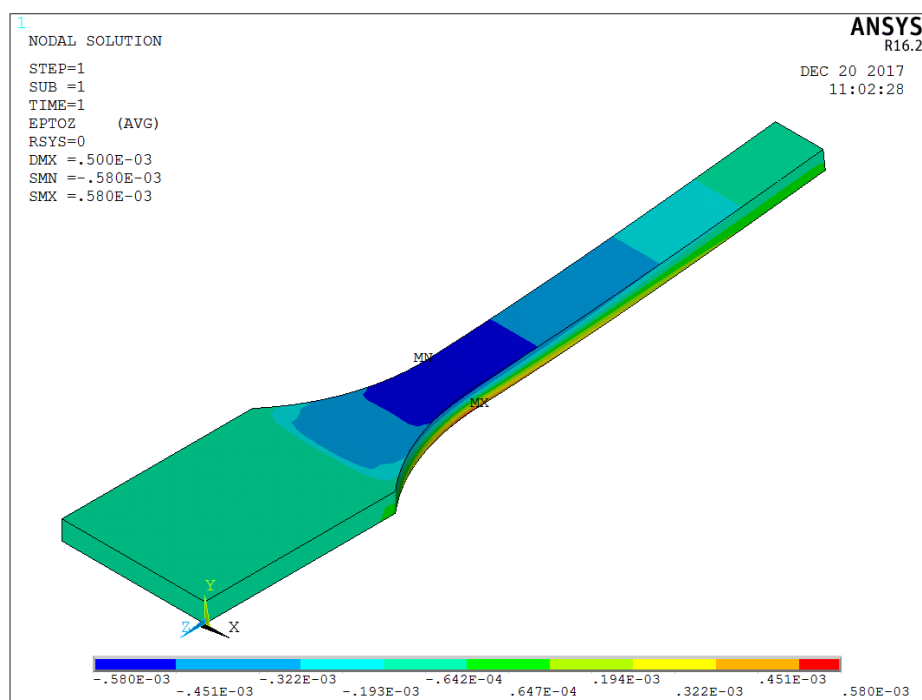


Рис. 2. Распределение полных продольных деформаций по образцу

Расчетное определение первой собственной частоты образца производилось методом конечно-элементного анализа (граничные условия: верхняя и нижняя поверхности широкой части образца закреплены по всем направлениям (рис 3)). В качестве конечного элемента был выбран SOLID 186. На консоли образца смоделирована присоединенная масса, имитирующая пьезоакселерометр (его установка необходима для фактического определения виброперемещений на консоли при проведении эксперимента). Диапазон расчетного определения первой собственной частоты составлял  $0 \div 500$  Гц. В указанном диапазоне первая собственная частота составила 111,9 Гц. Форма колебаний, соответствующая первой собственной частоте приведена на рис. 4.

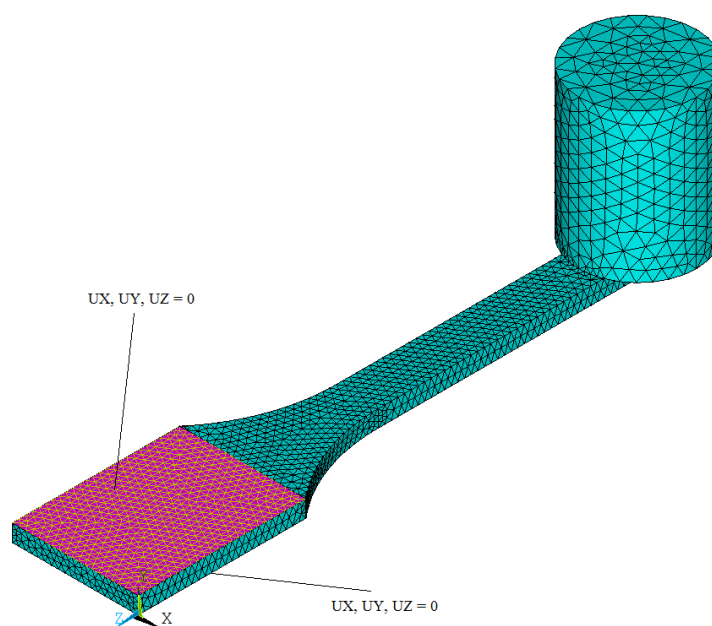
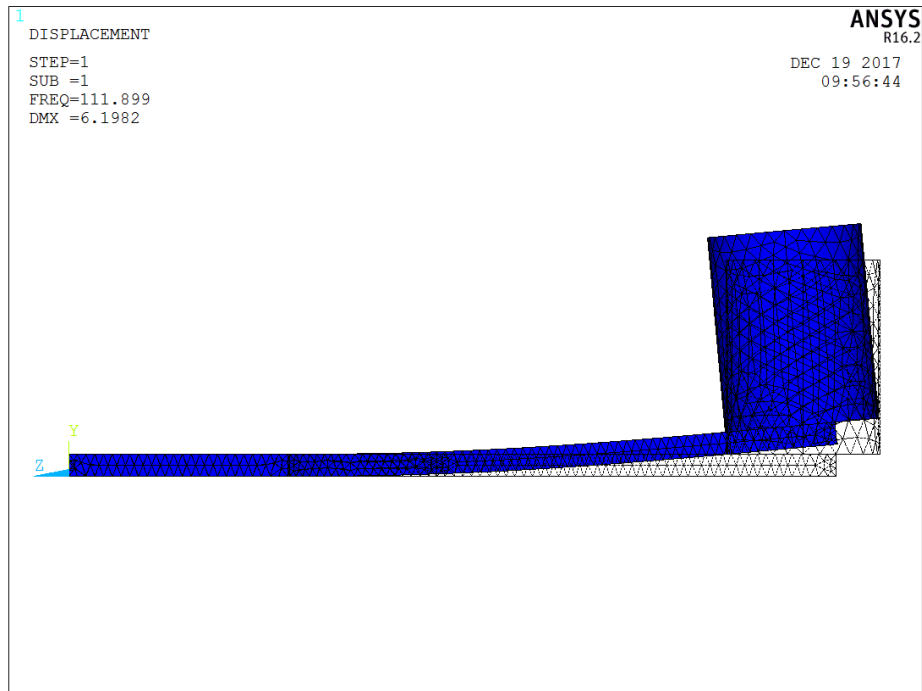
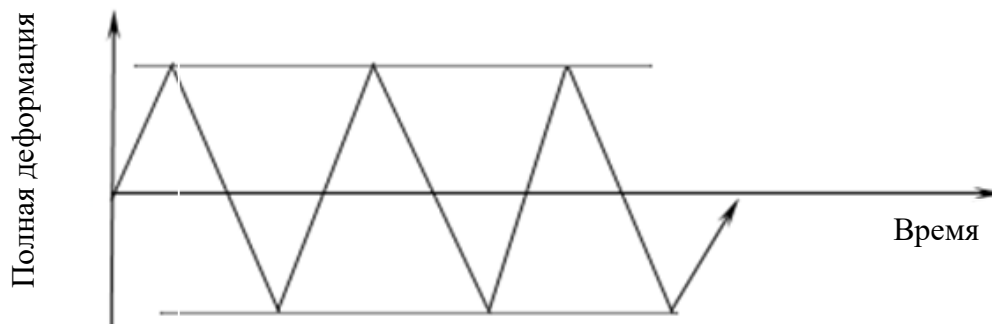


Рис. 3. Конечно-элементная модель образца для определения собственных частот



**Рис. 4. Форма колебаний, соответствующая первой собственной частоте 111,9 Гц**

Испытания на МнЦУ проводились на электродинамическом вибростенде при температуре 20 °С и симметричном циклическом нагружении с коэффициентом асимметрии  $R = -1$  (рис. 5).



**Рис. 5. Испытания на МнЦУ при симметричном цикле нагружения с коэффициентом асимметрии  $R = -1$**

Для построения кривой усталости в диапазоне циклов от  $10^4$  до  $10^7$  определялись необходимые значения полных деформаций. Перед проведением испытаний на рабочую часть (определенную ранее с помощью численного анализа) каждого образца наклеивался тензорезистор FLA-5-11, после чего образцы устанавливались на вибростенд и снимались показания полных деформаций.

Регистрация показаний тензорезисторов осуществлялась универсальным тензометрическим усилителем MGCplus. Контроль необходимой амплитуды колебаний осуществлялся при помощи измерительной системы, состоящей из пьезоакселерометра типа AP40 и измерительно-вычислительного комплекса MIC-200 с усилителем заряда типа ME-908. Параметры нагружения определялись путем выполнения динамической тарировки, заключающейся в определении зависимости величины полных деформаций, возникающих в рабочей части образца, от амплитуды его колебаний. Тарировочная зависимость определялась для каждого образца.



Необходимая амплитуда полных деформаций достигалась в образцах методом вынужденных колебаний на резонансной частоте. Предварительно для каждого образца проводилось определение собственных частот (СЧ) методом «вынужденных колебаний» и методом начальных отклонений. Для определения СЧ по методу «вынужденных колебаний» на электродинамическом вибростенде, с установленным на нем образцом с присоединенной массой на краю (пьезоакселерометр для измерения виброперемещений), задавался режим «плавающей частоты» в необходимом частотном диапазоне (СЧ ранее была определена численным моделированием) с амплитудой колебаний вибростенда  $10 \text{ м/с}^2$ . Резонансом считалось увеличение амплитуды колебаний на краю (консоли) изделия в два и более раз относительно амплитуды на вибростенде.

Критерием возникновения трещины в образце являлось падение амплитуды колебаний на консоли при неизменной амплитуде вынужденных колебаний. Испытания завершались при возникновении излома в месте образования трещины (рис. 6).

По результатам испытаний на многоцикловую усталость получены значения числа циклов до разрушения образцов в зависимости от амплитуды деформаций при симметричном циклическом нагружении с коэффициентом асимметрии  $R = -1$ . Всего было испытано 8 образцов. Полученные данные приведены в табл. 1. По полученным данным построена кривая многоциклового усталости для стали 08X18H10T, приведенная на рис. 7, где точками обозначены экспериментальные данные.



Рис. 6. Фото образца №1 после испытаний

Таблица 1

Результаты испытаний образцов на многоцикловую усталость

Номер образца	Амплитуда полной деформации, %	Число циклов до разрушения	Фактическая толщина образца, мм
1	0,3304	50000	1,95
2	0,3258	58000	1,95
3	0,3200	83625	1,95
4	0,2786	446426	1,95
5	0,3021	138900	1,97
6	0,2810	402600	2,00
7	0,2548	4153680	2,01
8	0,2490	9262371	1,98

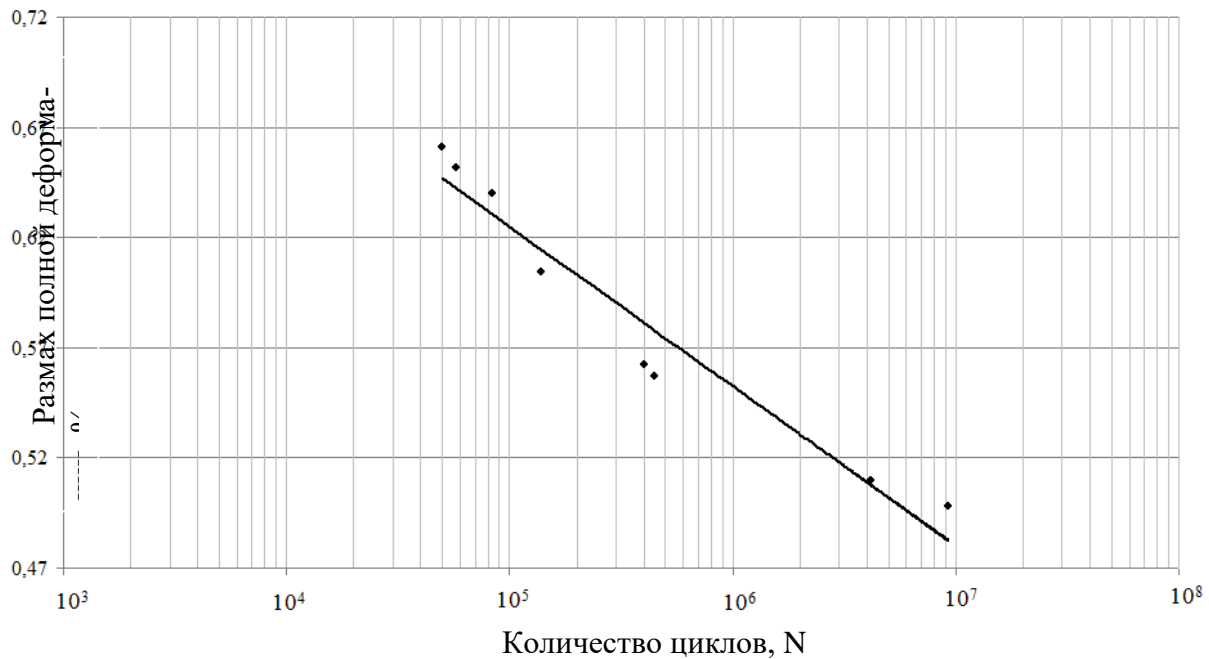


Рис. 7. Кривая многоциклового усталости при температуре 20 °С

### Заключение

1. Проведен численный анализ с использованием метода конечных элементов для определения оптимальной формы образца и расчета первой собственной частоты.
2. Численный анализ позволил:
  - определить способ закрепления образца на актюатор электродинамического вибростенда;
  - обеспечить равномерное распределение полных продольных деформаций при изгибе по ширине и длине наиболее нагруженного участка образца.
3. Получены значения числа циклов до разрушения образцов в зависимости от амплитуды деформаций при симметричном цикле нагружения с коэффициентом асимметрии  $R = -1$ .
4. Построена кривая многоциклового усталости, используемая при расчетах прочности и ресурса оборудования ЯЭУ.

### Библиографический список

1. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / Ф.М. Митенков, Ю.Г. Коротких, С.Н. Пичков и др. – М.: Машиностроение, 2007. – 448 с.
2. ANSYS Программа ANSYS. Регистрационный номер паспорта аттестации ПС № 327 от 18.04.13.

Дата поступления  
в редакцию: 10.04.2019

---

V.E. Desjatnikov, N.A. Mironov, S.N. Pichkov, A.J. Sidorov

**METHODICAL APPROACH TO DETERMINATION OF FATIGUE CHARACTERISTICS OF CONSTRUCTION STEELS IN CONDITIONS OF MULTICYCLE LOADING**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering

**Purpose:** the article is devoted to researches of resistance to fatigue fracture of austenitic stainless steel (08Kh18N10T). This steel is widely used in the construction of equipment and elements of shipboard nuclear power facilities: pipeline systems, primary pumps, steam generators, valves, etc.

**Results:** a numerical analysis was carried out to determine the optimal shape of steel sample and to calculate the first natural frequency (used finite element method). The values of the number of cycles to failure of the steel samples was obtained depending on the amplitude of deformations with a symmetric loading cycle with an asymmetry factor  $R = -1$ . A curve of multicycle fatigue was constructed. The article presents a method for constructing a curve of multicycle fatigue.

**Conclusion:** A curve of multicycle fatigue is used for strength calculations and resource valuation of nuclear equipment.

*Key words:* nuclear mechanical engineering; numerical simulation; natural frequencies; full deformations; multicycle fatigue; steel sample; 08Kh18N10T; symmetric load cycle.

УДК 621.3

А.А. Кралин, Е.В. Крюков, А.А. Асабин

**ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА ВЕЛИЧИНЫ И ФАЗЫ ВОЛЬТОДОБАВОЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена принципам работы тиристорного регулятора величины и фазы вольтодобавочного напряжения (ТРВДН) для распределительных сетей при продольном, поперечном и продольно-поперечном способах регулирования напряжения. Принципы работы ТРВДН пояснены с использованием векторных диаграмм. Представлены технические решения силовой части ТРВДН.

*Ключевые слова:* тиристорный регулятор, вольтодобавочный трансформатор, продольное, поперечное, продольно-поперечное регулирование, фазоповоротное устройство.

Управление потоками мощности в электрических сетях осуществляется в настоящее время с использованием устройств продольной, поперечной и продольно-поперечной компенсации к которым относятся фазоповоротные устройства, а также тиристорные регуляторы величины и фазы вольтодобавочного напряжения (ТРВДН). Напряжение на нагрузке в таких устройствах формируется из нескольких отрезков синусоид различной амплитуды [1-4]. Применение импульсно-фазового управления тиристорными ключами сопряжено с потреблением из питающей сети дополнительной реактивной мощности, а также наличием в кривых выходного напряжения и потребляемого тока высокочастотных гармонических составляющих. В связи с этим разработка ТРВДН с таким способом регулирования связана в основном с проблемами улучшения качества регулируемого напряжения, повышения коэффициента мощности и КПД.

Одним из направлений улучшения формы кривой регулируемого напряжения многоэлементных ТРВДН является применение вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ). Напряжение на первичной стороне ВДТ регулируется с помощью тиристорных ключей, а вторичная обмотка включается последовательно с сетью или вторичной обмоткой главного трансформатора. Это позволяет, во-первых, регулировать значительные мощности, во-вторых, достаточно просто согласовывать параметры регулируемой цепи с параметрами питающей сети.

Один из вариантов возможного решения силовой части тиристорного регулятора представлен на рис. 1. Схема содержит один вольтодобавочный трансформатор  $TV1$ . К входным зажимам ТРВДН подключены первичные обмотки вольтодобавочного трансформатора, соединенные по схеме «треугольник». Модули продольного и поперечного регулирования выполнены на базе секционированных вторичных обмоток трансформатора  $TV1$ . Данные модули включены последовательно между входным и выходным зажимами каждой фазы ТРВДН. Тиристорные ключи ТК1-ТК6 всех фаз образуют модули поперечного регулирования. Включение регулировочных секций в диагональ тиристорного моста позволяет реверсировать напряжение соответствующей ступени регулирования. Секции вторичных обмоток ВДТ, коммутируемые тиристорными ключами ТК7-ТК10, рассчитаны на напряжение  $u_2=e_2$ . Они образуют модули продольного регулирования. Модули поперечного регулирования исключаются из работы при включенных коммутаторах ТК5-ТК6 и выключенных ТК1-ТК4. В данном режиме выходные напряжения ТРВДН равны соответствующим входным напряжениям.

Проводящее состояние тиристорных ключей ТК4 и ТК5 реализует одну ступень поперечного регулирования. Поперечное регулирования напряжения фазы *A* осуществляется с помощью напряжения соседней фазы *B* пропорционального линейному напряжению  $-u_{BC}$ .

Формирование векторов напряжения поперечного регулирования фаз *B* и *C* осуществляется с помощью векторов пропорциональных напряжениям  $-u_{CA}$  и  $-u_{AB}$ . На рис. 2а представлена векторная диаграмма для данного режима работы. Следует отметить, что поперечное регулирование напряжения при включенных коммутаторах ТК5 и ТК2 позволяет увеличить угол сдвига между входными и выходными напряжениями практически в 2 раза (рис. 2б).

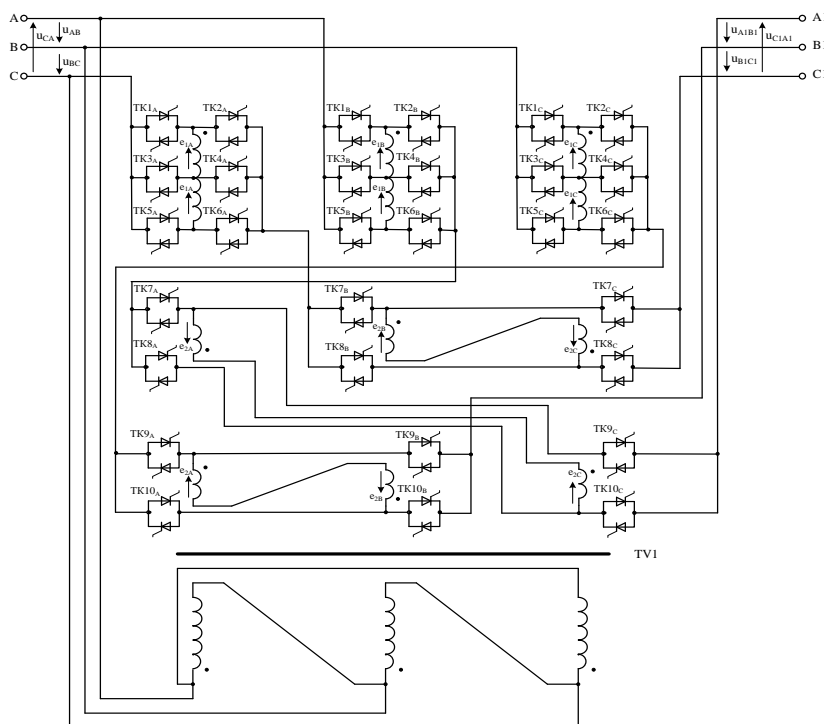


Рис. 1. Тиристорный регулятор напряжения с вольтодобавочным трансформатором

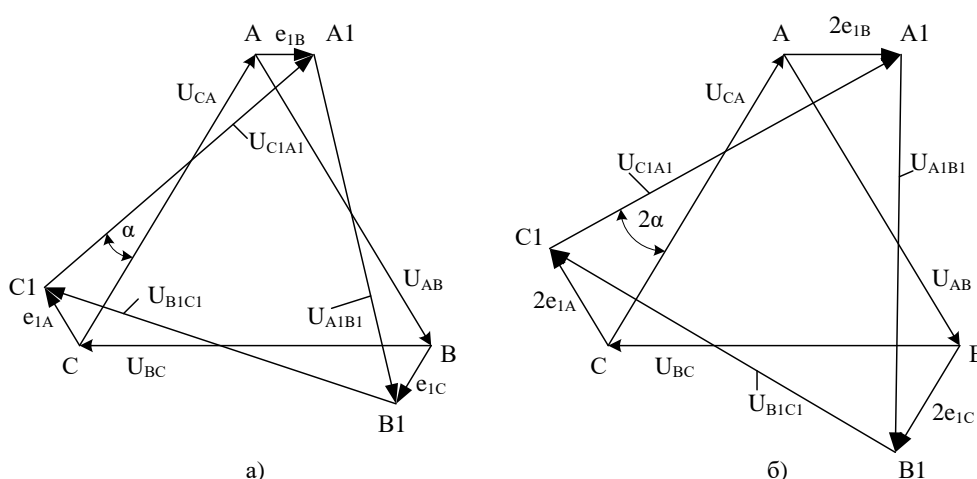


Рис. 2. Векторная диаграмма тиристорного регулятора при поперечном регулировании

Последовательное включение ТК3, ТК6 и ТК1, ТК6 позволяет получить на выходе ТРВДН напряжения, опережающие входные на углы  $\alpha$  и  $2\alpha$  соответственно.

Следует отметить, что поперечное регулирование вызывает увеличение выходных линейных напряжений ТРВДН. Использование модулей продольного регулирования, выпол-

ненных на тиристорных ключах ТК7-ТК10, дает возможность стабилизировать выходные линейные напряжения по величине, а также обеспечить продольное регулирование. В диагональ тиристорного моста модуля продольного регулирования включены встречно – последовательно соединенные обмотки двух соседних фаз ВДТ.

В зависимости от режима работы тиристорных коммутаторов модуль продольного регулирования реализует три режима работы с синусоидальным выходным напряжением.

Вторичные обмотки ВДТ исключаются из работы при включенных коммутаторах ТК8<sub>А</sub>, ТК 10<sub>С</sub>, ТК 8<sub>В</sub>, ТК 8<sub>С</sub>, ТК10<sub>А</sub>, ТК10<sub>В</sub>. Выходные линейные напряжения ТРВДН равны соответствующим входным напряжениям.

Снижение выходного напряжения при продольном регулировании осуществляется путем ввода в соответствующую линию разности э.д.с. ступеней продольного регулирования. В линию фазы *A* при включенных тиристорных коммутаторах ТК8<sub>А</sub>-ТК9<sub>С</sub> вводится  $e_{2C} - e_{2A}$ , в линию фазы *B* при включенных ТК10<sub>А</sub>-ТК9<sub>В</sub> вводится  $e_{2A} - e_{2B}$ , в линию фазы *C* при включенных ТК8<sub>В</sub>-ТК7<sub>С</sub> вводится  $e_{2C} - e_{2A}$ . На рис. 3а представлена векторная диаграмма, поясняющая данный режим работы. Увеличение выходного напряжения ФПУ осуществляется путем коммутации тиристорных ключей ТК7<sub>А</sub>, ТК10<sub>С</sub>, ТК7<sub>В</sub>, ТК8<sub>С</sub>, ТК9<sub>А</sub>, ТК10<sub>В</sub> (рис. 3 б).

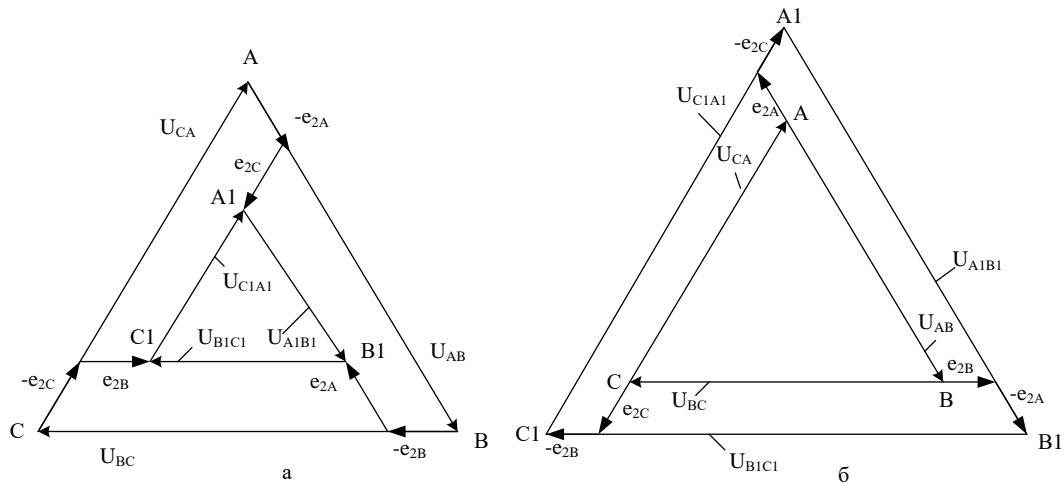
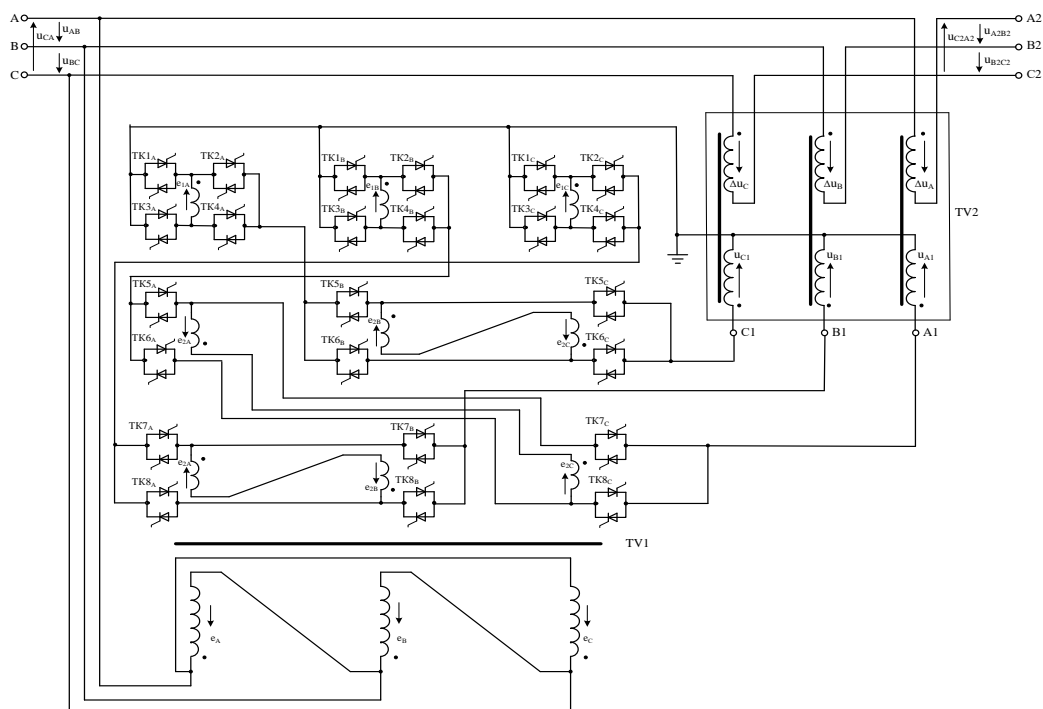


Рис. 3. Векторная диаграмма ФПУ при продольном регулировании

Следует отметить, что эффективное управление потоками мощности в распределительной электрической сети можно осуществить при совместном использовании модулей продольного и поперечного регулирования путем изменения величины и фазы выходного напряжения ТРВДН. В рассмотренной силовой схеме изоляция тиристорных находится под действием напряжения линии распределительной сети, что является существенным недостатком. Вопросы изоляции тиристорных в данном случае могут быть решены путем применения дополнительного согласующего трансформатора.

На рис. 4 представлена схема универсального ТРВДН для сетей среднего и высокого напряжения [3]. В отличие от схемы, представленной на рис. 1, в данном решении используется согласующий трансформатор. Тиристорные коммутаторы при этом вынесены в цепи вторичных обмоток шунтового трансформатора и находятся под низким напряжением. Кроме того, для работы устройства не нужно наличие заземленной нейтрали, что дает возможность использовать устройство не только в сетях высокого напряжения, но и в сетях низкого и среднего напряжения.

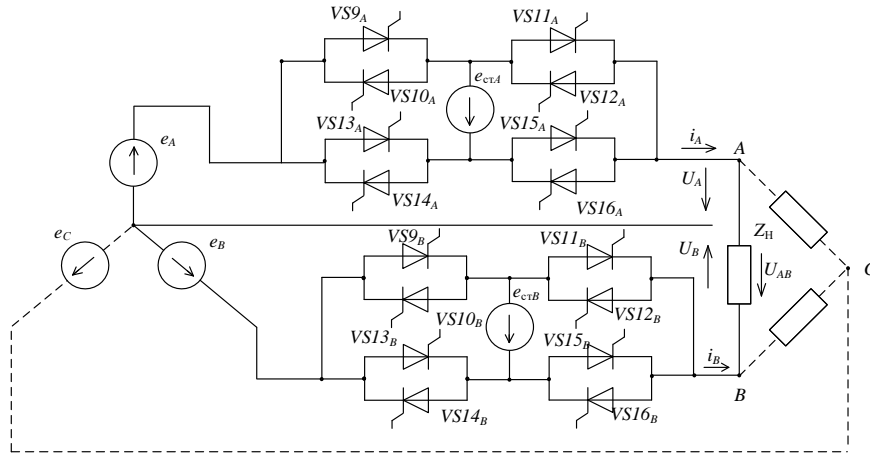
Как и в схеме, представленной на рис. 1, вторичные обмотки разбиты на равные секции, что облегчает коммутацию тиристорных. Модуль поперечного регулирования каждой фазы содержит одну регулировочную секцию, коммутируемую тиристорными ключами ТК1-ТК4. Использование только одной регулировочной секции в модуле поперечного регулирования упрощает конструкцию трансформатора и уменьшает количество тиристорных коммутаторов по сравнению со схемным решением, представленным на рис. 1.



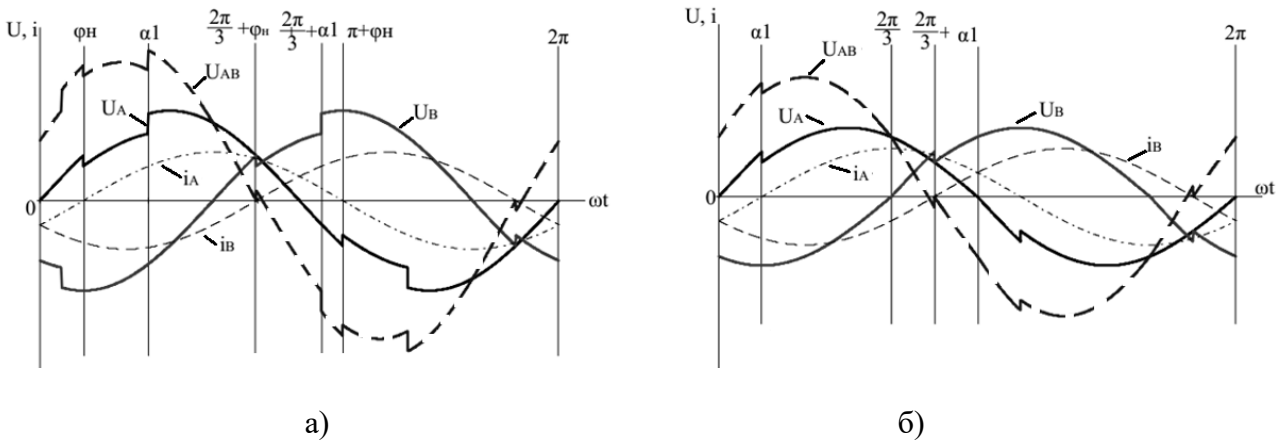
**Рис. 4. Схема универсального ТВДН для сетей среднего и высокого напряжения**

Необходимо отметить, что выбор оптимального коэффициента трансформации регулировочных секций обеспечивает необходимый диапазон регулирования выходного напряжения. Использование импульсно-фазового регулирования тиристорными ключами при совместном использовании модулей продольного и поперечного регулирования позволяет плавно регулировать величину и фазу выходного напряжения устройства во всем диапазоне [4]. При этом лучшими регулировочными характеристиками обладает алгоритм двухзонного управления тиристорными ключами. Указанный алгоритм устраняет возможность возникновения колебательных процессов, а также исключает нерегулируемые интервалы в выходном напряжении. Использование двухзонного поочередного управления тиристорными ключами с синхронизацией по моментам перехода напряжения сети через ноль реализует регулирование напряжения в интервалах положительного и отрицательного знака мощности. Регулирование напряжения в интервалах положительного знака мощности осуществляется путем изменения угла управления  $\alpha_1$ . Регулирование напряжения в интервалах отрицательного знака мощности выполняется путем изменения  $\alpha_2$ . Таким образом, регулирование углов управления  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  приводит к изменению выходного напряжения в пределах регулировочной ступени [4].

В качестве примера, поясняющего формирование выходного напряжения при продольном регулировании, на рис. 5 представлены схема замещения ТВДН, а на рис. 6 – временные диаграммы напряжений данного режима. Выходное напряжение ТВДН при продольном, поперечном и продольно-поперечном регулировании формируется на различных интервалах с помощью синусоидальных функций. Используя метод припасовывания разложив кривую выходного напряжения в ряд Фурье можно определить ее гармонический состав.



**Рис. 5. Схема замещения ТРВДН при продольном регулировании выходного напряжения**



**Рис. 6. Временные диаграммы работы ТРВДН при продольном регулировании в режиме:**  
 а) повышения напряжения при изменении  $\alpha_1$ ;  
 б) понижения напряжения при изменении  $\alpha_1$

Следует отметить, что в спектре выходного напряжения отсутствуют постоянная составляющая и четные гармоники. Кроме того, в линейных напряжениях отсутствуют гармоники, кратные 3, так как они образуют систему напряжений нулевой последовательности. Кривая выходного напряжения с разложением до 15-й гармоники будет описываться выражением (1):

$$u_{выхAB}(t) = \sum_{n=1}^{15} B_n \sin n\omega t + \sum_{n=1}^{15} A_n \cos n\omega t. \tag{1}$$

Коэффициенты  $B_n$  и  $A_n$ , определяются по формулам (2):

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T u_{AB}(t) \sin n\omega t dt; \quad A_n = \frac{2}{T} \int_0^T u_{AB}(t) \cos n\omega t dt. \tag{2}$$

На рис. 7 в качестве примера представлены амплитудно-частотный (рис. 7а) и фазочастотный (рис. 7 б) спектры выходного напряжения ТРВДН при продольном регулировании в режиме понижения напряжения при  $\alpha_1 = 70^\circ$  и угле нагрузки  $\varphi = 30^\circ$ .



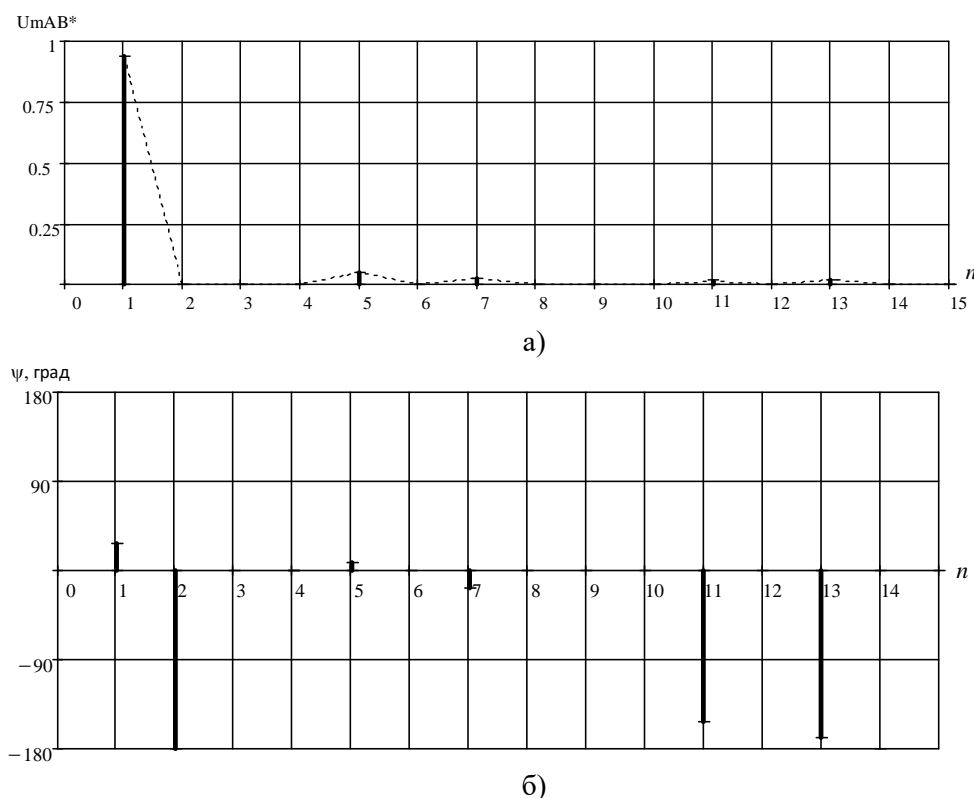


Рис. 7. Амплитудно-частотный и фазочастотный спектр выходного напряжения ТРВДН

### Выводы

1. Управление потоками мощности в распределительных электрических сетях целесообразно выполнять с использованием тиристорных регуляторов величины и фазы вольтодобавочного напряжения.
2. Для улучшения качества регулируемого напряжения разрабатываемые устройства должны обладать возможностью импульсно-фазового управления тиристорами между соседними уровнями синусоидального выходного напряжения в целях реализации плавного регулирования величины и фазы напряжения во всем диапазоне.
3. В сетях 6-20 кВ целесообразно использовать дополнительный согласующий трансформатор, позволяющий вывести тиристорные коммутаторы модулей продольного и поперечного регулирования на сторону низкого напряжения.
4. Увеличение коэффициента трансформации регулировочных секций вызывает возрастание амплитуд высших гармонических выходного напряжения ТРВДН. Это требует выработки рекомендаций по их ограничению в пределах, определяемых ГОСТ в отношении качества электроэнергии.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0242 о предоставлении субсидии от 26.09.2017, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0242).*

### Библиографический список

1. **Соснина, Е.Н.** Исследование твердотельного регулятора напряжения и мощности в сети 6-20 кВ / Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, Р.Ш. Бедретдинов, А.А. Кралин // Сборник трудов 2-й Международной научно-технической конференции «Проминжиниринг». – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 322-327.

2. **Соснина, Е.Н.** Тиристорный регулятор величины и фазы вольтодобавочного напряжения в распределительных электрических сетях 6-10 кВ / Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, А.А. Кралин, Е.В. Крюков // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей, 2017. – С. 132-136.
3. Пат. на изобретение № 2621062. Тиристорное фазоповоротное устройство с вольтодобавочным трансформатором для сети среднего напряжения / Соснина Е.Н., Асабин А.А., Кралин А.А., Крюков Е.В. 2017. Бюл. №16.
4. **Асабин, А.А.** Энергетические показатели тиристорного регулятора переменного напряжения с вольтодобавочными трансформаторами при поочередном двухзонном управлении / А.А. Асабин, А.А. Кралин // Интеллектуальная электротехника. – 2018. – № 2. – С. 93-104.

*Дата поступления  
в редакцию: 26.04.2019*

**A.A. Kralin, E.V. Kryukov, A.A. Asabin**

## **OPERATION PRINCIPLES OF THYRISTOR CONTROLLER MAGNITUDE AND PHASE OF THE BOOSTER VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS**

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

**Purpose:** The article is devoted to the principles of operation of the thyristor regulator of the value and phase of the booster voltage for distribution networks with longitudinal, transverse and longitudinal - transverse voltage regulation method.

**Design/methodology/approach:** The operation principles of thyristor controller magnitude and phase of the booster voltage are explained using vector diagrams. Technical solutions of power circuit are presented.

*Key words:* thyristor regulator, booster transformer, longitudinal, transverse, longitudinal-transverse regulation, phase-shifting device.

УДК 621.316

М.В. Мартынюк

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НАПРЯЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приводится описание метода вычисления коэффициентов управления специализированных устройств, предназначенных для обеспечения заданных напряжений в электрической сети. Задача сводится к поиску корней уравнения с одним комплексным неизвестным второго порядка. Показано, что данная задача не всегда имеет решение, приводится пример задачи управления напряжением потребителя, которую нельзя решить посредством одного регулирующего устройства даже в случае неограниченного диапазона регулирования.

*Ключевые слова:* оперативное управление, функция комплексного переменного, распределительная электрическая сеть, тиристорный регулятор вольтодобавочного напряжения.

### Постановка задачи управления состоянием электрической сети

Существующие в настоящее время устройства управления величиной и фазой вольтодобавочного напряжения (тиристорные регуляторы величины и фазы вольтодобавочного напряжения – ТРВДН [1]) могут применяться для решения задач статического [2] и оперативного [3] регулирования напряжения и управления потоками мощности в распределительных электрических сетях (РЭС) различной архитектуры. Возможность регулирования с помощью ТРВДН амплитуды и фазы напряжения позволяет получить точное решение для задачи управления напряжениями в заданных узлах электрической сети. В качестве таких узлов могут выступать, например, потребители электроэнергии.

Управляющее воздействие ТРВДН на электрическую сеть описывается комплексным числом  $z$ , представляющим собой комплексный коэффициент трансформации напряжения. Действительная часть  $\text{Re}(z)$  отвечает за продольное регулирование, а мнимая часть  $\text{Im}(z)$  – за поперечное регулирование.

В работах [4,5] даны описания различных алгоритмов управления напряжениями РЭС посредством ТРВДН. Исходными данными для вычисления управляющих коэффициентов ТРВДН являются значения параметров элементов электрической сети: полные сопротивления линий передачи электроэнергии  $Z_{\text{LINE}}$ , номинальные (требуемые) напряжения  $U_{\text{nom}}$  и значения текущих нагрузок каждого из потребителей (полные мощности потребления  $P_{\text{LOAD}}$ ), характеристики трансформаторов – позволяющие произвести расчет электрической сети (вычисление токов и напряжений каждого элемента электрической сети) [6]. Нагрузка потребителей моделируется комплексным сопротивлением  $Z_{\text{LOAD}}$ , значение которого определяется  $P_{\text{LOAD}}$  и  $U_{\text{nom}}$ . В работе [4] показано, что для регулирования РЭС с линейной архитектурой (1) для каждого участка сети требуется решить уравнение, составленное на основании равенства мощностей на входе и выходе каждого из ТРВДН (в рамках данной модели ТРВДН рассматривается, как идеальный трансформатор) (1):

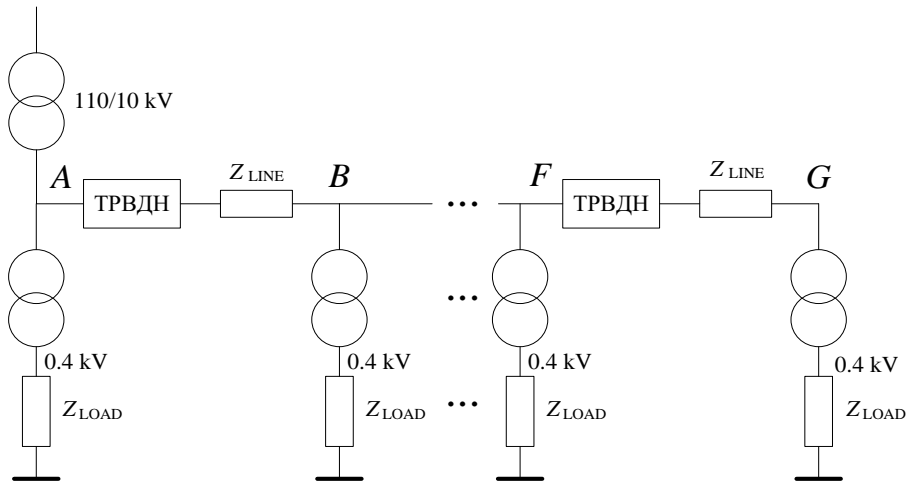
$$-Z_{\text{LINE}}I[I]^* + U_{\text{nom}}[I]^* - [I_{\text{LOAD}}]^*U_{\text{nom}} = 0, \quad (1)$$

где  $I$  – ток во входной ветви ТРВДН, а  $I_{\text{LOAD}}$  – ток в выходной линии ТРВДН, который определяется нагрузкой потребителя. После вычисления  $I$  управляющий коэффициент  $z$  вычисляется на основании уравнения (2):

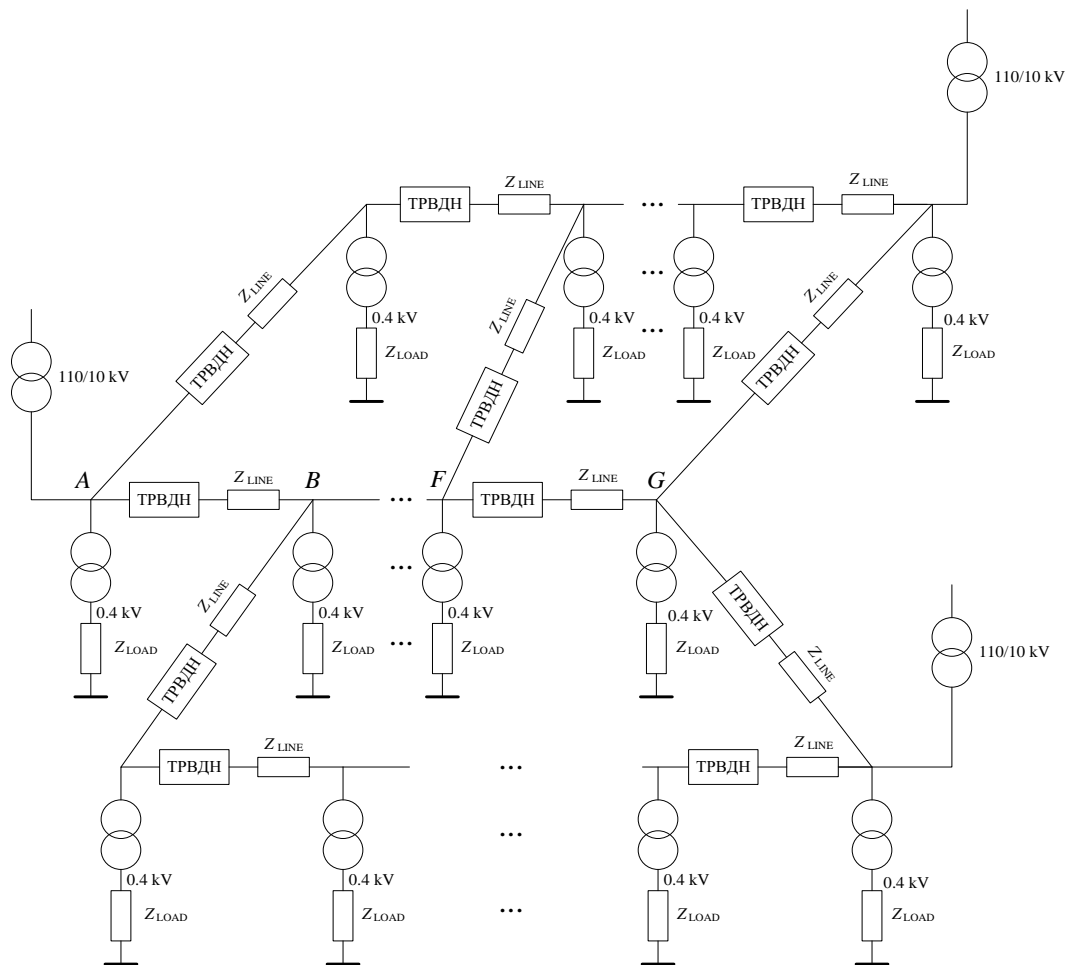
$$z = (U_{\text{nom}} + IZ_{\text{LINE}})/U_{\text{nom}} \quad (2)$$

Данное уравнение не является простым квадратным уравнением и требует решения системы нелинейных уравнений, составленных на основании равенства нулю действительной и

мнимой составляющих функции комплексного аргумента расположенной в левой части уравнения.



**Рис. 1. Пример структурной схемы распределительной электрической цепи с линейной архитектурой**



**Рис. 2. Пример структурной схемы распределительной электрической цепи со сложной сетевой архитектурой**

Можно показать, что вычисление коэффициентов управления в электрических сетях с более сложной сетевой архитектурой (рис.2) потребует решения уравнение второй степени вида (3):

$$az\bar{z} + bz + c\bar{z} + d = 0, \quad (3)$$

где  $z$  – искомый неизвестный коэффициент управления ТРВДН,  $\bar{z}$  – число комплексно сопряженное коэффициенту управления,  $a, b, c$  и  $d$  – известные комплексные коэффициенты уравнения.

### Вычисление коэффициентов управления

Введем обозначения для действительной и мнимой составляющих комплексного числа через нижние индексы  $r$  и  $i$ :  $a = a_r + a_i i$ , где  $a_r = \text{Re}(a)$  и  $a_i = \text{Im}(a)$  действительные числа. Также введём обозначение (4):

$$f(z) = az\bar{z} + bz + c\bar{z} + d = u(z_r, z_i) + iv(z_r, z_i), \quad (4)$$

где  $f(z)$  – функция комплексной переменной, а  $u(z_r, z_i)$  и  $v(z_r, z_i)$  – действительные функции действительных переменных.

Требуется, либо найти значения корней данного уравнения  $z$ , либо, если уравнение не имеет решения, значение  $z$  обеспечивающее (5):

$$\min_z |f(z)|. \quad (5)$$

Решение находится путем составления системы уравнений для действительной и мнимой составляющих.

Запишем выражение (4) в соответствии с введенным обозначением:

$$f(z) = (a_r + a_i i)(z_r + z_i i)(z_r - z_i i) + (b_r + b_i i)(z_r + z_i i) + (c_r + c_i i)(z_r - z_i i) + (d_r + d_i i)$$

или

$$f(z) = (a_r z_r^2 + a_r z_i^2 + b_r z_r - b_i z_i + c_r z_r + c_i z_i + d_r) + (a_i z_r^2 + a_i z_i^2 + b_r z_i - b_i z_r - c_r z_i + c_i z_r + d_i) i.$$

Получаем,

$$\begin{aligned} u(z_r, z_i) &= (a_r z_r^2 + a_r z_i^2 + b_r z_r - b_i z_i + c_r z_r + c_i z_i + d_r), \\ v(z_r, z_i) &= (a_i z_r^2 + a_i z_i^2 + b_r z_i - b_i z_r - c_r z_i + c_i z_r + d_i). \end{aligned}$$

Из (3) следует, что должно выполняться условие

$$\begin{cases} u(z_r, z_i) = 0 \\ v(z_r, z_i) = 0 \end{cases}$$

или (6)

$$\begin{cases} a_r(z_r^2 + z_i^2) + (b_r + c_r)z_r + (-b_i + c_i)z_i + d_r = 0 \\ a_i(z_r^2 + z_i^2) + (b_i + c_i)z_r + (b_r - c_r)z_i + d_i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Эту систему нелинейных уравнений необходимо решить относительно двух вещественных неизвестных  $z_r$  и  $z_i$ .

Рассмотрим несколько случаев. Если  $a_r = 0$  и  $a_i = 0$ , то система уравнений (3) является системой линейных уравнений, решение которой находится, как:

$$z_r = \frac{b_i d_i + b_r d_r - c_i d_i - c_r d_r}{b_i^2 + b_r^2 - c_i^2 - c_r^2},$$

$$z_i = \frac{b_i d_r - b_r d_i + c_i d_r - c_r d_i}{b_i^2 + b_r^2 - c_i^2 - c_r^2}.$$

Если  $a \neq 0$ , находится линейная зависимость между  $z_r$  и  $z_i$  через взвешенную разность строк системы уравнений (6):

$$\begin{aligned} a_i(b_r + c_r)z_r + a_i(-b_i + c_i)z_i + a_i d_r - a_r(b_i + c_i)z_r - a_r(b_r - c_r)z_i - a_r d_i &= 0, \\ (a_i b_r + a_i c_r - a_r b_i - a_r c_i)z_r + (-a_i b_i + a_i c_i - a_r b_r + a_r c_r)z_i + a_i d_r - a_r d_i &= 0. \end{aligned}$$

Введем обозначение:

$$Rz_r + Qz_i + D = 0,$$

где

$$\begin{aligned} R &= (a_i b_r + a_i c_r - a_r b_i - a_r c_i), \\ Q &= (-a_i b_i + a_i c_i - a_r b_r + a_r c_r), \\ D &= a_i d_r - a_r d_i. \end{aligned}$$

В зависимости от равенства нулю коэффициентов  $R$  или  $Q$ , выражаем  $z_r(z_i)$  или  $z_i(z_r)$  и подставляем в одно из уравнений в (6). В результате получается обычное квадратное уравнение, которое необходимо решить относительно неизвестного  $z_r$  или  $z_i$ .

При  $R = 0$ :

$$z_i = -\frac{D}{Q}.$$

Найденное значение подставляется в одно из уравнений (6) с ненулевым коэффициентом при  $(z_r^2 + z_i^2)$ .

Если  $a_r = 0$  найденное значение  $z_i$  подставляется во второе уравнение:

$$a_i z_r^2 + (b_i + c_i)z_r + (a_i z_i^2 + (b_r - c_r)z_i + d_i) = 0,$$

в противном случае  $z_i$  подставляется в первое уравнение:

$$a_r z_r^2 + (b_r + c_r)z_r + (a_r z_i^2 + (-b_i + c_i)z_i + d_r) = 0.$$

Полученное квадратное уравнение решается относительно неизвестного  $z_r$ .

Если  $R \neq 0$ , то

$$z_r = -\frac{Q}{R}z_i - \frac{D}{R}$$

или

$$z_r = Az_i + B,$$

где

$$A = \frac{a_r b_r - a_r c_r + a_i b_i - a_i c_i}{a_i b_r + a_i c_r - a_r b_i - a_r c_i}$$

и

$$B = -\frac{a_i d_r - a_r d_i}{a_i b_r + a_i c_r - a_r b_i - a_r c_i}$$

подставляется в одно из уравнений (6) с ненулевым коэффициентом при  $(z_r^2 + z_i^2)$ .

Если  $a_r = 0$  выражение  $z_r(z_i)$  подставляется во второе уравнение:

$$a_r(A^2 + 1)z_i^2 + (2a_r AB + (b_r + c_r)A + b_i - c_i)z_i + (a_r B^2 + (b_r + c_r)B + d_r) = 0,$$

в противном случае  $z_r(z_i)$  подставляется в первое уравнение:

$$a_i(A^2 + 1)z_i^2 + (2a_r AB + (b_i + c_i)A + b_r - c_r)z_i + (a_r B^2 + (b_i + c_i)B + d_i) = 0.$$

Полученное квадратное уравнение решается относительно неизвестного  $z_i$ .

Если найденные значения  $z_r$  и  $z_i$  имеют мнимую составляющую (не существует действительных  $z_r$  и  $z_i$ ) – это означает, что уравнение (3) не имеет решения на множестве комплексных чисел, то есть ТРВДН не может обеспечить требуемое напряжение в заданном узле.

В этом случае требуется найти  $z$  удовлетворяющее требованию (5). Нахождение строгого аналитического решения затруднительно и минимум функции  $|f(z)|$  может быть найден численно с использованием одного из методов нелинейной оптимизации.

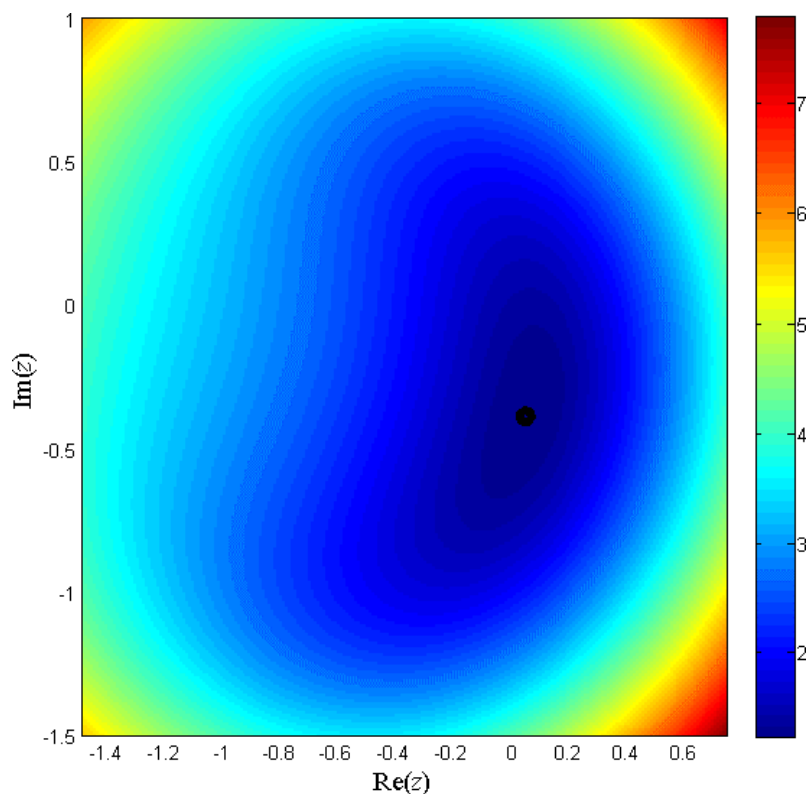


Рис. 3. Пример функции  $|f(z)|$  (4) для значений коэффициентов:  $a = 1+2i, b = 2+1i, c = 1+1i, d = -1+1i$

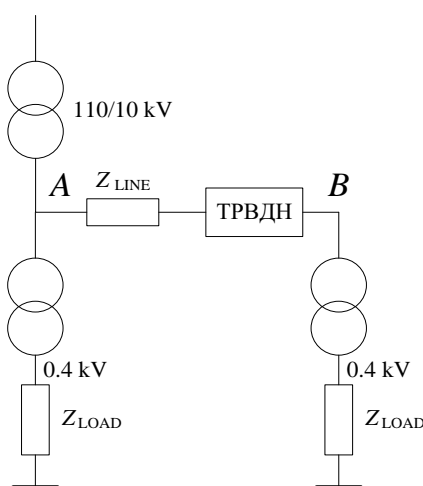


Рис. 4. Протяженная РЭС с двумя потребителями

На рис. 3 представлен пример функции  $|f(z)|$  и найденное численно положение экстремума:  $|f(0.0457-0.386i)| = 1,234$ .

Был проведен численный эксперимент по управлению напряжением удаленного от источника потребителя (рис. 4) посредством изменения коэффициентов регулирования в широком диапазоне, значительно превышающем возможности реального ТРВДН. Величина нагрузки потребителя в узле  $B$  составляла 1 МВт, расстояние до источника 50 км, площадь поперечного сечения проводов линии электропередачи 150 мм<sup>2</sup>. Результаты моделирования представлены на рис 5. Максимальное значение модуля напряжения потребителя в точке  $B$  составило 9740 В.

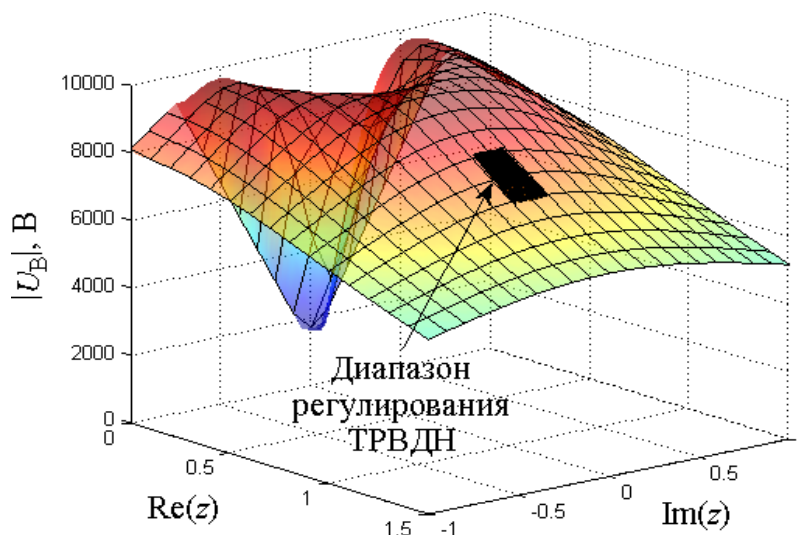


Рис. 5. Зависимость абсолютного напряжения потребителя в узле  $B$  от значения коэффициента регулирования ТРВДН

### Заключение

При вычислении значений управляющих коэффициентов ТРВДН необходимо учитывать не только возможности данных устройств – верхние и нижние пределы изменения выходного напряжения и угла сдвига фаз, их дискретность – но и тот факт, что достижение номинального напряжения в заданном узле может оказаться невозможным.

*Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.577.21.0242 о предоставлении субсидии от 26.09.2017, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0242).*

### Библиографический список

1. Пат. 2621062 Рос. Федерация: МПК G 05F 1/30. Тиристорное фазоповоротное устройство с вольтодобавочным трансформатором для сети среднего напряжения / Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, А.А. Кралин, Е.В. Крюков; заявитель и патентообладатель Ниж. гос. техн. ун-т им. П.Е. Алексеева – № 2016127017; заявл. 06.07.2016; опубл. 31.05.2017, Бюл. № 16.
2. **Рыбников, Д.А.** Применение вольтодобавочных трансформаторов в распределительных сетях 0,4 кВ ОАО «МРСК Центра» // Энергоэксперт. – 2011. – № 3. – С. 52.
3. **Соснина, Е.Н.** Тиристорный регулятор величины и фазы вольтодобавочного напряжения в распределительных электрических сетях 6-10 кВ / Е.Н. Соснина [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики. 2017. – С. 132-136.
4. **Martynyuk, M.V.** Voltage regulation of a linear section of an extended distribution network with thyristor regulators of booster voltage (TRBV) / M.V. Martynyuk, E.S. Sokolova, D.V. Dmitriev, A.I. Tyurin,



Evgeny V. Kryukov // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering.

5. **Sokolova, E.S.** Optimization of the Parameters of the Distribution Network Computer Model to Reduce Losses / E.S. Sokolova, M.V. Martyniuk, D.V. Dmitriev, A.I. Tyurin – 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok.
6. **Martynyuk, M.V.** Matrix Method of Calculation for Simulation of Distribution Electric Networks of Medium Voltage / M.V. Martynyuk, E.S. Sokolova, D.V. Dmitriev. And A.I. Tyurin // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – V 12. – № 24. – P. 15066-15072.

*Дата поступления  
в редакцию: 22.04.2019*

**M.V. Martynyuk**

**CALCULATION OF THE COEFFICIENTS OF REGULATING THYRISTOR DEVICE  
FOR OPERATIONAL VOLTAGE MANAGEMENT  
ON THE ELECTRIC NETWORK SECTION**

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

**Purpose:** The article describes the method of calculating the control coefficients of a device designed to regulate the voltage of consumers in a distribution electrical network.

**Approach:** The values of the control coefficients are found by solving a second-order complex unknown equation, which reduced to a system of nonlinear equations.

**Results:** The considered method allows to obtain the exact values of the control coefficients. It is shown that this task does not always have a solution and provides an example of a consumer voltage control problem that cannot be solved by a single regulating device, even if the device has an unlimited range of regulation.

*Keywords:* operational control, function of complex variable, distribution electrical network, TVBR.

УДК 621.039.531/534

В.М. Мордвинцев, Н.Г. Кодочигов, Ю.П. Сухарев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ ЗАСЫПКИ ШАРОВЫХ ТВЭЛОВ НА БЛОКИ ГРАФИТОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В АКТИВНЫХ ЗОНАХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫХ РЕАКТОРОВ

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

Цель проведенных исследований – отработка методологии оценки давления засыпки твэлов на отражатели активной зоны ВТГР, а также прогнозирование на ее основе давления в существующих проектах газоохлаждаемых реакторов. Изложен экспериментально-расчетный метод определения силового воздействия движущейся засыпки шаровых твэлов на блоки бокового отражателя реакторов ВТГР, основанный на физическом моделировании с использованием принципов теории подобия.

Получен большой объем экспериментально-расчетных данных по моделированию и определению бокового давления шаровых засыпок в активных зонах ВТГР. Анализ полученных данных и их аппроксимация позволили определить аналитические зависимости давления сыпучей среды на боковой отражатель, которые могут быть использованы в проектных расчетах реакторов. Проведено сравнение полученных результатов с данными зарубежных исследований.

*Ключевые слова:* механика сыпучих сред, силовое взаимодействие шаровой засыпки твэлов, отработка методологии оценки давления засыпки на блоки отражателя, формулы для оценки давления, распределение давления по высоте бункера.

### Введение

При проектировании высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) с насыпной активной зоной в число стоящих перед разработчиками задач входит изучение силового взаимодействия шаровых твэлов с блоками графитовых отражателей в результате гравитационного бокового давления шаровой засыпки.

Механика сыпучих сред опирается на экспериментальные данные, позволяющие осветить физическую сторону явлений и процессов, происходящих в сыпучих телах, обосновать те или иные предпосылки и допущения. Следует иметь в виду, что только из опыта могут быть получены для разных сыпучих сред числовые значения физико-механических характеристик и констант, входящих в расчетные формулы. Значение опыта в механике сыпучих тел еще более велико, чем в других разделах механики, поскольку явления и процессы, происходящие в сыпучих телах, сложнее, чем в твердых или жидких, и при этом менее изучены. Это в полной мере относится к вопросам силового взаимодействия шаровой засыпки твэлов с графитовой кладкой реактора. Задача осложняется тем, что давление сыпучей среды необходимо определять, как в состоянии стационарного (устойчивого или упругого) равновесия, так и в состоянии движения засыпки твэлов в процессе ее рециркуляции. В то же время взаимодействие твэлов с кладкой отражателей представляет несомненный интерес с точки зрения прогнозирования износоустойчивости кладки, так как методики прогнозирования износа базируются на знании давления шаровых твэлов в точках касания с блоками кладки. Таким образом, определение давлений на кладку является актуальной задачей. Получение этой информации необходимо как с позиций теоретического прогнозирования износа, так и с позиций его экспериментального изучения методами физического моделирования.

Приведенные в работе данные по экспериментальным исследованиям получены в период работ по проектированию реактора ВГ-400; в настоящей статье они дополнены новой информацией и переосмыслены, представляя определенную ценность в связи с разработкой и строительством ВТГР с насыпной активной зоной за рубежом, а также возможным продолжением разработки таких реакторов в России.

### Постановка задачи исследований

Для разработки методологии получения на стадии проектирования реакторов оценок величины бокового давления засыпки твэлов на блоки графитовых отражателей необходимо решение следующих задач:

- получение экспериментальных данных о распределении бокового давления на моделях активной зоны;
- анализ факторов, определяющих величину бокового давления;
- разработка зависимостей пересчета полученных данных на натурные условия различных проектов ВТГР.

### Экспериментальные исследования бокового давления засыпки шаровых элементов

Задача экспериментального определения давления засыпки шаров на боковые стенки решалась на модели активной зоны ВГ-400 масштаба 1:3 и последующей аппроксимацией экспериментальных данных. В качестве модели активной зоны в масштабе 1:3 использовалась стальная емкость диаметром  $D=2,13$  м с тремя разгрузочными каналами и 18 загрузочными шаропроводами, заполненная до уровня 1,7 м ( $H/D=0,8$ ) стеклянными имитаторами шаровых твэлов диаметром  $d_{ш}=0,02$  м в количестве  $\approx 800$  тыс. Коэффициент внутреннего трения засыпки составил  $f_{вн}=0,36$ , внешнего трения  $f_{внеш}=0,3$ . Насыпной удельный вес засыпки при пористости  $\varepsilon=0,4$  составил  $\gamma \approx 1080$  кг/м<sup>3</sup>.

Измерение горизонтальных усилий производилось с помощью тензодатчиков консольного типа, установленных на десяти воспринимающих давление измерительных площадках размером 0,1 м × 0,07 м, вставленных в боковой корпус модели попарно на пяти уровнях по высоте засыпки, начиная с  $\Delta H=0,33$  м ( $17d_{ш}$ ) до 0,98 м ( $50 d_{ш}$ ) от ее свободного уровня. Для дистанционной синхронизированной фиксации давлений сигналы с тензодатчиков поступали на усилитель и на записывающие устройства, а с него на шлейфовый осциллограф.

Учитывая, что, по априори известным данным [1-5], боковое давление в статическом положении сыпучей среды существенно отличается от давления при выпуске ее из бункера, измерения проводились как в процессе стартового заполнения модели шарами, так и в процессе рециркуляции шаровой засыпки с расходом 2-3 шара в секунду через каждый из трех выгрузных каналов. В периоды стартовых загрузок активной зоны и в промежутках между циклами загрузки – выгрузки твэл на отражатели действуют статические нагрузки. В период их рециркуляции засыпка в основной своей массе медленно движется, со скоростями, определяемыми темпом выгрузки твэлов и местоположением их в объеме а.з. (для ВГ-400 средняя скорость оседания засыпки  $\approx 0,0000125$  м/с). Измерения при стартовом заполнении модели производились с шагом  $\Delta H=0,1$  м и 0,17 м от каждого из пяти уровней расположения датчиков. Усреднение получаемых данных производилось по показаниям со всех датчиков для каждого фиксированного уровня заполнения модели, а также по датчикам одного уровня. Измерения в движении производились с шагом 10 тыс. перегруженных шаров, что, согласно со скоростями шаров пристеночных слоев, приводило к их смещениям, достаточным для изменения ситуации на измерительных площадках. Измерения производились после предварительной перегрузки  $\approx 1$  объема засыпки (для стабилизации ее структуры и поля скоростей) в течение последующей рециркуляции еще одного объема засыпки. Усреднение производилось по показаниям датчиков одного уровня, полученным в течение времени рециркуляции.

Получаемые данные усреднялись также и по количеству повторных экспериментов, после отбраковки явно аномальных наблюдений, вызванных погрешностями в системе измерений.

### Результаты исследований

В табл. 1 сведены усредненные экспериментальные значения горизонтального давления  $\sigma_{z(cp)}$  в стационарном состоянии засыпки и при ее движении. Здесь же представлены среднеквадратическое отклонение  $\sqrt{S}$  и выборка максимальных (пиковых) значений давления  $\sigma_{z(пик)}$ , имевших место при рециркуляции, а также сведены расчетные значения  $\sigma_{z(cp)}$  для различных проектов ВТГР и опубликованные данные по реактору ТНТР-300 (ФРГ) [6].

Анализируя физический смысл исследуемого процесса, в основу теоретического вывода зависимости бокового давления от глубины  $\Delta H$  (высоты слоя до уровня свободной поверхностью засыпки) может быть положено дифференциальное уравнение равновесия горизонтального дискообразного элемента сыпучей среды в бункере (1):

$$d\sigma_g = \left( \gamma - f_{внеш} n_\sigma \frac{\sigma_B}{\frac{S}{l}} \right) dH, \quad (1)$$

где  $\sigma_g$  и  $d\sigma_g$  – давление столба сыпучей среды и приращение элемента слоя  $dH$ ;  $\gamma$  – насыпной вес сыпучей среды в данном элементе объема;  $f_{внеш}$  – коэффициент внешнего трения сыпучего элемента;  $n_\sigma$  – коэффициент бокового давления, определяемый как отношение бокового давления  $\sigma_r$  к вертикальному  $\sigma_B$ ;  $\frac{S}{l}$  – гидравлический радиус, определяемый как отношение площади поперечного сечения к периметру.

Интегрирование выражения (1) приводит к выражению, известному как формула Янссена для бункеров диаметром  $D$  (2):

$$\sigma_r = \frac{\gamma D}{4f_{внеш}} \left( 1 - e^{-\frac{4n_\sigma f_{внеш} \Delta H}{D}} \right) \quad (2)$$

Таблица 1

Таблица экспериментальных значений горизонтального давления

	Эксперимент (М1:3)		Расчет (М 1:1)				ТНТР-300	
	Проект ВГ-400		НТР-10		ВГМ			
ΔH	H/D=0,8 D=107d <sub>ш</sub>	H/D=0,8 D=107d <sub>ш</sub>	H/D=1 D=30d <sub>ш</sub>	H/D=3 D=50d <sub>ш</sub>	H/D=0,8 D=93d <sub>ш</sub>			
	d <sub>ш</sub> =0,02м	d <sub>ш</sub> =0,06м						
	γ = 1500 кг/м <sup>3</sup>	γ = 1080 кг/м <sup>3</sup>						
	Диапазоны f <sub>вн</sub> / f <sub>внеш</sub>							Диапазон f <sub>вн</sub> = 0,13-0,6
	f <sub>вн</sub> =0,36 / f <sub>внеш</sub> =0,30	0,12 /	0,45 /	0,12 /	0,45 /	0,12 /	0,45 /	
		0,14	0,49	0,14	0,49	0,14	0,49	

Окончание табл. 1

	По формуле 4				По формуле 7							
	Статика	В движении										
	$\sigma_{z(ср)}$	$\sigma_{z(ср)}$	$\sqrt{S}$	$\sigma_{z(пик)}$	$\sigma_{z(ср)}$						$\sigma_{z(пик)}$	
x10кгс/см <sup>2</sup>												
17d <sub>ш</sub>	0,2	0,37	0,1	0,51	0,96	0,75	0,87	0,68	0,93	0,67	0,86	3,34
25d <sub>ш</sub>	0,29	0,61	0,16	0,87	1,58	1,24	1,43	1,12	1,34	0,9	1,35	3,92
33d <sub>ш</sub>	0,34	0,79	0,24	1,19	2,05	1,6	1,86	1,45	1,72	1,07	1,87	4,59
42d <sub>ш</sub>	0,49	0,97	0,27	1,42	2,53	1,97	-	-	2,06	1,2	2,39	5,16
50d <sub>ш</sub>	0,53	1,05	0,27	1,51	2,73	2,13	-	-	2,37	1,31	2,64	5,64
58d <sub>ш</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	2,66	1,39	2,64	5,45
67d <sub>ш</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	2,92	1,45	2,28	4,6
75d <sub>ш</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	3,17	1,5	-	-
147d <sub>ш</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	7,5	4,5	-	-

Следует отметить, что вывод формулы (2) основан на следующих допущениях:

- вертикальное давление  $\sigma_r$  на любой глубине  $\Delta H$  принимается равномерно распределенным (или усредненным) по всей площади  $S$  горизонтального сечения;
- горизонтальное давление –  $\sigma_r$ . в любой точке сыпучей среды, в том числе и у стенок бункера, принимается пропорциональным вертикальному давлению по всей глубине бункера, то есть  $n_\sigma = const$ ;
- значение коэффициента внешнего трения о стенки бункера  $f_{внеш} = const$ ;
- по всей глубине;
- влияние днища не учитывается, т.е. засыпка принимается неограниченной по глубине.

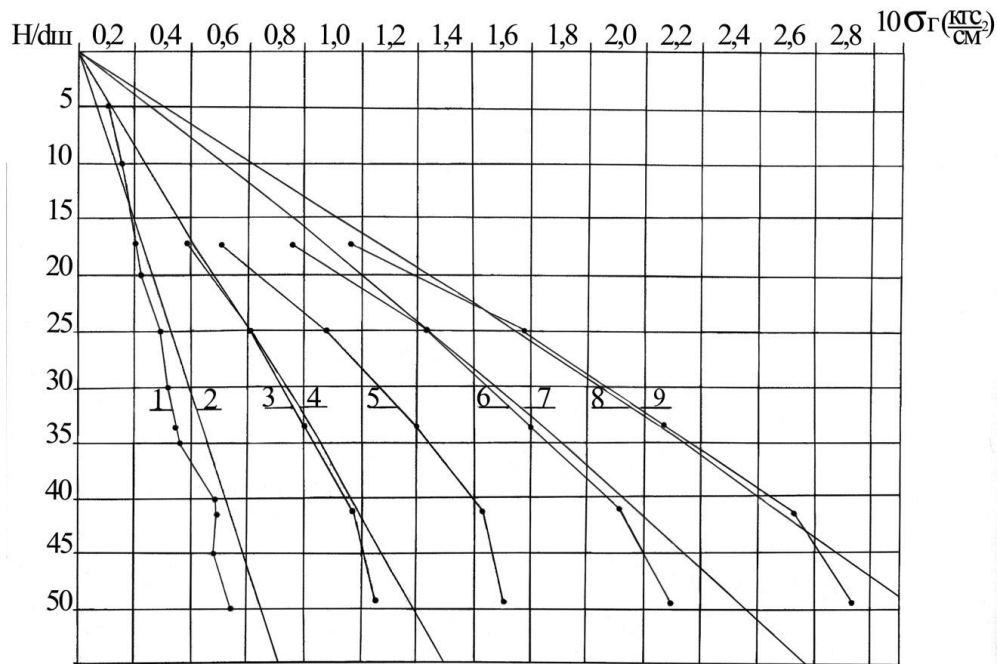
Коэффициент бокового давления  $n_\sigma$  вычисляется по ряду соотношений, наиболее обоснованным является  $n_\sigma = \frac{1 - \sin \varphi_{вн}}{1 + \sin \varphi_{вн}}$ , называемый коэффициентом подвижности [1, 7], где  $\varphi_{вн}$  – угол внутреннего трения засыпки.

Анализ структуры формулы Янссона, выведенной для статического положения неограниченной по высоте засыпки, показывает, что при увеличении  $\Delta H$  давление на стенку должно монотонно и медленно возрастать, приближаясь к максимуму (3):

$$\sigma_r = \frac{\gamma D}{4f_{внеш}} \quad (3)$$

Однако, уже с глубины  $\Delta H$ , соответствующей  $\Delta H/D \cong 6$ , горизонтальное давление практически не растет. Это означает, что при глубинах с  $\Delta H/D > 6$  давление на стенки не зависит от высоты выше лежащего слоя и силы внешнего трения сыпучего материала компенсируют вес вновь загружаемого материала. Для мелких бункеров с  $H/D \leq 1$  (реакторы типа ВГ-400, НТР-10, ТНТР-300) зависимость  $\sigma_r$  от  $\Delta H$ , рассчитанная по формуле (2), практически линейна. Следует также отметить, что на малых глубинах величина бокового давления слабо зависит от диаметра бункера и внешнего трения, однако в соответствии с (3) максимальное давления на больших глубинах находится от  $D$  в прямой, а от  $f_{внеш}$  в обратно пропорциональной зависимости.

На рис. 1 (линия 1) видно, что полученные экспериментальные зависимости бокового давления в статическом положении засыпки достаточно хорошо согласуется с расчетами по теоретической формуле Янссена (2) (линия 2).



**Рис. 1. Распределение бокового давления по высоте шаровой засыпки:**  
 линии 1,3,5 – эксперимент на модели М1:3, линия 2 – расчет по формуле Янссена (2),  
 линии 4,7,9 – расчет по формуле (4), линии 6,8 – расчет по формуле (5)

Однако при движении твэлов боковое давление резко возрастает (линия 3) в среднем в 2,05 раза, и в данном случае формула Янссена в форме (2) уже не работает. Единого мнения, объясняющего этот эффект, среди исследователей нет. Вместе с тем, принимая за основу (2), единственным фактором, способным значительно увеличить боковое давление в слоях засыпки с  $H/D \leq 3$ , является увеличение коэффициента бокового давления  $n_{\delta}$ , непосредственно связанного с коэффициентом внутреннего трения  $f_{вн}$ . В экспериментах по изучению трения [3] было однозначно установлено при переходе засыпки шариков из состояния покоя в состояние движения внешнее трение частично переходит от трения скольжения к трению качения, понижая коэффициент  $f_{внеш}$  в 3-4 раза. Можно предположить, что и в глубине засыпки (в зонах сдвига) может наблюдаться тот же эффект, понижающий коэффициент  $f_{вн}$ . Засыпка как бы частично «оживается», в результате чего давление на боковые поверхности увеличивается, смещаясь в сторону величины гидростатического давления, определяемого как  $\gamma \Delta H$ . Учитывая это, при расчетах  $\sigma_r$  по формуле (2) целесообразно принять пониженные значения коэффициента внешнего трения  $f_{внеш}$  и угла внутреннего трения  $\varphi_{вн}$ . В результате получена зависимость (линия 4 на рис. 1), практически совпадающая с экспериментальными значениям  $\sigma_r$  при рециркуляции шаров. Адаптированная таким образом формула Янссена применительно к описанию движущейся засыпки приобретает вид (4):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\gamma D}{f_{внеш}} \left( 1 - e^{-\frac{n_{\delta} f_{внеш} \Delta H}{D}} \right) \\ n_{\delta} &= \frac{1 - \sin(\arctan \frac{f_{вн}}{4})}{1 + \sin(\arctan \frac{f_{вн}}{4})} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Теоретической основой для пересчета результатов модельных испытаний является степенной закон, связывающий важнейшие параметры, от которых зависит величина бокового давления. В а.з. с глубиной  $H/D \leq 3$  это, в первую очередь, масштаб модели  $M$ , удельный

насыпной вес засыпки  $\gamma$ , внутреннее и внешнее трение  $f_{вн}$  и  $f_{внеш}$ . При экстраполяции модельных данных на другие проекты реакторов следует учитывать также и изменение диаметров этих реакторов. При этом формула пересчета примет вид (5):

$$\sigma_{\Gamma(p)} = \sigma_{\Gamma(m)} \left( \frac{M(p)}{M(m)} \right)^{\alpha=1} \left( \frac{\gamma(p)}{\gamma(m)} \right)^{\beta=1} \left( \frac{f_{вн(p)}}{f_{вн(m)}} \right)^{\delta=-0,107} \left( \frac{f_{внеш(p)}}{f_{внеш(m)}} \right)^{\theta=-0,077} \left( \frac{D_{p(2)}}{D_{p(1)}} \right)^{\vartheta=0,077} \quad (5)$$

где индексы (р) и (м) обозначают натурные и модельные значения сопоставляемых параметров;  $\frac{D_{p(2)}}{D_{p(1)}}$  – соотношение диаметров модели и натурны (при условии, что диаметры  $D_{p1}$  и  $D_{p2}$  измеряются в диаметрах шаров  $d_{ш}$ , а используемые в реакторах р1 и р2 твэлы имеют одинаковый размер).

Показатели степени  $\alpha$  и  $\beta$  принимаются, исходя из физического смысла, равными 1 (но, если прогнозируемый параметр имеет размерность силы, то  $\alpha = 3$ ).

Показатели степени  $\delta$ ,  $\theta$ ,  $\vartheta$  определяются по формулам (6):

$$\delta = \frac{\ln \frac{\sigma_{\Gamma(1)}}{\sigma_{\Gamma(2)}}}{\ln \frac{f_{вн(1)}}{f_{вн(2)}}}, \theta = \frac{\ln \frac{\sigma_{\Gamma(1)}}{\sigma_{\Gamma(2)}}}{\ln \frac{f_{внеш(1)}}{f_{внеш(2)}}}; \vartheta = \frac{\ln \frac{\sigma_{\Gamma(1)}}{\sigma_{\Gamma(2)}}}{\ln \frac{D_{p(1)}}{D_{p(2)}}} \quad (6)$$

где соотношение  $\frac{\sigma_{p(1)}}{\sigma_{p(2)}}$  рассчитывается по формуле (4), для масштаба М1:1 и натурных значений входящих в нее параметров ( $\gamma$ ,  $f_{вн}$ ,  $f_{внеш}$  и D). При этом берутся по два значения коэффициентов трения, охватывающих предполагаемый диапазон их значений в натурных условиях рециркуляции засыпки твэл.

Рекомендуемые значения показателей степени составили  $\delta = -0,105$ ;  $\theta = -0,077$ ;  $\vartheta = 0,077$ . В табл. 1 приведены результаты расчетов бокового давления по формуле (5) для предполагаемых диапазонов натурных значений коэффициентов трения в реакторах типа проектов ВГ-400 и НТР-10. На рис. 1 это линии 6 и 8. Здесь же изображены соответствующие им линии 7 и 9, рассчитанные по формулам (4). Как видно из графиков, линии 6 и 7, а также 8 и 9 практически совпадают до глубин  $\Delta H = 45d_{ш}$ . При этом зависимости роста давления с глубиной, рассчитанные по экспериментальным данным, имеют линейный характер. Ниже этой глубины начинает проявляться тенденция к снижению пропорционального прироста давления, что, по-видимому, связано с приближением этих слоев к зоне влияния выгрузных каналов. Аналогичные результаты (табл. 1) были получены и при проектировании реактора ТНТР-300 [6]: здесь увеличение бокового давления наблюдалось до уровня  $\Delta H = 50d_{ш}$ . Ниже происходит его снижение. Имеет место также хорошее совпадение и по абсолютным величинам давления: данные по  $\sigma_{z(ср)}$  в зависимости от глубины слоя составляют 91-97 % от прогнозируемых для реактора ВГ-400. Следует также отметить, что представленные в табл. 1 и на рис. 1 результаты качественно хорошо согласуются с известными имеющимися данными о характере распределения бокового давления в мелких бункерах с  $H/D \leq 1$ .

В глубоких бункерах (с  $H/D \gg 1$ ) типа а.з. модульного реактора ВГМ с  $H/D = 3$  распределение бокового давления носит несколько иной характер. Связано это с тем, что основная масса сыпучего материала над уровнем  $H/D \cong 1$  движется как единое целое за исключением зоны сдвига в пристеночных слоях с пониженным относительно стационарного состояния значением коэффициента внешнего трения. Поскольку при этом коэффициент внутреннего трения в большинстве объема не должен меняться, то и коэффициент бокового давления  $n_{\sigma}$ , входящий в формулу (4), остается равным стационарному положению засыпки. В результате для описания бокового давления до уровня  $H/D \cong 1$  (для ВГМ это  $\Delta H/D = 2$ ) можно предложить формулы (7):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\Gamma} &= \frac{\gamma D}{f_{\text{внеш}}} \left( 1 - e^{-\frac{n_{\sigma} f_{\text{внеш}} \Delta H}{D}} \right) \\ n_{\sigma} &= \frac{1 - \sin(\arctan f_{\text{вн}})}{1 + \sin(\arctan f_{\text{вн}})} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В более глубоких слоях до уровней  $H/D = 0,25-0,3$  рекомендуется пользоваться формулой (4). При этом максимальные оценки бокового давления в режиме рециркуляции твэлов в реакторе ВГМ будут ожидать на глубине  $\Delta H/D \cong 2,95$  ( $\Delta H = 147d_{\text{ш}}$ ), составляя  $\sigma_{\Gamma(\text{ср})} = 0,45-0,75 \text{ кгс/см}^2$  в зависимости от величины коэффициентов трения.

Необходимо отметить, что, если высказанные предположения о причинах повышения бокового давления в медленно движущейся засыпке шаровых твэлов относительно ее стационарного состояния частично не соответствуют реальным процессам, то формулы (4) и (7), можно рассматривать как аппроксимацию экспериментальных данных и могут быть рекомендованы для инженерных расчетов. Для оценки давления на блоки кладки наклонного днища бункера существует ряд практических рекомендаций и расчетных зависимостей. Наиболее обоснованной является формула Р.П. Зенкова (8) [1, 8]:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{\sigma_{\Gamma}}{n_{\sigma}} [(\cos \alpha)^2 + n_{\sigma}(\sin \alpha)^2], \quad (8)$$

где отношение  $\frac{\sigma_{\Gamma}}{n_{\sigma}}$  есть вертикальное давление на уровне  $\Delta H$  (на глубине блоков конической части днища),  $\alpha$  – угол наклона конического днища.

Следует отметить, что значения  $\sigma_{\Gamma}$ , рассчитанные по формуле (4) или (7), для конического днища будут несколько завышены, имея тем самым коэффициент запаса. Приведенные в табл. 1 оценки бокового давления для движущейся засыпки являются, как отмечалось выше, усредненными во времени. Однако, учитывая, что реальный процесс имеет пульсирующий характер с существенно выраженными амплитудами колебаний давления, в табл. 1 приведены данные по максимальным (пиковым) давлениям  $\sigma_{\Gamma(\text{пик})}$ , зарегистрированным на каждом уровне  $\Delta H$ . Во многих работах также отмечается наличие пульсаций давления при выпуске сыпучей среды из бункеров и высказываются предположения, что одна из причин колебаний заключается в характере движения сыпучей среды к выгрузному отверстию [2, 9]. Действительно, при отсутствии внешних динамических воздействий причина пульсаций может состоять в периодических перестройках структуры засыпки в зонах сдвига и, следовательно, локальных пульсаций плотности по мере продвижения сыпучей среды к выгрузным каналам. Кроме того, большую роль при перестройке структуры могут играть процессы сводобразования с формированием сложных кинематических цепочек. Наблюдаемые «своды» в отличие от обычных, динамичны по своей природе. Образованная кинематическая цепь, восприняв давление вышележащих слоев, передает их на опоры, но, не обладая достаточной устойчивостью, разрушается, создавая внутри сыпучего тела дополнительные динамические нагрузки. При этом в момент ее разрушения происходит создание новой цепи и так процесс повторяется, в следствие чего давление носит пульсирующий характер.

По-видимому, только таким образом, а именно – наличием внутренних динамических нагрузок – можно объяснить данные по ТНТР-300 [6], показывающие, что пиковые значения бокового давления могут намного превышать величины, рассчитанные по формуле гидравлики  $\gamma \Delta H$ , даже, если насыпной удельный вес  $\gamma$  определять при минимально возможной пористости  $\varepsilon = 0,25$ . Усредненное по глубинам  $\Delta H$  значение максимальных (пиковых) давлений, зарегистрированных при испытаниях на модели ВГ-400 масштаба 1:3 (рис.1, линия 5), составляет  $\sigma_{\Gamma(\text{пик})} = 1,45 \sigma_{\Gamma(\text{ср})}$ . Тот же показатель для ТНТР-300 составил 2,5 [6]. Количество значений давления близких к максимальным в общем спектре значений, превышающих средние (трендовые) составляет не более 2 % (такое количество получено и в [6]).



Следует отметить, что пульсация давления должна проявляться в основном только в слоях засыпки, начиная с  $H/D \approx 1$ , то есть там, где начинает проявляться влияние зоны сходящегося течения и выгрузных отверстий.

По результатам проведенных экспериментов определялись величина и периодичность пульсаций давления, рассматривая процесс в координатах  $\sigma_r = f(N)$ , где  $N$  – количество перегруженных шаров.

Визуальная оценка процессов изменения нагрузок на датчиках позволяет предположить наличие монотонной возрастающей (тренда) с наложением на него пульсирующей составляющей. Исходя из этого, трендовая составляющая процесса аппроксимировалась полиномом второй степени, а пульсации – рядом Фурье.

Для проведения последующего гармонического анализа колебательного процесса [10] из экспериментально определенных величин давлений вычитается трендовая составляющая и затем выровненный таким образом динамический ряд с помощью преобразования Фурье представляется суммой гармоник, определяющих закономерности развития исследуемого процесса. Задача сводится к аппроксимации процесса изменения давления при перегрузке конечным рядом Фурье (9):

$$\sigma_r^*(N) = A_0 + \sum_{k=1}^n (A_k \cos W_k n + B_k \sin W_k n), \quad (9)$$

где  $\sigma_r^*$  – горизонтальное давление за вычетом тренда, кгс/см<sup>2</sup>;  $n$  – текущее число перегруженных шаров;  $A_0, A_k, B_k$  – коэффициенты Фурье, причем  $A_0 = 0$ ;  $W_k = \frac{2\pi}{T}$  угловая частота повторения;  $\frac{1}{T}$  – основанная частота процесса, соответствующая периоду, равному длине записи;  $T$  – период, берется равным общему количеству перегруженных шаров  $\approx 800\,000$ .

Таким образом, функция  $\sigma_r^*(N)$  составлена из суммы синусоидальных и косинусоидальных функций, частоты которых кратны основной частоте –  $1/T$ . Расчеты показали, что вторые и третьи гармоники объясняют  $\approx 80\%$  дисперсии процесса. Наиболее важной является вторая гармоника. Процесс изменения нагрузки на датчиках является циклическим и может быть описан периодическими функциями, дважды повторяющимися за период  $T$ . Зависимости амплитуд от глубины расположения датчиков носят практически линейный характер: с ростом глубины амплитуды увеличиваются. Теоретические амплитуды являются сравнимыми с визуально оцениваемыми размахами колебаний реального процесса.

При модельных испытаниях проводились также определения бокового давления при внедрении 55 погружных стержней КС-А3 диаметром  $2d_{ш}$  на глубину  $33d_{ш}$ . Установлено что  $\sigma_{z(cp)}$  увеличивается до  $0,3-0,5$  кгс/см<sup>2</sup>. Однако по данным [6] ввод 42 стержней на глубину  $58d_{ш}$  приводит к значительно большему росту бокового давления на этой глубине – до  $1,75$  кгс/см<sup>2</sup>. Установлено также, что при извлечении стержней давление восстанавливается, приходя к значениям до начала внедрения.

Переходя к вопросу использования полученной информации о распределении давления по высоте бункера, необходимо отметить, что измерение давления проводилось на площадках размером  $3,5d_{ш} \times 5d_{ш}$ , воспринимающих интегральную нагрузку от группы шаров, не дающую информации о нагрузке от каждого отдельного шара. Однако определять контактное давление, необходимое для оценки износоустойчивости графитовой кладки реактора, можно с использованием экспериментально установленных данных, что с площадками таких размеров в среднем контактирует 18 шаров из 25 теоретически возможных.

## Заключение

1. Давление шаровой засыпки на боковой отрагатель в реакторах с  $H/D \leq 1$  с увеличением глубины монотонно возрастает, достигая в стационарном положении значений  $0,07-0,23$  кгс/см<sup>2</sup> в зависимости от величины коэффициентов трения и диаметра а.з. В состоянии рециркуляции шаровой засыпки трендовая составляющая давления увели-

- чивается более чем в два раза, достигая максимальных значений  $0,2-0,3 \text{ кгс/см}^2$  на глубине  $3,0-3,5 \text{ м}$  ( $50-60d_{ш}$ ) с наложением пульсирующей составляющей, превышающей в отдельные моменты средние значения не более, чем 1,45 раза.
2. Давление шаровой засыпки в модульных реакторах с  $H/D > 1$  (типа ВГМ с  $H/D = 3$ ) возрастает до  $0,45-0,75 \text{ кгс/см}^2$  на глубине  $8,85 \text{ м}$  ( $147d_{ш}$ ) в зависимости от величины коэффициентов трения.
  3. Сравнения рассчитанных на натурные условия величин бокового давления с известными опубликованными данными по порядку величин удовлетворительно согласуется. В частности, расхождения полученных данных по реактору ВГ-400 и опубликованных по реактору ТНТР-300 составляют от 3 до 9 % с учетом неопределенностей по принятым в расчетах коэффициентам трения.
  4. Анализ результатов проведенных экспериментов и имеющейся априорной информации позволяет утверждать, что в стационарном положении засыпки твэл давление ее на отражатели можно оценивать по формулам (2), (8). Оценку давления в состоянии рециркуляции твэл целесообразно проводить по формулам 4) и (7), а также по (8). При наличии экспериментальных данных на моделях активной зоны оценку давления следует проводить с использованием формул (5 и 6).

### Библиографический список

1. **Зенков, Р.Л.** Бункерные устройства / Р.Л. Зенков, Г.П. Гриневич, В.С. Исаев. – М.: Машиностроение, 1977, – 225 с.
2. **Фиалков, Б.Ш.** Кинетика движения кокса в доменной печи / Б.Ш. Фиалков, В.Г. Плицин. – М.: Metallurgia, 1971, – 228 с.
3. **Лукьянов, П.И.** Давление компактного движущегося слоя зернистого материала на стенки аппарата шахтного типа / П.И. Лукьянов и [др.] // Химия и технология топлива. – 1959. – №1. – С. 63-68.
4. **Тлеугабулов, С.М.** Давление столба шихты в доменной печи / С.М. Тлеугабулов, Л.Г. Шумаков, Б.С. Фиалков. // Сталь. – 1965. – №11. – С. 969-973.
5. **Кропотов, В.К.** К вопросу о давлении шихты в доменной печи // Сталь. – 1965. – №11. – С. 973-977.
6. Физико-механические исследования и расчеты конструкций оборудования атомных энергетических установок. – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1975, – 340 с.
7. **Гячев, Л.В.** Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах / Л.В. Гячев. – М.: Машиностроение, 1968, – 184 с.
8. **Алферов, К.В.** Бункерные установки. Проектирование, расчет, эксплуатация / К.В. Алферов, Р.П. Зенков. – М.: Машгиз, 1955, – 308 с.
9. **Квапил, Р.** Движение сыпучих материалов в бункерах / Р. Квапил. – М.: Госгортехиздат, 1961, – 80 с.
10. **Вайну, А.Я.** Корреляция рядов динамики / А.Я. Вайну. – М.: Статистика, 1977.

*Дата поступления  
в редакцию: 19.04.2019*

---

V.M. Mordvintsev, N.G. Kodochigov, Yu.P. Sukharev

**RESEARCH OF FUEL PEBBEL BED PRESSURE ON BLOCKS OF GRAPHITE  
REFLECTORS IN ACTIVE CORES  
OF HIGH-TEMPERATURE GAS COOLED REACTORS**

Afrikantov OKB Mechanical Engineering

**Purpose:** The purpose of the lead researches was working off of methodology of an estimation of fuel elements pebble bed pressure on reflectors of HTGRs active core, and also forecasting on its basis of pressure in existing gas cooled reactor designs.

**Methodology approach:** The experimentally-calculated method of definition of moving spherical elements pebble bed force influence on blocks of HTGR side reflector, based on physical modelling with use of principles of the theory of similarity is stated.

**Results:** Great volume of experimental data-settlement on modelling and definition of lateral pressure of spherical pebble bed in HTGRs active cores is received.

**Conclusions:** The analysis of the received data and their approximation have allowed to define analytical dependences of pressure of pebble bed on a side reflector which can be used in design calculations of reactors. Comparison of the received results with data of foreign researches is lead.

*Key words:* mechanics of pebble bed, power interaction spherical pebble bed, develop of methodology of an estimation of pebble bed pressure on blocks of reflector, the formulae for an estimation of pressure, distribution of pressure through the bunker height.

УДК 621.039.5

А.Е. Помысухина, Ю.П. Сухарев, Г.Н. Власичев

## РЕАКТОР НА ОСНОВЕ ВОЛНЫ ЯДЕРНОГО ГОРЕНИЯ В U-Th ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена модель реактора на бегущей волне в торий-урановом топливном цикле. Оценена область формирования и существования волны ядерного горения для реактора с тепловым и быстрым спектром нейтронов. Разработана модель изменения ядерных концентраций в зависимости от обобщенного флюенса. Проведена графическая обработка данных расчетов для наглядной демонстрации полученных результатов. Для каждого спектра нейтронов рассчитана скорость волны ядерного горения. Полученные параметры сравниваются с аналогичными параметрами для уран-плутониевого реактора на бегущей волне.

*Ключевые слова:* реактор на бегущей волне, скорость волны ядерного горения, ядерная концентрация нуклидов, безразмерный флюенс.

### Введение

В 1993 г. Л.П. Феоктистовым был изложен новый ряд требований, предъявляемых к безопасности реактора [1]. Их главной характеристикой должен служить принцип «внутренней безопасности», в соответствии с которым отказ либо появление наведенной радиоактивности предотвращаются автоматически благодаря тем принципам, которые лежат в основе физики реактора [2]. Моделью, удовлетворяющей вышеописанным принципам внутренней безопасности и саморегулирования, является реактор на бегущей волне деления (РБВ). Впервые идея о РБВ, где происходит одновременно горение топлива и наработка делящегося нуклида, была выдвинута в 1958 г. С.М. Фейнбергом [3], условием работы являлось перемещение топлива в активной зоне. Позднее, в 1989 г., Л.П. Феоктистовым в работе [2] была представлена концепция реактора на бегущей волне, в котором движение топлива заменялось движением зоны горения, т.е. деление топлива происходит лишь в локальной области активной зоны и со временем перемещается с одного торца к другому. При таком движении наблюдается особый профиль нейтронного потока, который имеет пикообразный максимум по координате, соответствующий зоне горения и перемещающийся со временем по активной зоне.

Основной принцип работы РБВ отражен на рис. 1. Цилиндр состоит из свежего топлива (U-238, Th-232, с одного торца он облучается внешним источником нейтронов с определенным энергетическим спектром.

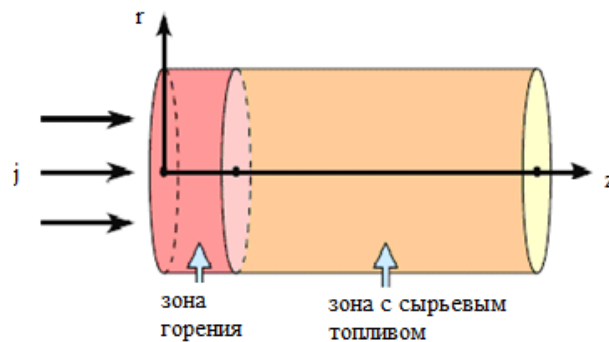
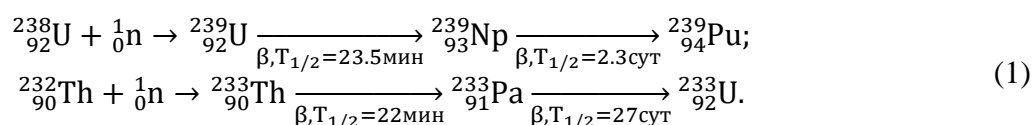


Рис. 1. Иллюстрация работы РБВ

В прилегающем слое свежее топливо поглощает нейтроны и по известным цепочкам трансмутирует в новый нуклид (уран-233 или плутоний-239) (1):



Данная стадия называется наработкой делящегося нуклида. В течение некоторого периода времени происходит накопление делящегося нуклида до критического значения, после чего запускается процесс самоподдерживающейся цепной реакции деления. Новые нейтроны, появившиеся в результате деления наработанного нуклида, будут аналогично захватываться в прилегающем слое, производя накопление делящегося материала, и т.д. Таким образом, нейтронно-делительная волна распространяется через всю активную зону.

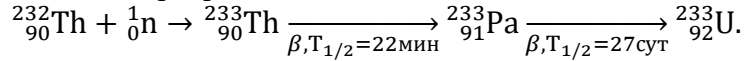
В настоящей работе рассматривается реактор на бегущей волне деления с ториевым топливом. Возможная перспектива использования тория в качестве энергоносителя уже была изучена во многих работах. Например, в работе [4] был рассмотрен реактор на волне ядерного горения при наличии невыгорающего поглотителя нейтронов. Регулирование мощности в данной модели реактора осуществляется за счет изменения скорости волны ядерного горения, которая в свою очередь зависит от концентрации поглотителя. Авторами еще одной работы была предложена концепция выгорания, применяемая к маломощным высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам [5]. Настоящее исследование демонстрирует многообещающие характеристики ториевого реактора в сравнении с урановым: глубина выгорания ториевого топлива примерно на 36-45 % выше, что повышает эффективность ториевого реактора. В следующем исследовании [6] речь идет о реакторе с насыпной активной зоной, в котором топливо загружается с одной стороны (сверху) и выгружается с другой стороны (снизу). В отличие от вышеупомянутой концепции, в данном типе реактора движение нейтронного потока замещается движением топлива. Очевидно, что эти два вида движений эквивалентны. Выбранное топливо должно иметь два условия для существования волны горения: свежее топливо должно быть подкритическим, т.е., коэффициент размножения в бесконечной среде должен быть меньше единицы при нулевом флюенсе, а с увеличением флюенса нейтронов  $k_{\infty}$  сначала должно увеличиваться до надкритического диапазона, а затем снова уменьшаться до докритического. Технически это может быть реализовано путем добавления отравляющих нуклидов к топливу высокотемпературного газоохлаждаемого реактора. Авторами исследования рассматривается краевая задача диффузионного уравнения, связанная с упрощенными уравнениями выгорания. Аналитическое решение, полученное в этой статье, может быть использовано для оптимизации выгорания.

В недавно опубликованной работе дано описание концепции реактора, работающего на основе волны, обусловленной процессами бридинга и выгорания, а также движением топлива в противоположном направлении, т.е. суперпозиции классической волны ядерного горения и «стоячей» волны, когда в реакторе перемещается топливо [7]. Этот проект спонсируется Биллом Гейцем, разрабатывается в США с 2006 г., в нем участвуют около 50 организаций, планирующих, что разрабатываемый ими реактор будет запущен в 2026 г.

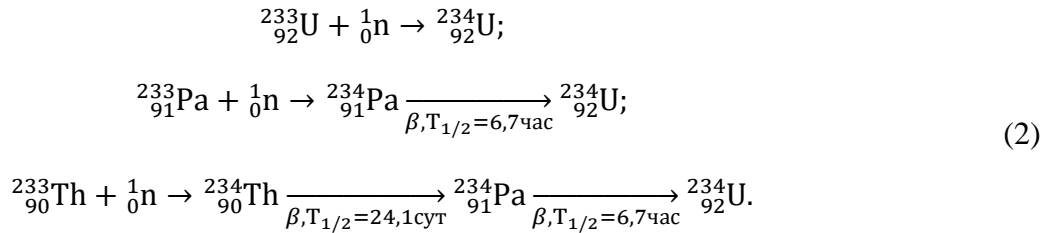
В настоящей работе рассмотрены два варианта работы реактора с различным типом спектра нейтронов: на быстрых и тепловых нейтронах. Описание и сравнение ядерных концентраций основных элементов ядерной цепочки превращения (Th232, U233, U234) и нейтронных потоков производилось на основе расчета уравнений выгорания. Также для каждого типа реактора оценена область и условия существования нейтронно-делительной волны. На основе полученных результатов проводилось сравнение глубины выгорания и скорости распространения волны горения в Th-U и U-Pu реакторах.

### Математическая модель

Рассматривается математическая модель реактора на бегущей волне деления. Активная зона представляет собой цилиндр из чистого сырьевого материала Th-232, окруженный отражателем. С одного торца цилиндр облучают внешним источником нейтронов. В приповерхностном слое цилиндра (зоне горения) сырьевой материал трансмутирует в делящийся в соответствии с ядерной цепочкой превращения:



В данном цикле, помимо урана-233, нарабатывается еще делящийся изотоп уран-234 путем радиационного захвата нейтрона как ураном-233, так и промежуточными нуклидами протактинием-233 и торием-233 (2).



В тот момент, когда концентрация делящегося нуклида U-233 становится критической, т. е., процесс деления превышает процесс накопления, зона горения становится запальной зоной. Новые нейтроны, появившиеся в процессе деления, вызывают выгорание в следующем слое. Переход выгорания от одного слоя топлива к другому образует волну горения.

Уравнения выгорания в рассматриваемых цепочках ядерных превращений имеют вид:

$$\begin{aligned} & \frac{dN^{\text{Th}232}(x, t)}{dt} = -\sigma_a^{\text{Th}232} N^{\text{Th}232}(x, t) \varphi(x, t); \\ & \frac{dN^{\text{Th}233}(x, t)}{dt} = \sigma_c^{\text{Th}232} N^{\text{Th}232}(x, t) \varphi(x, t) - \sigma_a^{\text{Th}233} N^{\text{Th}233}(x, t) \varphi(x, t) - \lambda N^{\text{Th}233}(x, t); \\ & \frac{dN^{\text{U}233}(x, t)}{dt} = \lambda N^{\text{Pa}233}(x, t) - \sigma_a^{\text{U}233} N^{\text{U}233}(x, t) \varphi(x, t); \\ & \frac{dN^{\text{U}234}(x, t)}{dt} = \sigma_c^{\text{U}233} N^{\text{U}233}(x, t) \varphi(x, t) + \lambda N^{\text{Pa}234}(x, t) - \sigma_a^{\text{U}234} N^{\text{U}234}(x, t) \varphi(x, t); \\ & \frac{dN^{\text{Pa}233}(x, t)}{dt} = \lambda N^{\text{Th}233}(x, t) - \sigma_a^{\text{Pa}233} N^{\text{Pa}233}(x, t) \varphi(x, t) - \lambda N^{\text{Pa}233}(x, t); \\ & \frac{dN^{\text{Pa}234}(x, t)}{dt} = \sigma_c^{\text{Pa}233} N^{\text{Pa}233}(x, t) \varphi(x, t) + \lambda N^{\text{Th}234}(x, t) - \\ & \quad - \lambda N^{\text{Pa}234}(x, t) - \sigma_a^{\text{Pa}234} N^{\text{Pa}234}(x, t) \varphi(x, t); \\ & \frac{dN^{\text{Th}234}(x, t)}{dt} = \sigma_c^{\text{Th}233} N^{\text{Th}233}(x, t) \varphi(x, t) - \sigma_a^{\text{Th}234} N^{\text{Th}234}(x, t) \varphi(x, t) - \lambda N^{\text{Th}234}(x, t); \\ & \frac{dN^{\text{FP}}(x, t)}{dt} = \sigma_f^{\text{U}233} N^{\text{U}233}(x, t) \varphi(x, t) + \sigma_f^{\text{U}234} N^{\text{U}234}(x, t) \varphi(x, t) - \sigma_a^{\text{FP}} N^{\text{FP}}(x, t) \varphi(x, t), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $N^{\text{Th}232}$ ,  $N^{\text{Th}233}$ ,  $N^{\text{Th}234}$  – концентрации тория-232, тория-233 и тория-234 соответственно;  $N^{\text{Pa}233}$ ,  $N^{\text{Pa}234}$  – концентрации протактиния-233 и протактиния-234;  $N^{\text{U}233}$ ,  $N^{\text{U}234}$ ,  $N^{\text{FP}}$  – концентрации урана-233, урана-234 и продуктов деления;  $x$  – координата по длине активной зоны;  $t$  – время;  $\varphi$  – нейтронный поток;  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада;  $\sigma_a$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_c$  – микроскопические сечения поглощения, деления и радиационного захвата.

Для замыкания системы уравнений выгорания к ним требуется добавить уравнение диффузии, которое имеет вид (4):

$$D(x)\Delta\varphi(x, t) + (v \sum_j \Sigma_f^j(x, t) - \sum_i \Sigma_a^i(x, t))\varphi = \frac{1}{v} \frac{\partial\varphi(x, t)}{\partial t}, \quad (4)$$

где  $v$  – число вторичных нейтронов, испускаемых при делении;  $\Sigma_f$  – макроскопическое сечение деления;  $\Sigma_a$  – макроскопическое сечение поглощения;  $v$  – скорость нейтронов;  $D$  – коэффициент диффузии.

На данном этапе необходимо сделать ряд допущений. Во-первых, при определении концентрации урана-233 пренебрегаем промежуточными нуклидами торием-233 и протактинием-233, так как их время жизни малы по сравнению с длительностью кампании реактора. Поэтому будем считать, что уран-233 появляется непосредственно после захвата нейтрона торием-232. При определении концентрации урана-234 по вышеупомянутой причине пренебрегаем его накоплением путем радиационного захвата нейтронов промежуточными изотопами, поэтому оно будет происходить при радиационном захвате нейтронов в уране-233. Кроме того, в уравнении для концентрации осколков деления опускается слагаемое, связанное с делением U-234, так как его сечение деления во всех областях энергий во много раз меньше сечения деления U-233.

При этом система уравнений выгорания (1) сведется к следующей системе (5):

$$\begin{aligned} \frac{dN^{\text{Th}232}(x, t)}{dt} &= -\sigma_a^{\text{Th}232} N^{\text{Th}232}(x, t)\varphi(x, t); \\ \frac{dN^{\text{U}233}(x, t)}{dt} &= \sigma_c^{\text{Th}232} N^{\text{Th}232}(x, t)\varphi(x, t) - \sigma_a^{\text{U}233} N^{\text{U}233}(x, t)\varphi(x, t); \\ \frac{dN^{\text{U}234}(x, t)}{dt} &= \sigma_c^{\text{U}233} N^{\text{U}233}(x, t)\varphi(x, t) - \sigma_a^{\text{U}234} N^{\text{U}234}(x, t)\varphi(x, t); \\ \frac{dN^{\text{FP}}(x, t)}{dt} &= \sigma_f^{\text{U}233} N^{\text{U}233}(x, t)\varphi(x, t) - \sigma_a^{\text{FP}} N^{\text{FP}}(x, t)\varphi(x, t). \end{aligned} \quad (5)$$

Решение уравнения (3) представляется в виде волны путем замены переменных безразмерной волновой координатой  $z = \frac{x+ut}{L_0}$ , где  $u$  – скорость волны,  $L_0$  – длина диффузии в начальный момент выгорания.

На следующем этапе расчета необходим переход к безразмерным переменным ( $N^i \rightarrow \frac{N^i}{N^{\text{Th}232}(0)}$ ,  $\sigma \rightarrow \frac{\sigma_j^i}{\sigma_a^{\text{Th}232}}$ ). Тогда система (3) примет вид (6):

$$\begin{aligned} \frac{dc^{\text{Th}232}(z)}{dz} &= -c^{\text{Th}232}(z)\varphi(z); \\ \frac{dc^{\text{U}233}(z)}{dz} &= -\gamma c^{\text{U}233}(z)\varphi(z) + c^{\text{Th}232}(z)\varphi(z); \\ \frac{dc^{\text{U}234}(z)}{dz} &= (\gamma - b)c^{\text{U}233}(z)\varphi(z) - ac^{\text{U}234}(z)\varphi(z); \\ \frac{dc^{\text{FP}}(z)}{dz} &= bc^{\text{U}233}(z)\varphi(z) - mc^{\text{FP}}(z)\varphi(z), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $c^{\text{Th}232} = \frac{N^{\text{Th}232}}{N^{\text{Th}232}(0)}$ ;  $c^{\text{U}233} = \frac{N^{\text{U}233}}{N^{\text{Th}232}(0)}$ ;  $c^{\text{U}234} = \frac{N^{\text{U}234}}{N^{\text{Th}232}(0)}$ ;  $c^{\text{FP}} = \frac{N^{\text{FP}}}{N^{\text{Th}232}(0)}$ ;  $\gamma = \frac{\sigma_a^{\text{U}233}}{\sigma_a^{\text{Th}232}}$ ;  
 $a = \frac{\sigma_a^{\text{U}234}}{\sigma_a^{\text{Th}232}}$ ;  $m = \frac{\sigma_a^{\text{FP}}}{\sigma_a^{\text{Th}232}}$ ;  $b = \frac{\sigma_f^{\text{U}233}}{\sigma_a^{\text{Th}232}}$ .

В табл. 1 представлены микроскопические сечения нуклидов, входящих в уравнения выгорания, для двух различных типов спектров [8].

Таблица 1

## Значения микросечений

	Тепловой спектр				Быстрый спектр			
	Th-232	U-233	U-234	FP	Th-232	U-233	U-234	FP
$\sigma_f$	0	468	0,407	0	0	2,4	0,04	0
$\sigma_c$	6,55	41,8	90,5	35,4	0,27	0,26	0,45	0,18
$\sigma_a$	6,55	509,8	90,907	35,4	0,27	2,66	0,49	0,18
$\nu$		2,49				2,5		

Введем для удобства дальнейшего анализа безразмерный обобщенный флюенс (7):

$$\Psi(z) = \int_0^z \varphi(z) dz. \quad (7)$$

Тогда решение системы (3) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} c^{\text{Th232}}(\Psi) &= e^{-\Psi}; \\ c^{\text{U233}}(\Psi) &= \frac{1}{\gamma - 1} (e^{-\Psi} - e^{-\gamma\Psi}); \\ c^{\text{U234}}(\Psi) &= \frac{\gamma - b}{\gamma - 1} \left( \frac{1}{a - 1} [e^{-\Psi} - e^{-a\Psi}] + \frac{1}{a - \gamma} [e^{-a\Psi} - e^{-\gamma\Psi}] \right); \\ c^{\text{FP}}(\Psi) &= \frac{b}{\gamma - 1} \left( \frac{1}{m - 1} [e^{-\Psi} - e^{-m\Psi}] - \frac{1}{m - \gamma} [e^{-\gamma\Psi} - e^{-m\Psi}] \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Нормированные микросечения представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Нормированные микросечения

	Тепловой спектр		Быстрый спектр	
	$\sigma_f$	$\sigma_a$	$\sigma_f$	$\sigma_a$
Th-232	0	1	0	1
U-233	$b = 71,450$	$\gamma = 77,832$	$b = 8,889$	$\gamma = 9,852$
U-234	0	$a = 13,879$	0	$a = 1,667$
FP	0	$m = 5,405$	0	$m = 0,667$

Изменение потока нейтронов в зависимости от обобщенного безразмерного флюенса описывается по формуле (9):

$$\varphi(\Psi) = \sqrt{-2M(\Psi)}, \quad (9)$$

$$\text{где } M(\Psi) = b_1(1 - e^{-\Psi}) + b_3 \frac{1 - e^{-\gamma\Psi}}{\gamma} + b_4 \frac{1 - e^{-a\Psi}}{a} + b_6 \frac{1 - e^{-m\Psi}}{m} + c\Psi;$$

$$b_1 = -\frac{\beta_3}{\gamma} + 1; \quad b_3 = -\frac{\beta_3}{\gamma}; \quad b_4 = 0; \quad b_6 = -\frac{\sigma_a^{\text{FP}}}{\sigma_a^{232}}; \quad \beta_3 = \frac{\nu\sigma_f^{\text{U233}} - \sigma_a^{\text{U233}}}{\sigma_a^{232}}.$$

Поток нейтронов в реакторе с тепловым спектром (10):



$$\varphi(\psi) = \sqrt{-2(0,286\psi + 0,286e^{-\psi} + 0,017e^{-\gamma\psi} + e^{-m\psi} - 1,303)}. \quad (10)$$

Поток нейтронов в реакторе с быстрым спектром (11):

$$\varphi(\psi) = \sqrt{-2(0,256\psi + 0,256e^{-\psi} + 0,128e^{-\gamma\psi} + e^{-m\psi} - 1,384)}. \quad (11)$$

При всех известных концентрациях нуклидов находится коэффициент размножения в бесконечной среде, который является отношением числа генерируемых нейтронов к числу поглощенных (12):

$$K_{\infty} = \frac{\nu \sum_j \Sigma_j^f}{\sum_i \Sigma_i^a} = \frac{\nu b c^{U233}}{c^{Th232} + \gamma c^{U233} + a c^{U234} + m c^{FP}}. \quad (12)$$

Критический стационарный случай реактора соответствует значению  $K_{\infty} = 1$ . С учётом этого выражение для критической концентрации урана-233 можно выразить следующим образом (13):

$$c_{\text{крит}}^{U233} = \frac{c^{Th232} + a c^{U234} + m c^{FP}}{\nu b - \gamma}. \quad (13)$$

Для оценки величины скорости волны ядерного горения можно воспользоваться следующей формулой (14):

$$u = \frac{L}{T}, \quad (14)$$

где  $T$  – время существования волны горения,  $L$  – длина сердечника, состоящего из сырьевого материала Th-232, равная 300 см. Тогда время существования волны ядерного горения будет определяться формулой (15):

$$T = \frac{c_{\text{кр}}^{U233} \sigma_f^{U233} V \Psi_m c^{Th232}}{3,1 \cdot 10^{16} P_T \sigma_a^{232}}, \quad (15)$$

где  $V$  – объем активной зоны,  $\Psi_m$  – коэффициент, принятый равным значению 0,5,  $P_T$  – тепловая мощность реактора.

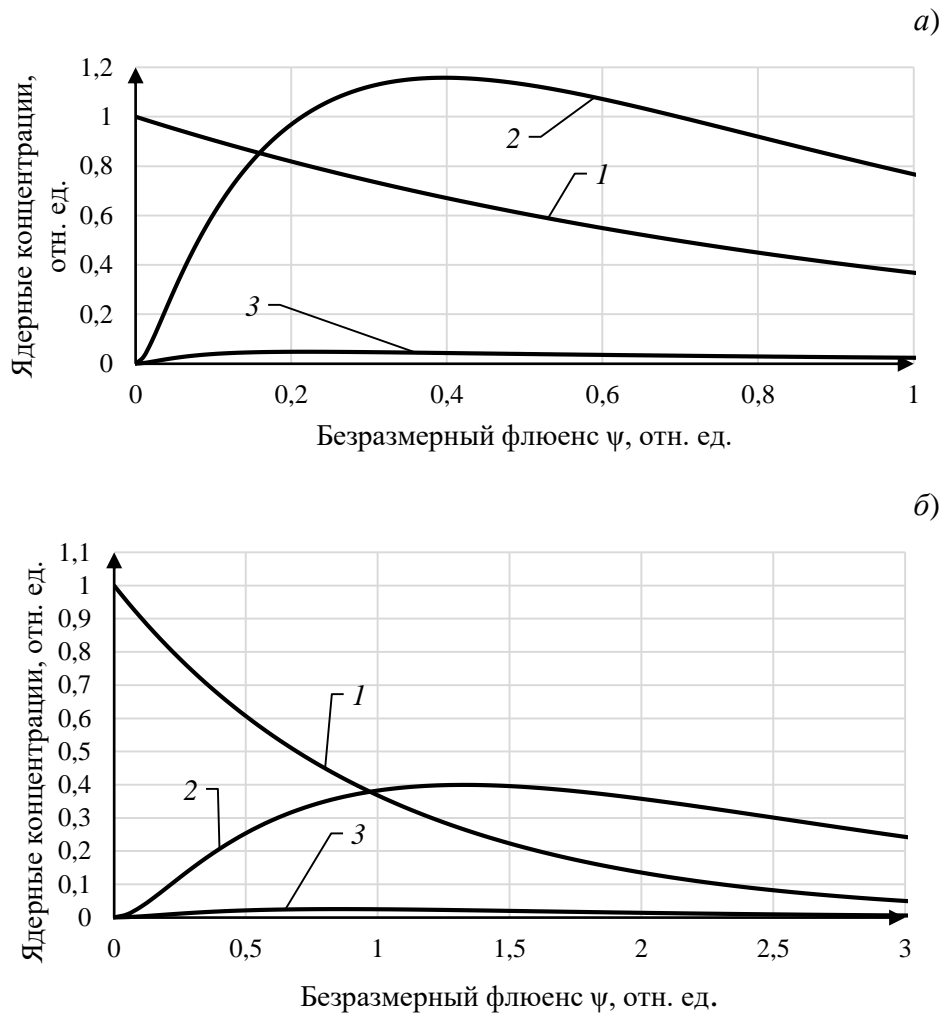
Время существования волны ядерного горения ( $T$ ) при тепловой мощности  $P_T = 793$  МВт будет равно 63 годам в реакторе с тепловым спектром нейтронов и 70 годам в реакторе с быстрым спектром нейтронов.

Скорость волны ядерного горения, рассчитанная по формуле (12), в реакторе с тепловым спектром равна 4,76 см/год. Скорость волны ядерного горения в реакторе с быстрым спектром равно 4,29 см/год.

В обоих типах реакторов полученные скорости имеют небольшое значение. В этом случае горение происходит с большим выгоранием, так как оно пропорционально времени нахождения волны в области горения.

### Результаты исследования

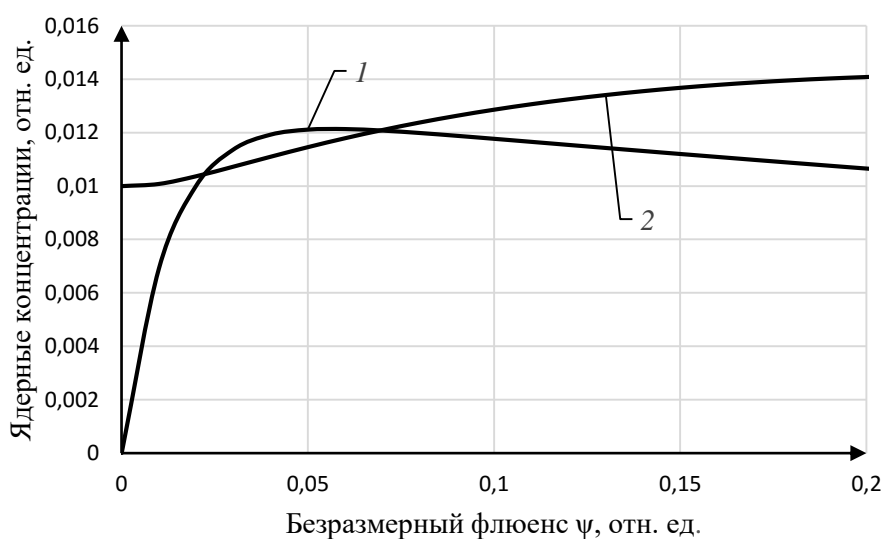
С помощью полученной системы формул (5) рассчитаны значения ядерных концентраций нуклидов при ряде значений обобщённого безразмерного флюенса в тепловом (рис. 2а) и быстром (рис. 2б) спектрах нейтронов.



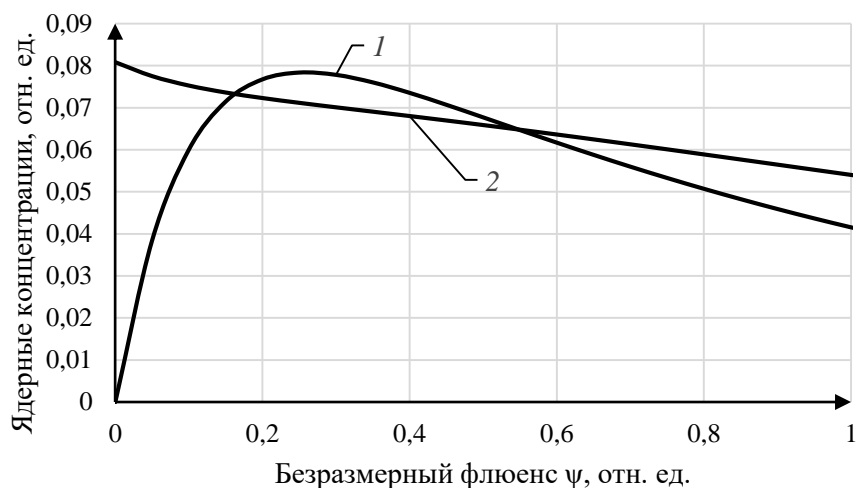
**Рис. 2. Ядерные концентрации тория-232 (1), продуктов деления (2) и урана-234 (3) в зависимости от флюенса в тепловом (а) и быстром (б) спектре нейтронов**

Из графиков видно, что исходная загрузка тория-232 со временем работы реактора уменьшается по экспоненциальному закону, в то время как концентрация продуктов деления возрастает до определенного максимума, характеризующего область интенсивного ядерного горения, после чего начинает спадать, что соответствует перемещению фронта волны в соседнюю область.

На рис. 3 проиллюстрирована аналитическая зависимость поведения концентрации урана-233 в сравнении с его критической концентрацией.



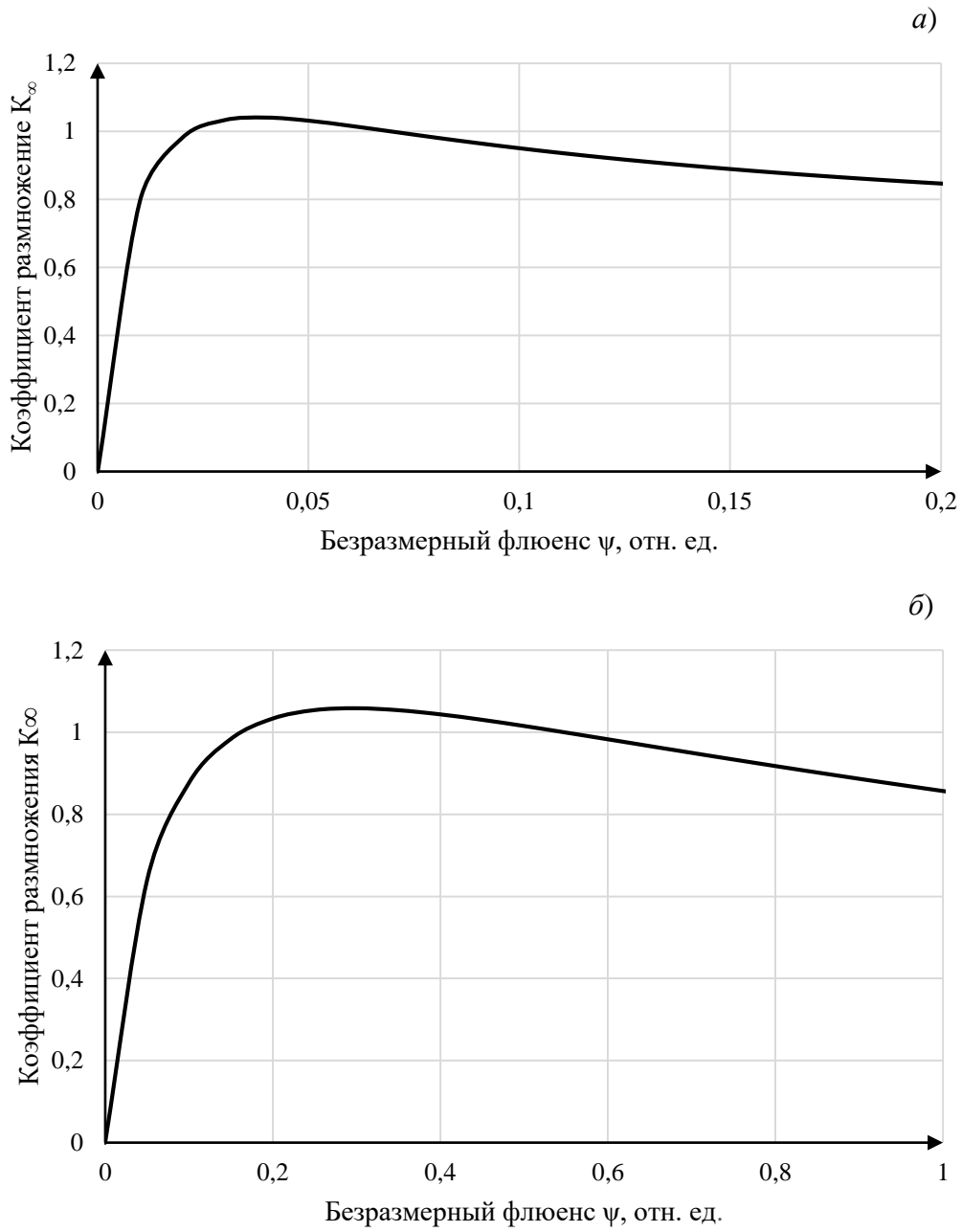
а)  
б)



**Рис. 3. Область существования волны горения в тепловом (а) и быстром (б) реакторе:**  
1 – ядерная концентрация урана-233, 2 – критическая концентрация урана-233

Видно, что существует определенная область, в которой концентрация нарабатываемого нуклида превышает критическое значение (происходит интенсивное горение). Описываемый процесс находится в интервале безразмерного флюенса в реакторе с тепловым спектром от 0,02 до 0,07, а в реакторе с быстрым спектром от 0,163 до 0,546.

В физике волнового процесса поведение коэффициента размножения определяет характер горения ядерного топлива. Из рис. 4 видно, что вначале коэффициент размножения возрастает вследствие накопления делящегося материала. В волновом процессе этому соответствует момент, когда хвост волны начинает входить в рассматриваемую область. Зона «выбега» коэффициента размножения из единицы совпадает с областью интенсивного горения топлива. Соответственно, в этот период ядерная волна горения полностью находится в данной области. Но так как концентрация продуктов деления со временем постоянно возрастает, коэффициент размножения начинает падать и уходит в подкритическое значение, чем определяется перемещение волны ядерного горения из рассматриваемой области в прилегающую зону.



**Рис. 4. Коэффициент размножения в реакторе с тепловым (а) и быстрым (б) спектром нейтронов**

Рассчитанные значения потока в зависимости от безразмерного флюенса представлены на рис. 5.

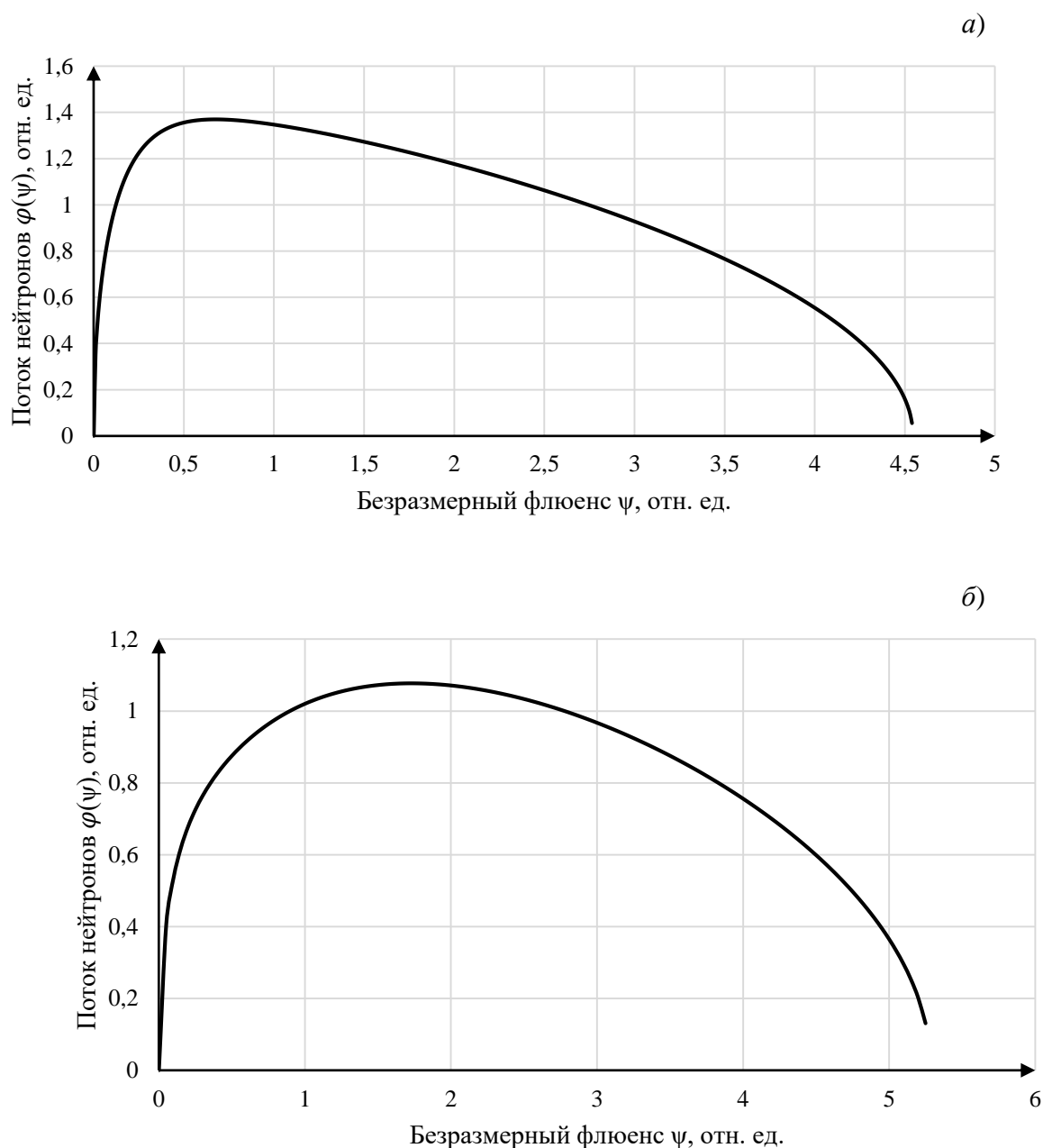
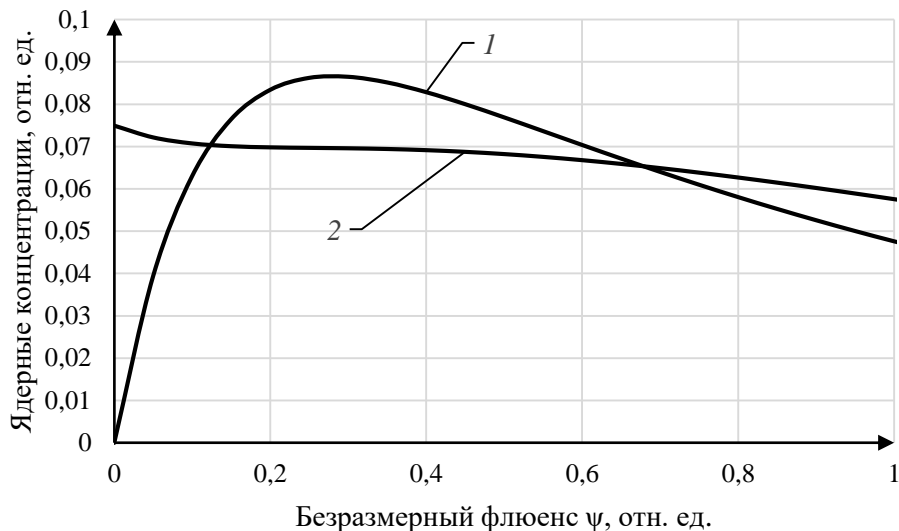


Рис. 5. Поток нейтронов в реакторе с тепловым (а) и быстрым (б) спектром нейтронов

Подобное распределение нейтронный поток будет иметь как для любой точки активной зоны в зависимости от координаты и времени работы реактора, так и для всей активной зоны в произвольный момент времени. В этом заключается особенность волновой симметрии задачи.

Для доказательства эффективности торий-уранового цикла приводим результаты расчета реактора на бегущей волне ядерного горения для U-Pu топливного цикла с быстрым спектром нейтронов [9]. На рис. 6 представлена зависимость концентрации плутония-239 в сравнении с его критической концентрацией. Видно, что область интенсивного горения находится в промежутке обобщенного флюенса от 0,124 до 0,678, примерно равная области существования волны в ториевом реакторе с быстрым спектром нейтронов.



**Рис. 6. Область существования волны горения:**

1 – ядерная концентрация плутония-239;  
2 – критическая концентрация плутония-239

Скорость волны ядерного горения в уран-плутониевом реакторе равна 11 см/год, что больше, чем в представленных выше торий-урановых реакторах. Это позволяет считать торий-урановый цикл более эффективным для реализации нейтронно-делительной волны, поскольку потребует меньших габаритных размеров зоны горения при одной и той же энерговыработке или позволит получить большее выгорание при одинаковых габаритах.

### Заключение

Представленные результаты позволили оценить возможность образования волнового процесса в торий-урановом реакторе. Условие, которому должен удовлетворять реактор, чтобы в нем могла существовать волна, заключается в превышении равновесной концентрации делящегося материала критического значения. Для реактора с тепловым спектром нейтронов область существования волны ядерного горения принадлежит промежутку безразмерного флюенса от 0,02 до 0,07, а в реакторе с быстрым спектром – от 0,163 до 0,546. Также получены значения скорости нейтронно-делительной волны: в реакторе с тепловым спектром равна 4,76 см/год, в реакторе с быстрым спектром равно 4,1 см/год. Торий-урановый реактор позволяет добиться горения с большим выгоранием, чем уран-плутониевый, что делает данный топливный цикл наиболее эффективным.

### Библиографический список

1. **Феоктистов, Л.П.** Безопасность – ключевой момент возрождения ядерной энергетики // Успехи физических наук. – 1993. – №8. – С. 89-102.
2. **Феоктистов, Л.П.** Нейтронно-делительная волна // Докл. Акад. наук СССР. – 1989. – С. 864-867.
3. **Feinberg, S.M.** Discussion content / S.M. Feinberg // Record of Proceedings Session B-10, Int. Conf. on the Peaceful uses for atomic energy. – 1958. – Т. 9. – №2. – С. 447.
4. **Павлович, В.Н.** Физические основы реактора на волне ядерного горения (РВЯГ). II. Конкретные модели / В. Н. Павлович, В. Н. Хотяинцев, Е. Н. Хотяинцева // Ядерная Физика та энергетика. – 2008. – №3(25). – С. 62-70.
5. Ismail Long Life small CANDLE-HTGRs with thorium / Ismail, Yasunori Ohoka, Peng Hong Liem, Hiroshi Sekimoto // Annal of Nuclear Energy. – 2007. – №34. – С. 120-129.
6. **Chen, Xue-Nong** Fundamental burn-up mode in a pebble-bed type reactor / Xue-Nong Chen, Edgar Kiefhaber, Werner Maschek // Progress in a Nuclear Energy. – 2008. – №50. – С. 219-224.

7. **Gilleland, John** The Traveling Wave Reactor: Design and Development / John Gilleland, Robert Petroski, Kevan Weaver // Engineering. – 2016. – №2. – С. 88-96.
8. Групповые константы для расчета реакторов и защиты / Л. П. Абагян [и др.]; под ред. М. Н. Николаева. – М.: Энергоиздат, 1981, – 231 с.
9. **Петрова, К.Г.** Нейтронно-физическое обоснование концепции быстрого реактора типа «бегущей делительной волны» / К.Г. Петрова: магистерская диссертация. – Н. Новгород.: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2013.

*Дата поступления  
в редакцию: 19.04.2019*

**A.E. Pomysukhina, Yu.P. Sukharev, G.N. Vlasichev**

## **NUCLEAR BURNING WAVE REACTOR IN U-Th FUEL CYCLE**

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

**Purpose:** The article presents the results of investigation a possibility of creating wave process in two variants of U-Th reactor: with fast and thermal spectra.

**Methodology:** The main investigation method is the analysis of the accessible sources of information related to the scope of the study: articles, conferences proceedings, reports.

**Results:** The traveling wave reactor model with U-Th fuel cycle is examined. The areas of formation and existence of nuclear burn-up wave are estimated for reactors with fast and thermal spectra. The model of nuclide density change in depending on generalized neutron fluence is developed. The nuclear burn-up wave velocity is calculated. The parameters obtained is compared with the same parameters for U-Pu traveling wave reactor.

**Findings:** The results of the analysis confirm the hypothesis of wave process existence in U-Th reactor. Also, the comparison between U-Th and U-Pu fuel cycles was made. According to the results of the comparison, U-Th fuel cycle proved to be more efficient since it would require smaller overall dimensions of reactor core at the same power generation or would allow for deeper burnout with the same dimensions.

*Key words:* traveling wave reactor, nuclear burn-up wave velocity, nuclide nuclear concentration, dimensionless fluence.

УДК 621.3

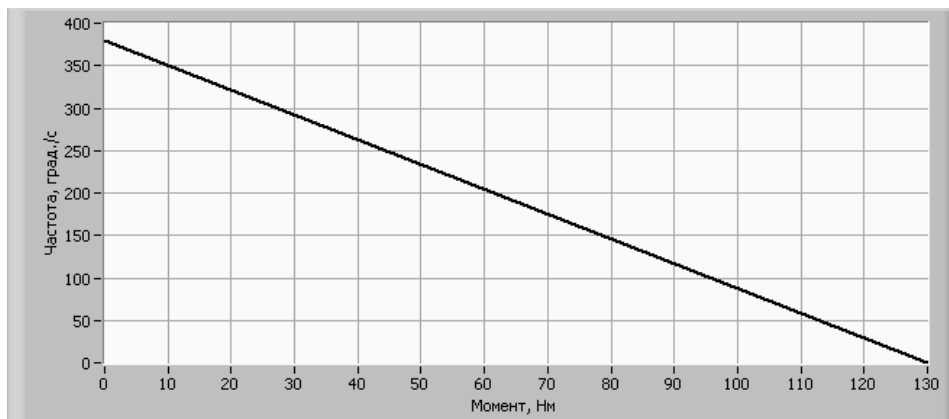
А.В. Улюшкин<sup>1</sup>, И.В. Трехонин<sup>2</sup>**МОДЕРНИЗАЦИЯ БЕСКОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>Арзамасский приборостроительный завод им. П.И. Пландина<sup>2</sup>

Обоснована актуальность модернизации бесконтактного электродвигателя; проведено моделирование его работы. Определена основная проблема работы электродвигателя: невозможность обеспечения требуемой нагрузочной характеристики в рамках классической конструкции. Рассмотрены варианты решения данной проблемы: применение редуктора с переменным коэффициентом передачи и применение электродвигателя с переменным коэффициентом ЭДС. Проведено моделирование редуктора с переменным коэффициентом передачи (различные варианты включения обмоток электродвигателя), по итогам которого был сделан выбор технического решения, удовлетворяющего предъявляемым требованиям.

*Ключевые слова:* вентильный электродвигатель, двигатель постоянного тока, привод летательного аппарата, моделирование, ANSYS Maxwell, ANSYS Maxwell Circuit Editor.

Современные летательные аппараты используют большое число различных исполнительных механизмов и систем, работа которых связана с затратами механической энергии. Приведение в действие и управление их движением обеспечивается приводом, который представляет собой механическую систему, состоящую из защитной аппаратуры, аппаратуры управления этим двигателем и передаточного устройства.

Представленные на отечественном рынке электродвигатели не способны обеспечить нагрузочную характеристику (рис. 1), удовлетворяющую современным требованиям к силовым агрегатам.



**Рис. 1. Нагрузочная характеристика привода**

Для управления приводами летательного аппарата используют различные электродвигатели. Они играют немаловажную роль в управлении летательным аппаратом. Поскольку для рулевых приводов требуются двигатели постоянного тока, возможны два варианта: коллекторные двигатели постоянного тока с возбуждением или вентильные двигатели (рис. 2).

Преимуществом коллекторных двигателей является их низкая цена, а преимущество вентильных заключается в том, что эксплуатация таких моторов освобождает сразу от таких проблем, как замена пружин, якоря, щеток, коллекторов. Поэтому наиболее перспективным вариантом в данном случае является использование бесконтактного синхронного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами (класс вентильных электродвигателей).



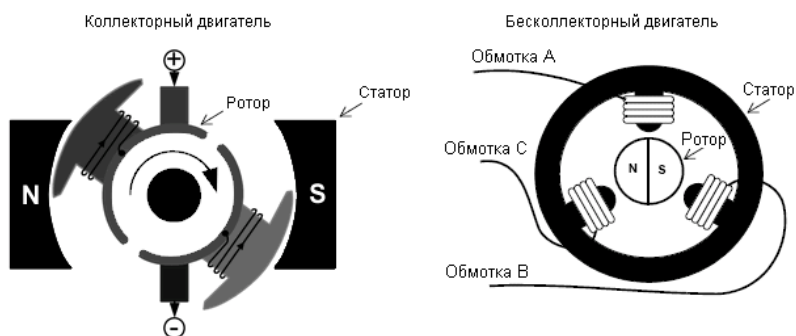


Рис. 2. Устройства коллекторного и бесколлекторного двигателей [2]

Двигателем, в большей мере отвечающим требованиям по габаритным размерам и мощностным характеристикам, является электродвигатель ДМБ. Внешний вид его представлен на рис. 3.

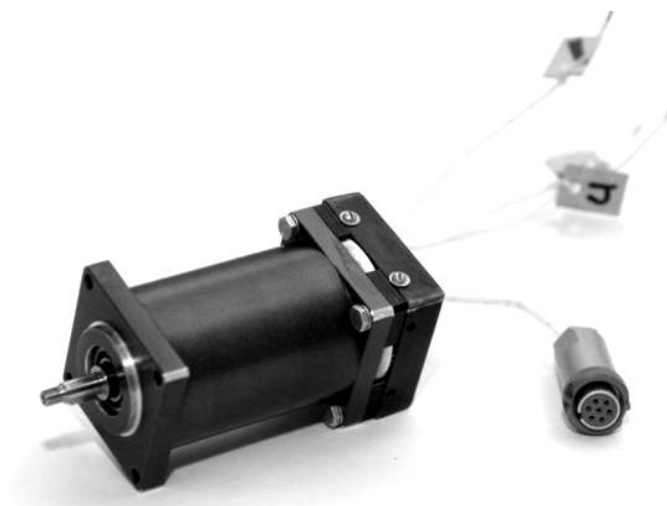


Рис. 3. ДМБ

Известно, что проектирование различных устройств, в том числе – электрических машин – значительно упрощается с помощью прикладных программ, позволяющих проводить моделирование физических процессов. Поэтому в качестве инструмента анализа и поиска необходимого решения поставленной задачи модернизации бесконтактного электродвигателя был принят *ANSYS Maxwell*.

С помощью моделирования проведена оценка работы модернизированного двигателя без изменений конструкции рабочего экземпляра. Создав модель электродвигателя, мы можем на основе его конструкции (рис. 4) анализировать направление магнитных полей внутри нее (рис. 5), а также наблюдать за их напряженностью (рис. 6). Полученная информация необходима для проведения дальнейших расчетов нагрузочной характеристики и других параметров электродвигателя.

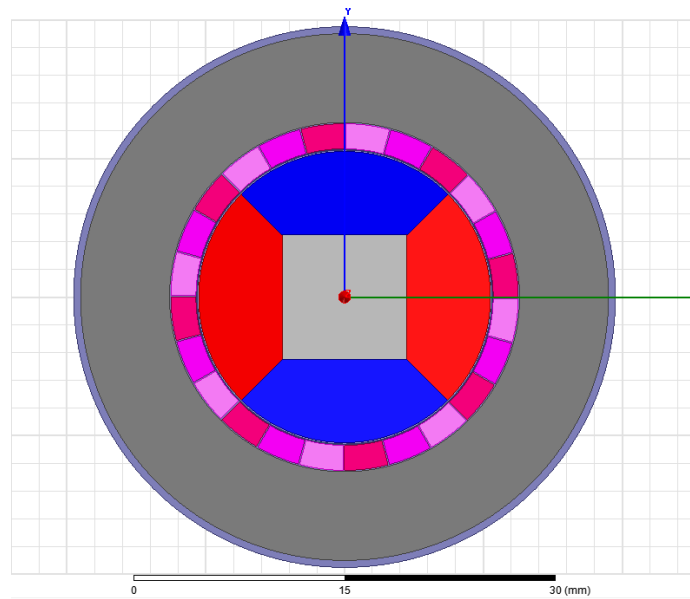


Рис. 4. Общий вид модели ДБМ в ANSYS Maxwell

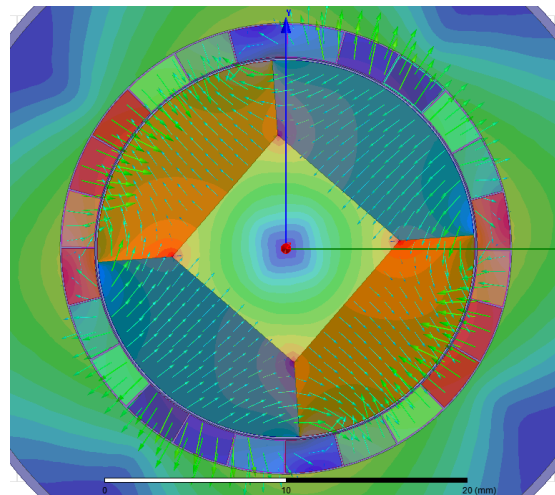


Рис. 5. Магнитные поля внутри ДБМ

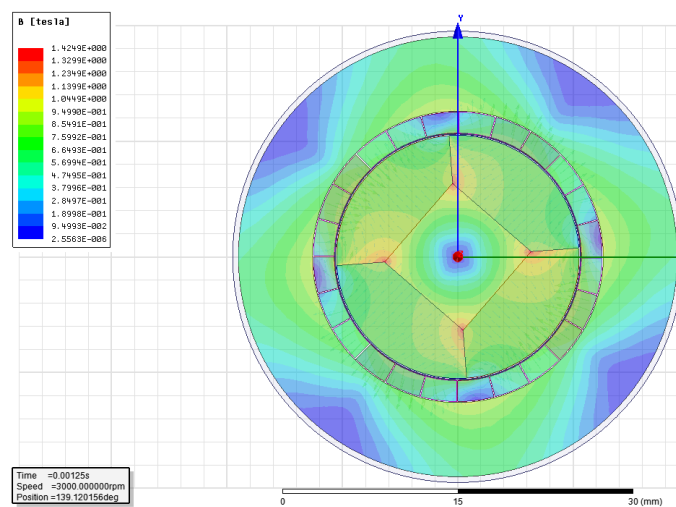
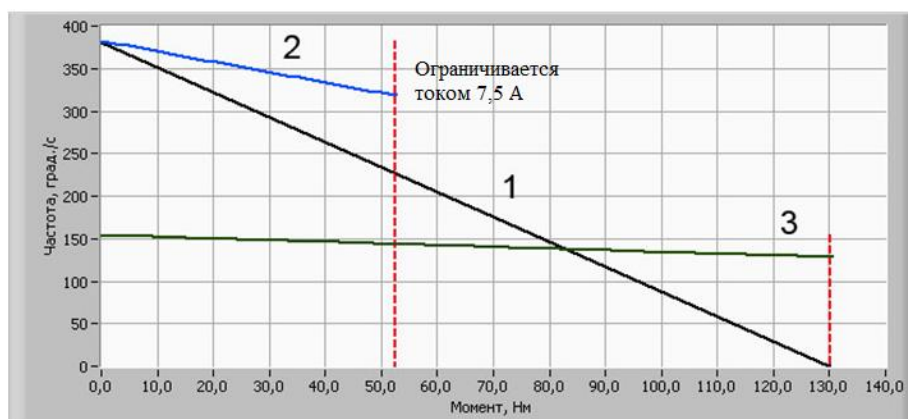


Рис. 6. Магнитные поля внутри ДБМ

В качестве примера на рис. 7 приведены механические характеристики рулевого привода, питающегося от источника питания напряжением 57 В и током 7,5 А с коэффициентом ЭДС электродвигателя  $k_E = 0,07$  и сопротивлением фазы  $R = 0,675$  Ом при передаточном отношении механической передачи  $i = 0,0082$  (график 2) и  $i = 0,0033$  (график 3).



**Рис. 7. Механические характеристики рулевого привода**

- 1 – требуемая нагрузочная характеристика,
- 2 – нагрузочная характеристика при питании  $U = 57$  В,  $I = 7,5$  А и передаточном отношении  $i = 0,0082$ ,
- 3 – нагрузочная характеристика при питании  $U = 57$  В,  $I = 7,5$  А и передаточном отношении  $i = 0,0033$

При передаточном отношении  $i = 0,0082$  ( $k = 122$ ) достигается угловая скорость 380 град/с, и момент рулевого привода 52,5 Нм (ограничиваемый током 7,5 А), тогда как требуется момент 130 Нм (рис. 7, график 2). При передаточном отношении  $i = 0,0033$  ( $k = 303$ ) достигаются максимальный момент 130 Нм и максимальная угловая скорость 153 град/с, тогда как требуется 380 град/с (рис. 7, график 3). Изменение коэффициента ЭДС электродвигателя влияет на механическую характеристику привода так же, как изменение передаточного отношения механической передачи.

Таким образом, изменение параметров рулевого привода АМРП-985С не позволяет, без изменения параметров системы управления, реализовать заданную механическую характеристику. Существует два пути решения данной проблемы (без изменения параметров источников электропитания):

- 1) применение редуктора с переменным коэффициентом передачи;
- 2) применение электродвигателя с переменным коэффициентом ЭДС.

Применение редуктора с переменным коэффициентом передачи фактически означает разработку автоматической коробки перемены передач. Это приводит к увеличению размера, веса, стоимости электропривода, что непозволительно в отношении к приводу АМРП-985С из-за его малых размеров. Помимо этого, подобная разработка потребует применения инновационной конструкции, не использовавшейся ранее, а также сложной технологии производства. В любом случае усложненная конструкция снижает надежность изделия. Коэффициент ЭДС электродвигателя зависит от конструкции электродвигателя (обмоток двигателя, видов их соединений, количества пар полюсов, материалов магнитов и др.) Для электродвигателя с фиксированным расположением обмоток коэффициент ЭДС – величина постоянная. Но, варьируя параметры обмоток, можно задавать коэффициент ЭДС электродвигателя.

Предлагаемый способ обеспечить электрическую двухскоростную трансмиссию состоит в использовании в обмотке статора двух обмоток на каждую фазу. Это позволит коммутировать их последовательно или параллельно, как показано на рис. 8.

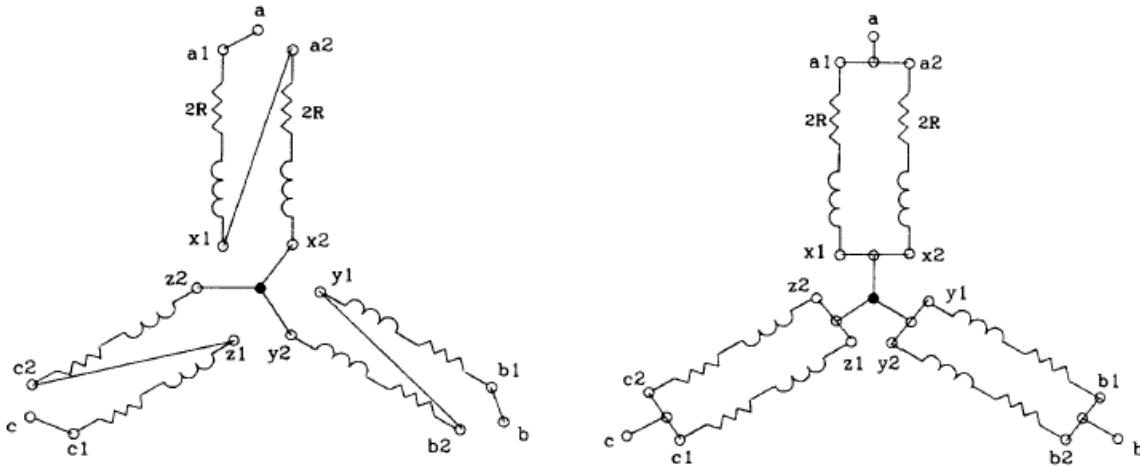


Рис. 8. Последовательное и параллельное соединение обмоток электродвигателя [6]

Другой способ коммутации обмоток – соединение в звезду или треугольник (рис. 9).

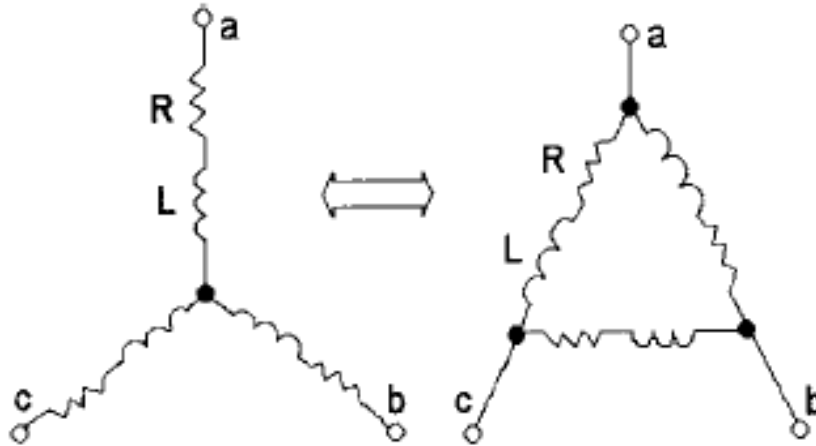
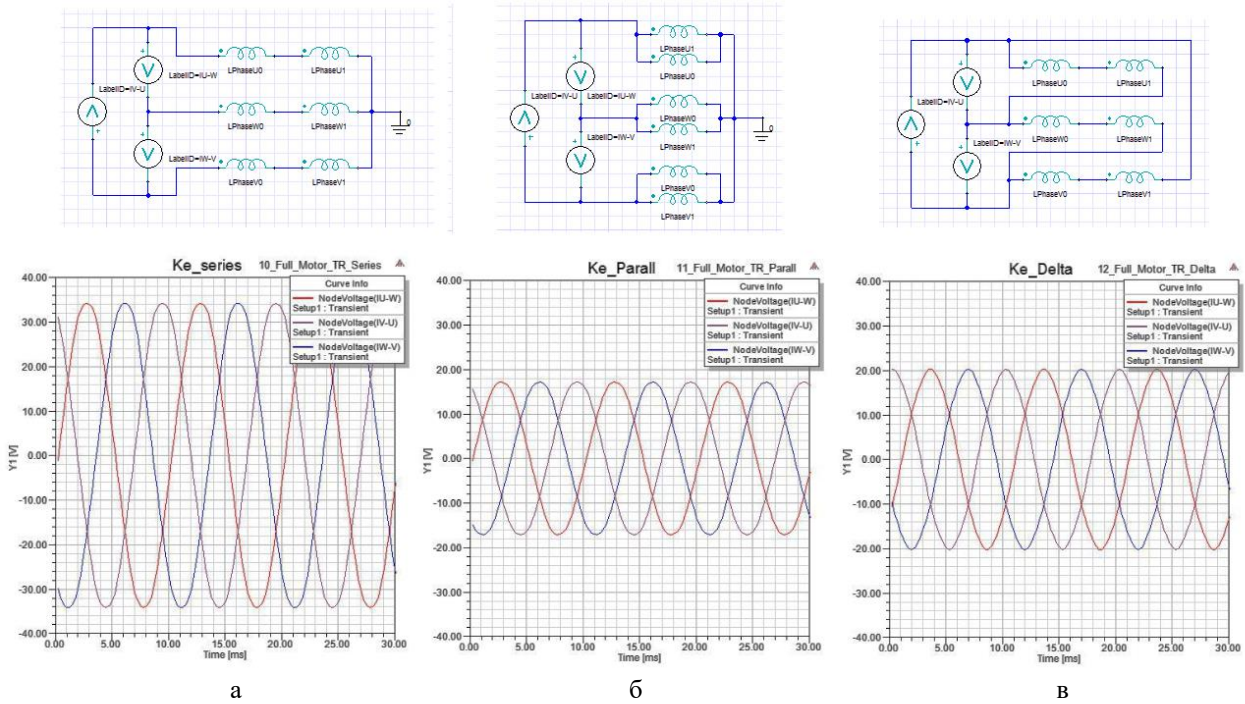


Рис. 9. Соединение обмоток двигателя звездой, треугольником [6]

Для моделирования параметров была создана приближенная модель электродвигателя ДБМ с использованием ПО *ANSYS Maxwell 2D*. В созданной модели представлены все три варианта соединения катушек электродвигателя [3]. Для соединения обмоток модели электродвигателя ДБМ последовательно, параллельно, треугольником использовалось программное обеспечение *ANSYS Maxwell Circuit Editor*, к зажимам обмоток подключались вольтметры. Вращение электродвигателя и моделирование напряжений на зажимах производилось в *ANSYS Maxwell 2D* [5]. Схемы соединения обмоток и результаты моделирования представлены на рис. 10. Скорость вращения электродвигателя – 3000 об/мин.

Таким образом, используя переключение обмоток, можно добиться большого крутящего момента на низких оборотах при последовательном включении и вдвое увеличить максимальную скорость при параллельном включении. Похожая зависимость наблюдается при переключении «звезда-треугольник».

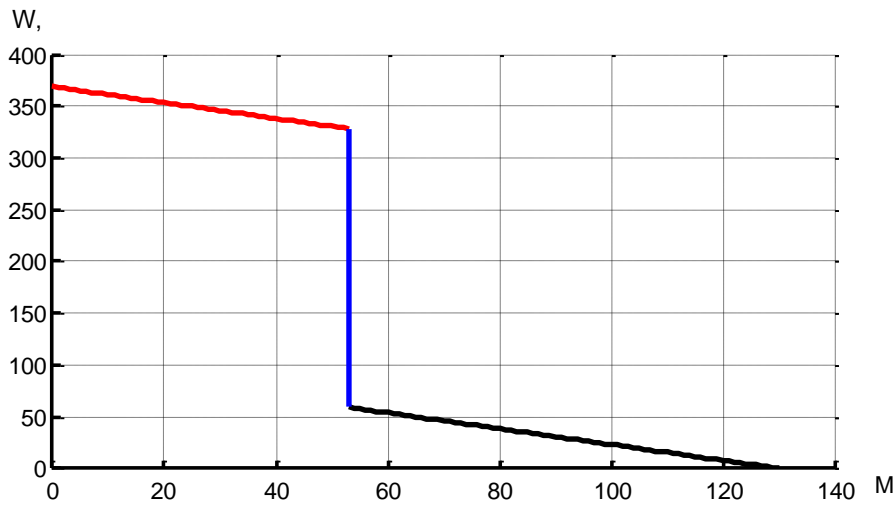
Возможны два варианта переключения схем соединения обмоток, с помощью которых можно выполнить требования ТЗ на нагрузочную характеристику рулевого привода: переключение с параллельного на последовательное соединение, переключение с схемы «треугольник» на последовательное соединение.



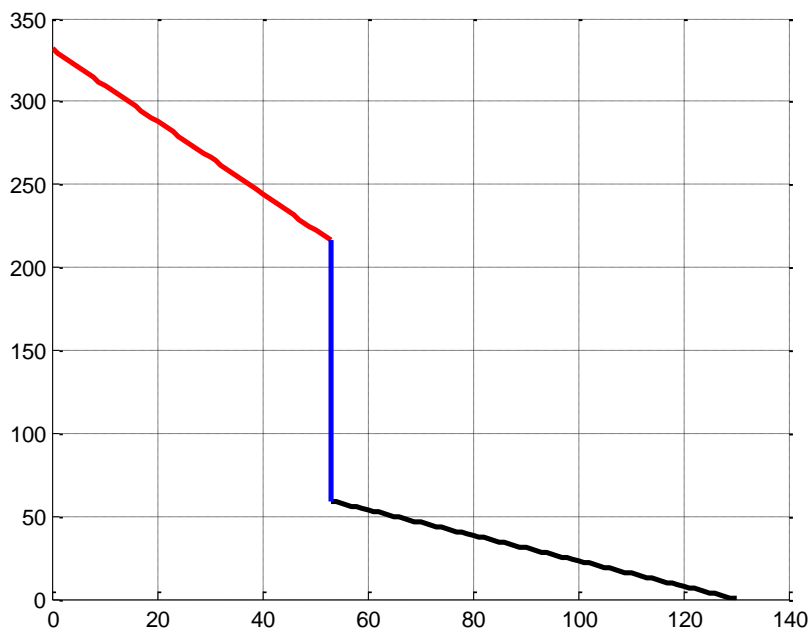
**Рис. 10. Схемы подключения обмоток (верхний ряд) и наведенное напряжение в фазах (нижний ряд)**

а – последовательное соединение обмоток, б – параллельное, в – треугольник

Таким образом, нагрузочная характеристика привода с учетом переключения схем соединения обмоток выглядит следующим образом (рис. 11,12).



**Рис. 11. Нагрузочная характеристика привода при переключении с параллельного на последовательное соединение обмоток**



**Рис. 12. Нагрузочная характеристика привода при переключении со схемы «Треугольник» на последовательное соединение обмоток**

На основании полученных графиков можно сделать вывод, что при переключении с параллельного на последовательное соединение обмоток (рис. 11) обеспечивается требуемая нагрузочная характеристика, а именно: на холостом ходу угловая скорость вращения достигает до 380 град/с, а при приложении нагрузки максимальный момент достигает минимального необходимого уровня 130 Нм и превышает его. При переключении со схемы «треугольник» на последовательное соединение (рис. 12), максимальный момент достигает минимального необходимого уровня 130 Нм, но угловая скорость вращения на холостом ходу достигает 330 град/с, что не обеспечивает требуемые показатели работы модернизированного бесконтактного двигателя.

Данные результаты свидетельствуют о том, что схема параллельного соединения обмоток может обеспечить лишь необходимую угловую скорость вращения на холостом ходу, но не может обеспечить максимальный момент при приложении нагрузки (ограничение батарей с допустимым током 7,5 А). Схема соединения треугольником обеспечивает максимальную угловую скорость вращения лишь 330 град/с, что недостаточно для выполнения ТЗ, а момент также ограничен из-за питания 7,5 А. Поэтому единственный вариант исполнения схемы управления – это переключение между параллельным и последовательным соединением обмоток электродвигателя ДБМ.

### Библиографический список

1. **Кенио, Т.** Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами / Т. Кенио, С. Нагамори. – М.: Энергоатомиздат, 1989, – 184 с.
2. **Микеров, А.Г.** Управляемые вентильные двигатели малой мощности / А.Г. Микеров. – СПб.: СПбГЭТУ, 1997, – 64 с.
3. **Липай, Б.Р.** Компьютерные модели электромеханических систем / Б.Р. Липай, С.И. Маслов. – М.: МЭИ, 2002, – 79 с.
4. **Huang Hong** Electrical Two-Speed Propulsion by Motor Winding Switching and Its Control Strategies for Electric Vehicles / Hong Huang, Liuchen // Chang IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, – 77 с.

5. **Hendershot, J.R.** Design of brushless permanent-magnet motors, Monographs in electrical and electronic engineering / J.R. Hendershot Jr, TJE Miller // Magna physics publishing and Clarendon Press, Oxford, 1994, – 157 с.
6. **Tian, B.** Investigation of Dual-Inverter-Fed Drives for Permanent Magnet Synchronous Motor with Winding Switching / B. Tian, Z. Zhang, T.A. Lipo // University of Wisconsin-Madison College of Engineering Wisconsin Power Electronics Research Center, 2014, – 35 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 30.04.2019*

**A.V. Ulyushkin, I.V. Trekhonin**

## **MODERNIZATION OF THE BRUSHLESS ELECTRIC MOTOR**

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

**Topicality:** The relevance of upgrading a contactless electric motor is substantiated.

**Findings:** A simulation of the operation of a contactless electric motor has been carried out. The main problem of the electric motor operation is determined: the impossibility of providing the required load characteristic using a classical construction.

**Research limitations:** The options for solving this problem are considered: the use of a gearbox with a variable transmission coefficient and the use of a motor with a variable EMF-coefficient.

**Originality/value:** A simulation of a gearbox with a variable transmission coefficient (various options for switching on the motor windings) was carried out, following which a choice was made of a technical solution that meets the requirements.

*Keywords:* valve electric motor, direct current motor, aircraft drive, model operation, ANSYS Maxwell, ANSYS Maxwell Circuit Editor.



# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.33

В.В. Беляков<sup>1</sup>, Ю.В. Палутин<sup>2</sup>, А.В. Тумасов<sup>1</sup>, Д.А. Бутин<sup>1</sup>, А.П. Трусов<sup>1</sup>

## РАСЧЕТ УГЛОВ ПОВОРОТА УПРАВЛЯЕМЫХ КОЛЕС АВТОМОБИЛЯ С УЧЕТОМ УВОДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>  
Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия<sup>2</sup>

Представлен способ расчета углов поворота управляемых колес автомобиля, учитывающий угол увода шин управляемой оси. Различные известные теории на практике почти не используются в связи со сложностью вычислений, при этом геометрия рулевого управления основывается на опыте и анализе существующих автомобилей. Выявлено, что теория поворота управляемых колес Фиала наиболее адекватно описывает физические процессы, протекающие в контакте пневматической шины с опорной поверхностью. Предложенная методика отличается от ранее используемых значительным упрощением расчетов. В качестве данных, требуемых для расчета углов поворота управляемых колес, используются колесная база, высоты ЦТ, ширина колеи, масса на оси, коэффициент увода шин, боковое ускорение, радиус движения. Приведенный расчет зависимости поворота управляемых колес может быть использован на стадии проектирования автомобиля.

*Ключевые слова:* углы поворота управляемых колес, соотношение углов поворота направляющих колес, управляемые колеса, геометрия рулевого управления, схождение.

### Введение

Зависимость поворота управляемых колес автомобиля влияет на износ шин, а также на управляемость и устойчивость движения в повороте. В различные периоды развития автомобилестроения выдвигались те или иные теории поворота управляемых колес с целью уменьшения износа шин и улучшения показателей управляемости при движении в поворот. На основании анализа работ П.В. Аксенова, Д.А. Антонова, С.В. Бахмутова, Л.Л. Гинцбурга, А. Дика, Р.П. Кушвида, Э.И. Григолюка, Н.Т. Катанаева, В.Н. Кравца, К.С. Колесникова, А.А. Полунгяна, В.Ф. Платонова, В.А. Петрушова, Д.Р. Элліса, Е.О. Рыкова, Ю.В. Шемякина, Г.П. Антипова, Н.А. Алфутова, М.В. Гурьянова, В.М. Семенова, В.И. Кольцова, Я.Е. Фаробина, W.F. Milliken, D.L. Millken, Н.В. Расајка [1-14] можно выделить четыре наиболее распространенные теории поворота управляемых колес:

- *параллелограммная* – углы поворота управляемых колес всегда равны друг другу;
- *геометрическая* – соотношение углов поворота определяется по условию Аккермана;
- *система по Гауфу и Ширеру* – углы бокового увода обоих передних колес должны быть по возможности малыми, что достигается при одинаковой величине их углов бокового увода;
- *система Фиала* [12,13] – соотношения уводов пропорционально перераспределенной нагрузке;
- *система по Хассельгруберу* [7,8] – мощность бокового трения, т.е. производная боковой силы при уводе и компонента скорости, перпендикулярной к плоскости вращения шины, должны быть одинаковыми для обоих передних колес.



Для выявления наиболее оптимальной концепции необходимо представление в теории движения автомобиля и работы пневматической шины. При движении в повороте у автомобиля происходит перераспределение нормальных реакций колес. Под действием бокового ускорения на центр тяжести, нагрузка на внешнее колесо увеличиваются, а на внутреннем – снижается, что представлено на схеме (рис. 1). Рулевое управление – так же, как и подвеска – должно обеспечивать оптимальное положение пневматических шин относительно опорной поверхности во время движения. Для определения оптимальных режимов работы пневматических шин передней оси необходимы данные о качении шины с уводом. На рис. 2. представлены графики, характеризующие качение шины с уводом для различных вертикальных нагрузок. Следует обратить внимание, как изменяется зависимость боковой силы от угла увода при различных вертикальных силах. При уменьшении вертикальной силы уменьшается максимальная боковая сила, развиваемая колесом, пропорционально боковой силе снижается угол увода, при котором достигается максимальное ее значение. Из графиков видно, что при изменении вертикальной силы характеристика шины на линейном участке остается неизменной.

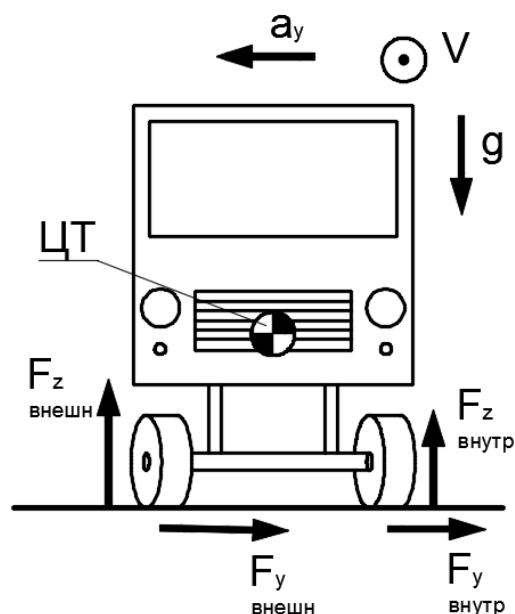


Рис. 1. Схема распределения сил в управляемых колесах

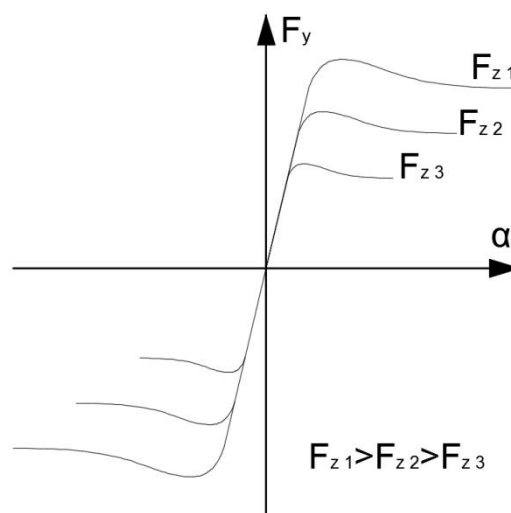


Рис. 2. Диаграмма боковой силы от угла увода

На основании данных о движении автомобиля в повороте и работы пневматической шины можно сделать выводы о теориях поворота управляемых колес. Так, теория закона Аккермана подходит для жестких не пневматических колес, катящихся без увода; система по Гауфу и Ширеру неприемлема в связи с тем, что углы увода у внешнего и внутреннего колеса будут разными из-за различных вертикальных сил; система по Хассельгруберга также не состоятельна в связи с тем, что не возможно на шинах развивать одинаковое боковое усилие, при том, что у них различные вертикальные силы; по этому самой объективной и учитывающий работу пневматической шины является система Фиала.

### Расчет распределения вертикальной силы между колесами управляемой оси

Распределение вертикальных сил на управляемых колесах от действия бокового ускорения, действующего при движении автомобиля в повороте, рассчитывается по формулам (1), (2). При таком подходе перераспределения нагрузок на передней оси не учитываются многие факторы: угловая жесткость подвесок, жесткость кузова на кручение. Также эти формулы подходят только для равномерного движения без продольного ускорения.

$$F_z^{\text{внутр}} = \left( \frac{9,81 \cdot M_{\text{ось}}}{2} \right) - \left( \frac{a_y \cdot H_{\text{цт}}}{B} \right), \quad (1)$$

$$F_z^{\text{внешн}} = \left( \frac{9,81 \cdot M_{\text{ось}}}{2} \right) + \left( \frac{a_y \cdot H_{\text{цт}}}{B} \right), \quad (2)$$

где  $F_z^{\text{внутр}}$ ,  $F_z^{\text{внешн}}$  – сила вертикальная на управляемом колесе внутреннем и внешнем соответственно, Н;  $M_{\text{ось}}$  – масса на управляемой оси, кг;  $a_y$  – боковое ускорение, м/с<sup>2</sup>;  $H_{\text{цт}}$  – высота центра тяжести, м;  $B$  – ширина колеи, м.

### Боковые силы

Суммарная боковая сила, действующая на шины управляемой оси, рассчитывается по формуле (3). При этом расчете не учитываются переходный процесс установления кругового движения.

$$\sum F_y = M_{\text{ось}} \cdot a_y. \quad (3)$$

Боковые силы между внутренним и внешним колесом будут распределяться пропорционально вертикальным силам, согласно закону силы трения. Расчет боковых сил на внутреннем и внешнем колесе производится по формулам (4), (5).

$$F_y^{\text{внутр}} = \sum F_y \cdot \frac{F_z^{\text{внутр}}}{9,81 \cdot M_{\text{ось}}}, \quad (4)$$

$$F_y^{\text{внешн}} = \sum F_y \cdot \frac{F_z^{\text{внешн}}}{9,81 \cdot M_{\text{ось}}}, \quad (5)$$

где  $F_y^{\text{внутр}}$ ,  $F_y^{\text{внешн}}$  – сила боковая на управляемом колесе внутреннем и внешнем соответственно, Н.

### Характеристика качения колеса с уводом

Характеристику качения шины с уводом можно описать формулой любого из авторов теории шин Пасейки, Щадрин, Эллис, Фуфаев и других. Как правило, это функции боковой силы от угла увода, но для решения нашей задачи необходима обратная функция угла увода от боковой силы. Поскольку вывод угла увода из функции не всегда возможен или затруднен для решения данной задачи, примем, что шина работает только в зоне упругой деформации. Допущение, что при небольших углах увода шин зависимость линейна, имеется у многих авторов и часто используется при решении задач. Это допущение сильно упрощает расчетную формулу, при этом погрешность остается в рамках допустимого на режимах качения шин без жесткого скольжения. Режим жесткого скольжения в рамках оптимизации поворота управляемых колес не рассматривается. Представив зависимость угла увода от боковой силы в виде линейной зависимости выражение примет элементарный вид (6), (7):

$$\alpha^{\text{внутр}} = \frac{F_y^{\text{внутр}}}{k_{\text{увода}}}, \quad (6)$$

$$\alpha^{\text{внешн}} = \frac{F_y^{\text{внешн}}}{k_{\text{увода}}}, \quad (7)$$

где  $\alpha^{\text{внутр}}$ ,  $\alpha^{\text{внешн}}$  – угол увода внутреннего и внешнего колеса, град;  $k_{\text{увод}}$  – коэффициент увода шины от боковой силы, Н/град.

### Поворот управляемых колес

На первом этапе рассчитывается угол поворота управляемых колес по закону Аккермана, потому что по этой траектории будут двигаться центры управляемых колес. Схема идеального поворота управляемых колес по закону Аккермана представлена на рис. 3

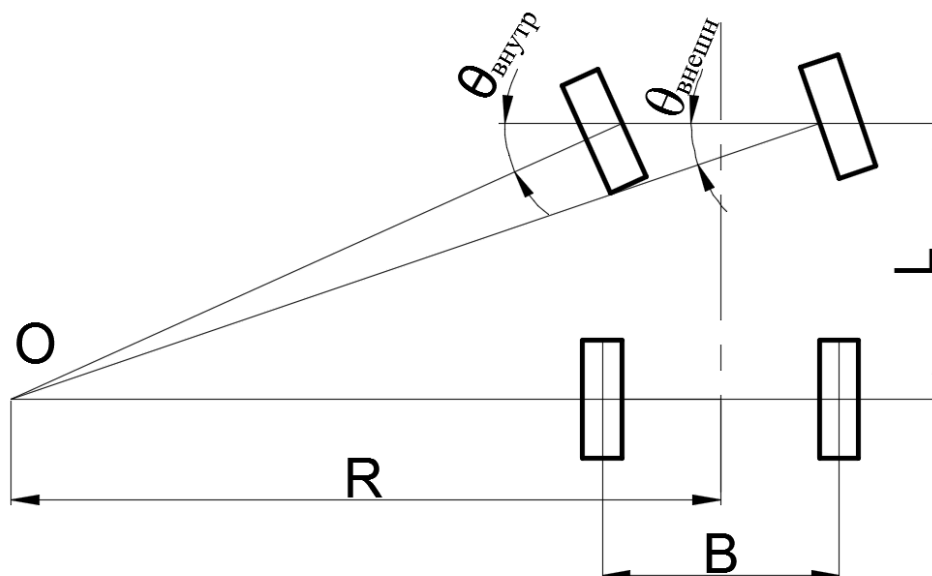


Рис. 3. Схема поворота управляемых колес

Расчет углов поворота по Аккерману производится без учета угла увода колес задней оси, а также радиус движения принимается до центра задней оси, приняв, что радиус движения ЦТ отличается не сильно, расчетные формулы (8) и (9).

$$\theta_{\text{идеал}}^{\text{внутр}} = \text{arctg} \left( \frac{L}{R - (B/2)} \right), \quad (8)$$

$$\theta_{\text{идеал}}^{\text{внешн}} = \text{arctg} \left( \frac{L}{R + (B/2)} \right), \quad (9)$$

Действительные углы поворота управляемых колес вычисляются по сумме идеальных углов поворота и углов увода, представлены в формулах (10) и (11).

$$\theta_{\text{действ}}^{\text{внутр}} = \theta_{\text{идеал}}^{\text{внутр}} + \alpha^{\text{внутр}}, \quad (10)$$

$$\theta_{\text{действ}}^{\text{внешн}} = \theta_{\text{идеал}}^{\text{внешн}} + \alpha^{\text{внешн}} \quad (11)$$

### Результаты

В качестве примера был проведен расчет оптимальных углов поворота колес по теории Фиала. Расчет был проведен для автомобиля с параметрами, представленными в табл. 1.

Таблица 1

## Параметры автомобиля

Параметр	Значение
Колесная база, м	3,145
Высота ЦТ, м	0,85
Ширина колеи передней оси, м	1,75
Масса на передней оси, кг	1273
Коэффициент увода шин, Н/град	1250

В результате расчета были получены углы поворота управляемых колес. Для наглядности зависимости поворота колес от параметров движения в повороте в табл. 2 приведены значения расхождения колес.

Таблица 2

## Расхождения углов поворота управляемых колес

Радиус движения, м	Расхождение управляемых колес, град					
	Боковое ускорения, м/с <sup>2</sup>					
	1	2	3	4	5	6
10	3,41993	3,11739	2,61316	1,90723	0,99962	-0,1097
20	0,70897	0,40643	-0,0978	-0,80373	-1,7113	-2,8207
30	0,25372	-0,04882	-0,55305	-1,25897	-2,1666	-3,2759
40	0,09756	-0,20498	-0,70921	-1,41513	-2,3228	-3,4321
50	0,02583	-0,27671	-0,78094	-1,48687	-2,3945	-3,5038

По результатам расчета оптимальных углов поворота управляемых колес выявлено две зависимости: с уменьшением радиуса движения увеличивается расхождение колес; с увеличением бокового ускорения расхождение колес уменьшается.

Исследования А.С. Добринина выявили, что при эксплуатации среднестатистического автомобиля на дорогах общего пользования боковые ускорения не превышают 3 м/с<sup>2</sup>. Этот порог называют «порогом неприятных ощущений»: он вызывает чувства дискомфорта и опасности. Если принять этот фактор во внимание и сопоставить с результатами расчета оптимального расхождения колес, то видно, что от 0 до 3 м/с<sup>2</sup> угол расхождения колес крайне мал и увеличивается лишь при маневрировании и движениями с радиусами менее 20 м. Если рассматривать режимы движения с ограниченным боковым ускорением и исключить режим маневрирования, оптимальные углы поворота колес настолько близки по значениям, что зависимость поворота колес можно принять параллельной.

Если в эксплуатации автомобиля значительную часть составляет маневрирование с минимальными радиусами поворота, то наиболее адекватным теоретической конструкцией является закон поворота управляемых колес по Аккерману. Данный расчет также подтверждает правильность использования в спортивных автомобилях класса «Формула 1» и «Формула 3» кинематики рулевого управления с зависимостью Анти-Аккермана. Автомобили, двигающиеся с большими боковыми ускорениями, при определенных конструктивных параметрах имеют оптимальные углы поворота управляемых колес в положительном схождении.

## Вывод

В результате анализа теорий оптимального поворота управляемых колес в качестве наиболее адекватно описывающей физические процессы, протекающие в контакте пневматической шины с опорой поверхностью, была определена теория Фиала. Основанный на ней способ расчета оптимальных углов поворота, в силу ряда допущений (линейная зависимость

увода от боковой силы, увод колес задней оси) был сведен к инженерным формулам. Полученные результаты могут быть сопоставлены с геометриями рулевых управлений, используемых на автомобилях различных эксплуатаций. Приведенный расчет зависимости поворота управляемых колес может быть использован на стадии проектирования автомобиля.

Анализ рассчитанных величин углов поворота колес показывает, что для автомобилей,двигающихся с небольшими боковыми ускорениями до  $1 \text{ м/с}^2$ , геометрия поворота управляемых колес схожа с геометрической теорией Аккермана, а при движении с боковыми ускорениями, близкими к потере динамической устойчивости, зависимость может быть описана по теории Анти-Аккермана.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по договору № 02.G25.31.0193 от 27.04.2016 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 218).*

*Экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы».*

### Библиографический список

1. **Чудаков, Е.А.** О рациональной форме рулевой трапеции // Доклады АН СССР. – М.: Изд-во АН СССР. – 1952. – Т. 88. – № 4.
2. Фрикционный износ резины / Сборник статей под ред. д.т.н. В.Ф. Евстратова. – М.: Химия, 1964, – 271 с.
3. **Фаробин, Я.Е.** О рациональной форме рулевой трапеции // Автомобильная промышленность. – Т. 2. – 1959. – С. 15-17.
4. **Фаробин, Я.Е.** Теория поворота транспортных машин / Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1970, – 176 с.
5. **Стефанович, Ю.Г.** Исследование рулевой трапеции автомобилей / Ю.Г. Стефанович: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 1954. – 147 с.
6. **Кушвид, Р.П.** Исследование рулевого управления автомобиля (оптимизация по критерию минимума износа шин) / Р.П. Кушвид. – дисс. ...канд. техн. наук. – М., 1978, – 202 с.
7. **Hasselgruber, H.** Verhaiten eines Kraftfahrzeuges bei Kurveinfahrt Automobilithechn Z / H. Hasselgruber. – №7. – 1965.
8. **Hasselgruber, H.** Zweckmäßige Auslegung van Kraftfahrzeugienkungen in Hinbick auf Kurven vehaiten ung Reifengchonung / H. Hasselgruber // Automob. Ind., – № 3 (1). – 1964.
9. **Добрин, А.С.** Исследование движения автомобиля по заданной траектории / А.С. Добрин. – М.: НАМИ, 1966. – С. 35-65.
10. **Добрин, А.С.** Устойчивость и управляемость автомобиля при неустановившемся движении // Автомобильная промышленность. 1968. – № 9. – С.29-35.
11. **Schallamach, A.** The teori of dynamie rubber friction / A. Schallamach. – Wear. – 1963. – v.6. – № 5.
12. **Fiala, E.** Kraftkorrigierte Lenkanggeometrie / E. Fiala // ATZ. – 1959. – № 2.
13. **Fiala E.** Zur Fahrdunamik des Stressenfahrzeuges unter Berück gichtigung der Lenkwngelastizitet / E. Fiala // ATZ. – № 3. – 1960.
14. **Тумасов, А.В.** Способ расчета интенсивности износа шин для различных режимов движения автомобиля / А.В. Тумасов, Д.А. Бутин, А.А. Васильев // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы. Сборник материалов 94 международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. – С. 123-129.

*Дата поступления  
в редакцию: 07.03.2019*

**V.V. Belyakov, Y.V. Palutin, A.V. Tumasov, D.A. Butin, A.P. Trusov**

**CALCULATION STEETING GEOMETRY OF THE CAR TAKING  
INTO ACCOUNT THE SLIP ANGLE TIRE**

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

**Purpose:** method for calculating the steering angle of the directive wheels of a car.

**Design/methodology/approach:** The calculation is presented in the form of engineering formulas.

**Findings:** The calculation results are comparable with the geometry of the steering controls of existing cars.

**Research limitations/implications:** In calculating the slip of the tires of the driven axes adopted linear, and the slip of tires of the rear axle not included.

**Originality/value:** for the first time the theory of geometry of steering control of the car of the Fiala theory is presented in a simple mathematical form.

*Key words:* steering angles, steering angle difference, steering geometry, slip angle, toe in.

УДК 623.113

Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов

**ОСОБЕННОСТИ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСИЛИТЕЛЕЙ  
ЗАДНЕЙ ЧАСТИ КАБИНЫ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ  
НА БАЗЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ И ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ  
С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ ПО ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
ПО МЕЖДУНАРОДНЫМ ПРАВИЛАМ  
И ПОЛУЧЕНИЯ ЕЕ МИНИМАЛЬНОЙ МАССЫ**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Рассматриваются особенности поиска оптимальных параметров усилителей задней части кабины грузового автомобиля на базе параметрической и топологической оптимизации с целью обеспечения требований по пассивной безопасности по международным правилам и получения ее минимальной массы. Представлены разработанные рациональные конечно-элементные модели (КЭМ) кабины и маятника применительно к задачам оптимизации. Рассмотрена возможность использования части кабины для решения поставленных задач при использовании программ LS-OPT и LS-TaSC с решателем LS-DYNA, что позволяет в итоге получить результаты с приемлемой точностью и минимальным временем решения. Погрешность расчета по перемещениям маятника для части кабины в сравнении с полноценной конструкцией не превышает 8 %. В качестве элементов усиления задней панели кабины использовались стальные ребра и наполнитель из пеноалюминия.

Для решения поставленной задачи и более полной оценки влияния параметров было рассмотрено несколько вариантов доработки кабины. Топологическая оптимизация проводилась с целью получения картины наилучшего расположения усилителей по поверхности панели. Параметрическая оптимизация проводилась по подбору свойств наполнителя (пеноалюминия) и по толщинам конструктивных элементов.

В доработанном варианте кабины обеспечено удовлетворение требованиям по пассивной безопасности при оптимальном распределении массы в результате рационального распределения ребер и подбора толщин. Увеличение массы кабины составило 6 %, при этом перемещение маятника уменьшилось на 47 %. Применение пенонаполнителя в этом случае не явилось рациональным.

*Ключевые слова:* кабина, панель, пассивная безопасность, оптимизация, LS-DYNA, LS-OPT, LS-TaSC, пенонаполнитель, конечно-элементная модель.

### Введение

Испытание автомобилей на пассивную безопасность – задача сложная и дорогостоящая, поэтому целесообразно максимально использовать возможности современного расчетного анализа на основе компьютерного моделирования для уменьшения затрат времени и средств на разработку конструкции. Подобные задачи решаются методом конечных элементов (МКЭ). В программах МКЭ реализованы алгоритмы, позволяющие решать высоконелинейные быстропротекающие задачи с контактным взаимодействием между элементами конструкции, а также несколько методов оптимизации, в том числе, на базе методов гибридных ячеек (НСА) для топологической оптимизации, и различные алгоритмы, в том числе, основанные на построении метамоделей для параметрической оптимизации [1-6].

В данной работе проводилась топологическая и параметрическая оптимизация для подбора параметров наполнителя и силовой структуры и свойств элементов каркасного типа для обеспечения требований по пассивной безопасности по международным правилам и при оптимальном значении массы. Для решения использовались программы LS-TaSC и LS-OPT с явным решателем LS-DYNA, которые дают хорошие результаты по соотношению точности и затрат времени на расчет.

Цель работы заключается в рациональной доработке задней части кабины перспективного грузового автомобиля для удовлетворения требованиям по пассивной безопасности на

базе топологической и параметрической оптимизации параметров наполнителя и силовой структуры и свойств элементов каркасного типа.

### Анализ напряженно-деформированных состояний (НДС) кабины при испытаниях на пассивную безопасность

Методики испытаний на пассивную безопасность конструкции призваны моделировать сценарии реальных аварийных ситуаций. Применительно к грузовым автомобилям такими ситуациями являются лобовой удар, удар по кабине сзади сорвавшимся при торможении грузом и опрокидывание автомобиля.

Одними из наиболее требовательных норм пассивной безопасности кабин являются шведские нормы VVFS 2003:29. Согласно им, пассивная безопасность кабины проверяется проведением следующих испытаний (рис. 1): приложением статической нагрузки на крышу кабины; удар цилиндрическим маятником спереди по переднему верхнему углу кабины; удар прямоугольным маятником по задней стенке кабины под прямым углом [7].

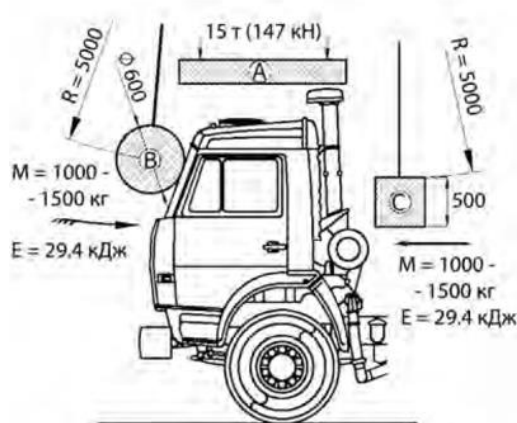


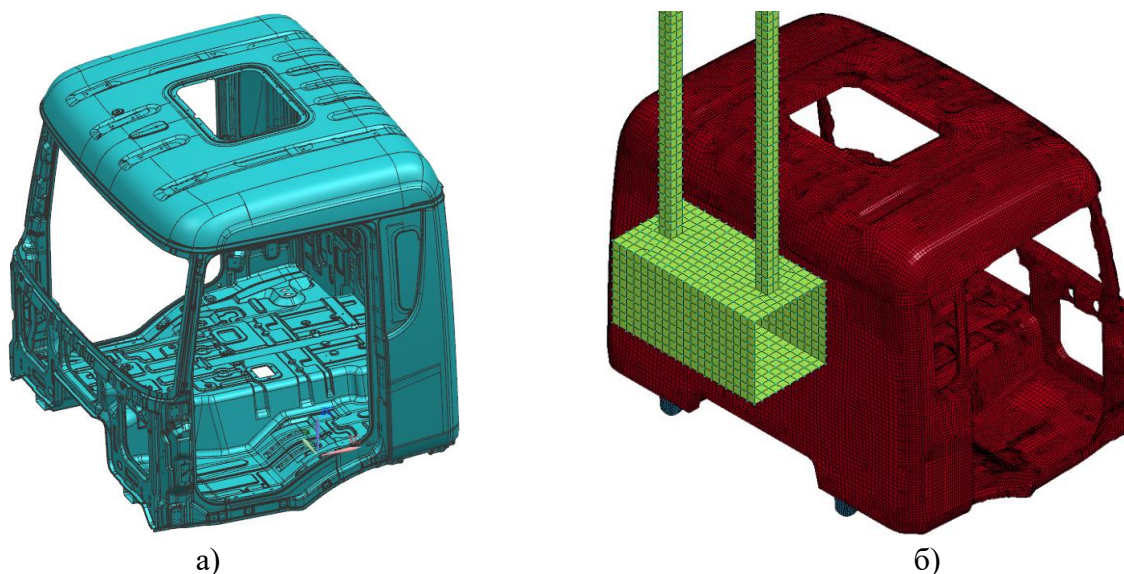
Рис. 1. Испытания по VVFS 2003:29 («Шведские нормы»)

Объектом исследования в данной работе является перспективная бескапотная кабина грузового автомобиля (рис. 2, а). КЭМ кабины создавалась на основе методик, изложенных в работах [8, 9] (рис. 2, б). Характерный размер конечного элемента 20 мм, что свойственно для моделей среднего уровня, количество элементов 37325. Элементы кабины моделировались преимущественно четырехузловыми оболочечными элементами типа Belytschko-Tsay. Толщина внутренних и внешних панелей обшивки 1 мм, лонжеронов кабины – 4 мм. Материал кабины сталь 08 кп с кинематическим упрочнением, масса кабины 250 кг.

Конструкция задней части кабины состоит из двух панелей, которые соединены друг с другом, с боковыми панелями и крышей по периметру точечной сваркой. В месте расположения заднего смотрового окна панели выполнены таким образом, чтобы было возможно установить стеклопакет. К особенностям конструкции задней части кабины можно отнести: отсутствие связывающих элементов между внешней и внутренней панелями (кроме периметра). Отрицательной стороной такого рода конструктивных решений является уменьшение жесткости конструкции, в том числе, при ударе сзади.

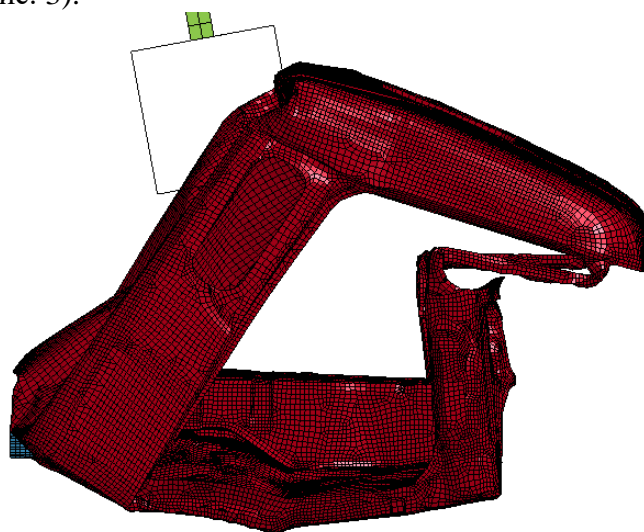
Для оценки соответствия требованиям правил пассивной безопасности кабины был проведен расчет при ударе маятником массой 1000 кг с начальной скоростью 7,6 м/с по задней панели кабины [10].





**Рис. 2. Объект исследования:**  
а – твердотельная модель; б – КЭМ в момент удара маятником

Машинное время расчета в программе LS-DYNA составляет 55 минут, что в случае решения оптимизационной задачи является приемлемым с точки зрения затрат времени при условии, что характер деформации идентичен экспериментальным [11, 12]. Результаты расчета показаны ниже (рис. 3).



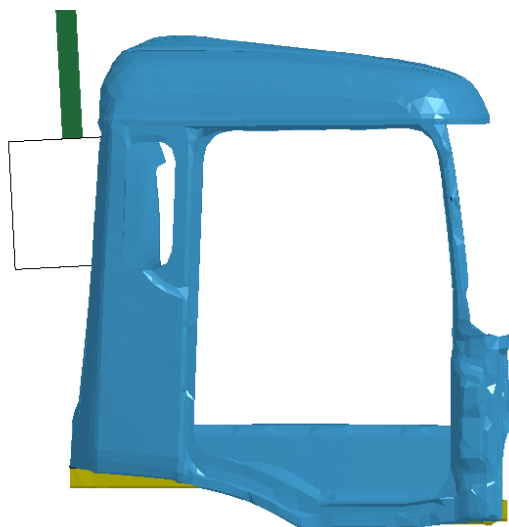
**Рис. 3. Деформированное состояние базового варианта кабины**

Анализ результатов показал, что жизненное пространство в кабине при ударе маятником по задней стенке не сохранилось. В местах крепления стоек лобового стекла возникли обширные пластические деформации, задняя панель потеряла устойчивость и, как следствие, кабина сложилась в продольном направлении.

Для решения задачи обеспечения пассивной безопасности был применен подход деления кабины на подзоны. На начальном этапе использовался доработанный вариант кабины при ударе маятником по передней стойке в соответствии со «Шведскими нормами». Согласно рекомендациям, изложенным в статье [13], каркасные элементы вокруг дверного проема и контур передней панели под лобовым стеклом заполнены пеноалюминием; верхний контур дверного проема усилен накладками.

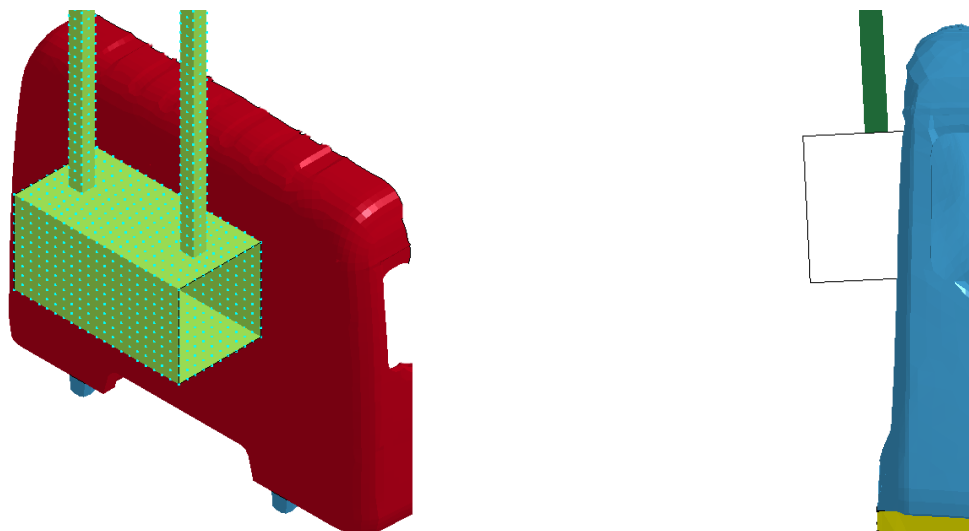
Использование наполнителя из пеноалюминия увеличило жесткость конструкции кабины, при этом максимальное перемещение точки на маятнике составило 294 мм. Масса кабины 300 кг. В результате деформации у доработанной конструкции меньше, чем у базового

варианта (рис. 4), однако, они все равно остаются критичными с точки зрения сохранения жизненного пространства в салоне кабины. В связи с этим, требуется дальнейшая доработка задней части кабины, которая будет строиться на поиске наилучшей структуры элементов каркасного типа и использования наполнителя (пеноалюминия) и накладок (ребер жесткости).



**Рис. 4. Деформированное состояние доработанного варианта кабины**

Анализ картины НДС кабины позволяет сделать вывод о том, что жесткость конструкции в районе дверного проема, передней панели и лобового стекла достаточна для поглощения ударной энергии маятника. В связи с этим для сокращения продолжительности расчетов на предварительной стадии по доработке конструкции целесообразно использовать только заднюю часть кабины (рис. 5). Перемещение маятника при моделировании удара только по задней части кабины составило 270 мм, что на 8 % меньше, чем в случае моделирования всей кабины.



**Рис. 5. КЭМ задней панели в момент удара маятником**

Основываясь на полученных результатах, была поставлена задача осуществить поиск оптимальных решений для задней части кабины с целью удовлетворения требованиям по пассивной безопасности и минимизации массы.

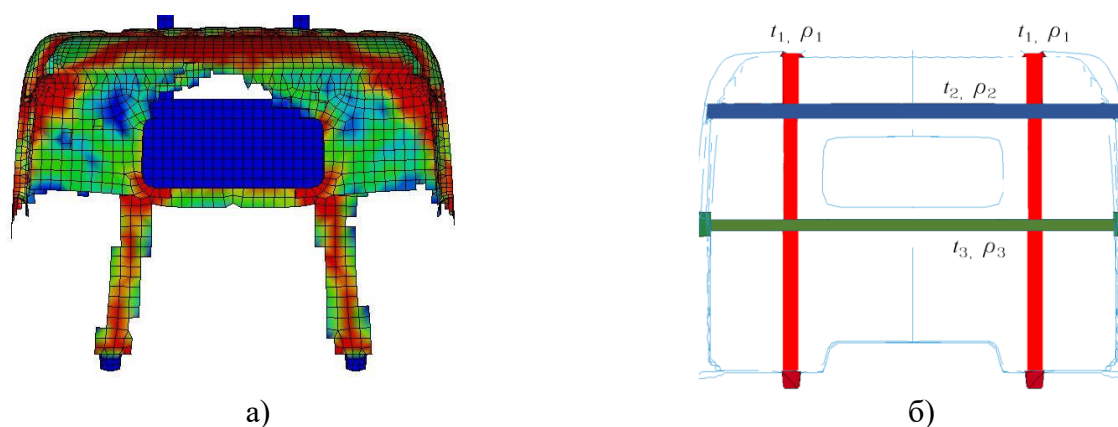
Для решения поставленной задачи и более полной оценки влияния параметров была предложена оптимизация структуры силовых элементов каркасного типа, поиска оптимального распределения только накладок (ребер), поиска оптимального распределения и плотности только наполнителя (пеноалюминия) в элементах каркасного типа.

### Постановка задачи топологической и параметрической оптимизаций

С целью получения картины оптимального расположения силовых элементов каркасного типа на задней внутренней панели кабины была проведена топологическая оптимизация при ударе маятником. Для решения задач ударного воздействия была создана КЭМ, состоящая из shell элементов. Вся совокупность shell элементов задней панели составляет пространство проектирования, которое участвует в топологической оптимизации. Размер характерного элемента 20 мм, количество – 10120. Данная модель является моделью среднего уровня, которая, как отмечалось, подходит для решения оптимизационных задач. Цель оптимизации – поиск оптимального расположения силовых элементов каркасного типа на задней внутренней панели кабины, обеспечивающие требуемое жизненное пространство в конструкции при ударе сзади и минимум массы конструкции.

Оптимизация проводилась методом гибридных ячеек (HCA) в программе LS-TaSC, как одним из наиболее эффективных для подобных задач [14, 15].

Результат топологической оптимизации и его интерпретация представлены ниже (рис. 6).



**Рис. 6. Результаты:**  
а – топологической оптимизации; б – интерпретации

Анализ полученных результатов показывает, что вертикальные усилители позволяют передать ударную нагрузку к местам расположения элементов крепления конструкции к лонжеронам, а поперечные перераспределяют нагрузку между боковыми панелями кабины. Основываясь на результатах топологической оптимизации, был предложен вариант доработки задней части кабины (рис. 6, б и 7). Между двумя панелями были введены ребра, которые образовали замкнутые объемы. Получившиеся полости заполнены наполнителем (пеноалюминием) для увеличения жесткости всей конструкции. Расстояние между ребрами одинаковое и составляет 60 мм.

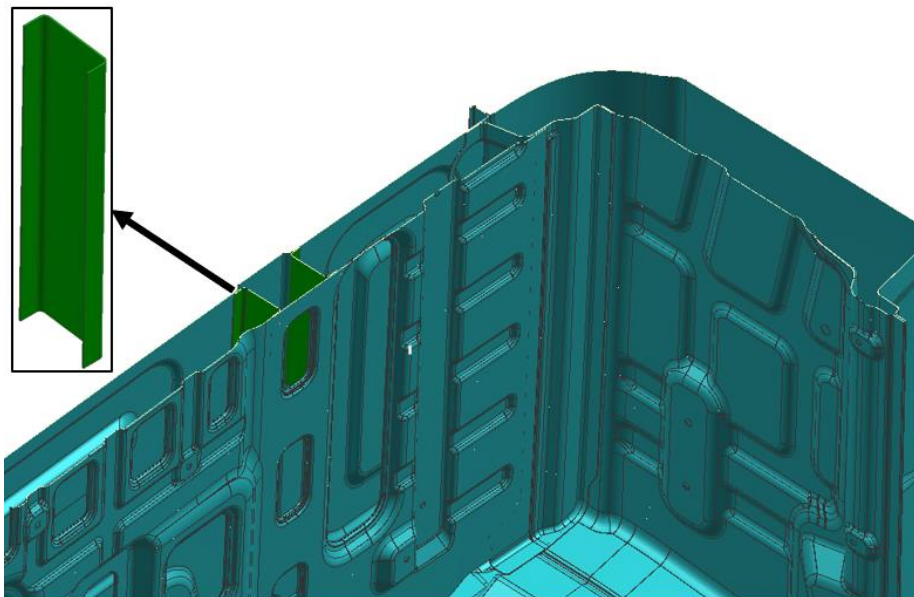


Рис. 7. Доработка задней части кабины

С целью определения оптимальных значений толщин ребер и плотности наполнителя была поставлена задача параметрической оптимизации, которая решалась в программе LS-OPT с использованием явного решателя LS-DYNA. Материал пеноалюминий в программе LS-DYNA описывается моделью, предложенной Дешпендом и Флеком [16]. В данной модели свойства наполнителя (такие, как прочность и жесткость) зависят от плотности, что позволяет использовать его для решения оптимизационных задач, выбирая в качестве варьируемого параметра плотность. Применение этой модели к задачам оптимизации конструкций представлено в работах [17-19].

В данной задаче в качестве варьируемых параметров выступают плотность пеноалюминия  $\rho_i$ , которая изменяется в пределах от 100 кг/м<sup>3</sup> до 800 кг/м<sup>3</sup>, и толщины ребер  $t_j$ : 0,1 мм; 1 мм; 2 мм. На основе ранее проведенного анализа и требования сохранения жизненного пространства максимальное перемещение маятника не должно превышать 150 мм. Задача оптимизации решалась с помощью построения поверхности отклика (метамодель) методом Radial basis function network (основан на нейронных сетях) и алгоритма adaptive simulated annealing (алгоритм имитации отжига).

Результаты оптимизации сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты параметрической оптимизации

	t1 , мм	t2 , мм	t3 , мм	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_2$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_3$ , кг/м <sup>3</sup>	Перемещение, мм	Увеличение массы, кг
Без доработки панели	-	-	-	-	-	-	270	0
С ребрами	1	1	1	-	-	-	149	+18
С наполнителем	1	1	1	100	100	100	146	+33

Анализ результатов параметрической оптимизации показал, что использование наполнителя неэффективно, потому что масса конструкции в этом случае увеличилась на 11 %, а в случае применения ребер – на 6 % при похожих значениях по перемещению маятника. Следовательно, окончательная доработка кабины осуществлялась с помощью межпанельных ребер с толщиной 1 мм.

В результате доработки кабина стала удовлетворять требованиям по пассивной безопасности, максимальное перемещение маятника уменьшилось на 47 % (до 155 мм), однако масса кабины увеличилась на 6 % (до 323 кг) по сравнению с исходной конструкцией.

### Заключение

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. При исследовании поведения кабины при ударе сзади допустимо моделировать только ее заднюю часть (расположенную за дверными проемами). Это позволяет сократить машинное время, затрачиваемое на проведение топологической и параметрической оптимизаций, более чем в два раза, при этом отклонение результатов относительно модели полноценной кабины не превысило 8 %.
2. В результате доработки перспективной кабины грузового автомобиля путем целенаправленного введения накладок и усилителей удалось добиться заданных свойств по пассивной безопасности при увеличении ее массы на 6 %.
3. Применение наполнителя (пеноалюминия) для усиления задней части кабины при ударе маятником сзади в нашем случае неэффективно (в общем случае зависит от особенностей конструкции кабины).

### Библиографический список

1. **Tovar, A.** Bone remodeling as a hybrid cellular automaton optimization process / A. Tovar // Ph.D. thesis. University of Notre Dame. Notre Dame. – 2004.
2. **Шабалин, М.Л.** Снижение требований к прочности материала подрамника грузового автомобиля с независимой подвеской путем параметрической оптимизации конструктивно-силовой схемы / М.Л. Шабалин, Д.С. Вдовин // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2016. – № 4 (30). – С. 90-96.
3. **Вдовин, Д.С.** Проектирование направляющего аппарата независимой подвески автомобиля с использованием метода топологической оптимизации / Д.С. Вдовин, В.С. Прокопов, Д.С. Рябов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2017. – № 3 (33). – С. 9-13.
4. **Кишов, Е.А.** Топологическая оптимизация силовых конструкций методом выпуклой линеаризации / Е.А. Кишов, В.А. Комаров // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т. 17. – № 1. – С. 137-149. – DOI:10.18287/2541-7533-2018-17-137-149.
5. **Французов, А.А.** Применение метода топологической оптимизации в задачах проектирования грузоподъемной техники / А.А. Французов, Я.И. Шаповалов, Д.С. Вдовин // Технические науки. Машиностроение и машиноведение. – 2017. – №2 (42). – С. 99-108. – DOI: 10.21685/2072-3059-2017-2-9.
6. **Вдовин, Д.С.** Метод топологической оптимизации в задачах проектирования безопасных кабин сельскохозяйственной и строительной техники / Д.С. Вдовин // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2018. – № 4 (38). – С. 21-29.
7. VVFS 2003:29, Vägverkets föreskrifter om nationella typgodkännande av system, komponent och separat teknisk enhet, Vägverkets författningssamling, april, 2003.
8. **Шабан, Б.А.** Особенности построения конечно-элементных моделей кабин для исследования пассивной безопасности при ударе в соответствии с правилами ЕЭК ООН №29 / Б.А. Шабан, В.Н. Зузов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2013. – № 03. – DOI: 10.7463/0313.0542301.
9. **Черников, С.К.** Численные исследования процессов деформирования конструкций грузовых автомобилей в течение дорожно-транспортных происшествий / С.К. Черников, А.Н. Ахмадышин // Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского. – 2011. – С. 168-172.
10. **Гончаров, Р.Б.** Топологическая оптимизация конструкции бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности / Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2018. – № 2 (36). – С. 2-9.

11. **Гончаров, Р.Б.** Проблемы поиска оптимальных конструктивных параметров бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности / Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2018. – № 3 (122). – С. 130–136.
12. **Гончаров, Р.Б.** Проблемы поиска оптимальных решений для обеспечения пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей при минимальной массе / Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2018, – № 4 (38). – С. 92-102.
13. **Andres Tovar** Renaud Crashworthiness design using topology optimization / Tovar Andres, M. Patel Neal, Byung-Soo Kang, E. John // Journal of mechanical design. – 2009. – № 131. – P. 1-12. – DOI: 10.1115/1.3116256.
14. **Goel, T.** A topology optimization tool for LS-DYNA users: LS-OPT/ Topology / T. Goel, W. Roux, N. Stander // 7-th European LS-DYNA Conference, 2009.
15. **Deshpande V.S.** Isotropic models for metallic foams / V.S. Deshpande, N.A. Fleck // J. Mech. Phys. Solids. – 2000. – № 48. – P. 1253–1283.
16. **Zhaokai, Li** Crashworthiness and lightweight optimization to applied multiple materials and foam-filled front-end structure of auto-body / Li Zhaokai, Yu Qiang, Zhao Xuan, Yu Man, Shi Peilong, Yan Cilei // Adv. Mech. Eng. – 2017. – № 9(8). – P. 1-21. – DOI: 10.1177/1687814017702806.
17. Liuwei, Guo, Jilin Yu Dynamic bending response of double cylindrical tubes filled with aluminum foam / Guo Liuwei, Yu Jilin // International Journal of Impact Engineering. – 2011. – № 38. – P. 85-94.
18. **Zhi, Xiao** Crashworthiness design for functionally graded foam-filled bumper beam / Xiao Zhi, Fang Jianguang, Sun Guangyong, Li Qing // Int. J. Advances in engineering software. – 2015. – № 85. – P. 81-95.

*Дата поступления  
в редакцию: 29.01.2019*

**R.B. Goncharov, V.N. Zuzov**

**SPECIAL FEATURES OF SEARCH OF THE OPTIMUM PARAMETERS  
OF THE AMPLIFIERS OF A TRUCK CABIN REAR PART, BASED ON PARAMETRIC  
AND TOPOLOGICAL OPTIMIZATION IN ORDER TO ENSURE THE REQUIREMENTS  
FOR PASSIVE SAFETY ACCORDING TO INTERNATIONAL RULES AND TO OBTAIN  
ITS MINIMUM MASS**

Moscow state university N.E. Bauman

**Purpose:** Crashworthiness design for rear part of a truck cabin using a topology and parametric optimization.

**Design/methodology/approach:** The design parameters for crashworthiness optimization are foam density and thickness of the ribs, the purpose is to minimize the total mass of a rear part of truck cabin. The foam model that is used in this article is Deshpande and Fleck foam. The programs for optimization are LS-DYNA, LS-TaSC and LS-OPT.

**Findings:** The optimized design has the total mass more than original one (5%), but the crashworthiness is better than base model. Topology optimization is good for finding the location of the ribs and parametric optimization uses for finding the best values for density and thickness.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research in the improvement of the crashworthiness design for a truck's cabin.

*Key words:* truck cabin, panel, crashworthiness, optimization, LS-DYNA, LS-OPT, LS-TaSC, aluminum foam, finite-element model.



УДК 517.9

Л.Н. Ерофеева, Л.Н. Мазунова

## ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ АВТОМОБИЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В грузовом автотранспорте могут наблюдаться нежелательные колебания кабины с водителем. В статье приводится математическая модель возникновения подобных колебаний, основанная на аппарате теории дифференциальных уравнений. Дается решение соответствующей математической задачи, сопровождаемое рядом графиков, полученных с помощью компьютерного вычисления уравнений движения. Выявлено, что при отсутствии внешнего воздействия рассматриваемая модель описывает колебательный процесс, происходящий в одной плоскости. Наличие внешнего воздействия импульсного типа приводит к появлению бифуркаций, т.е. перехода от одного режима к иному, что выражается в виде возникновения колебаний в других плоскостях. Приведенные графики иллюстрируют некоторые режимы движения кабины: с разными начальными условиями и различным внешним воздействием.

*Ключевые слова:* грузовой автотранспорт, колебания, математическая модель, дифференциальные уравнения.

При движении автотранспорта, предназначенного для грузовых перевозок, даже незначительные неровности дороги могут вызвать нежелательные колебания кабины с водителем, которые могут нанести вред здоровью. Анализ возникновения и протекания таких колебаний проблематичен ввиду сложности устройства самого транспортного средства. На предлагаемой схеме изображено устройство, которое является типичным для большегрузных автомобилей (рис. 1). Большое количества взаимосвязанных узлов затрудняет выявление основных факторов, являющихся причиной возникновению упомянутых колебаний.

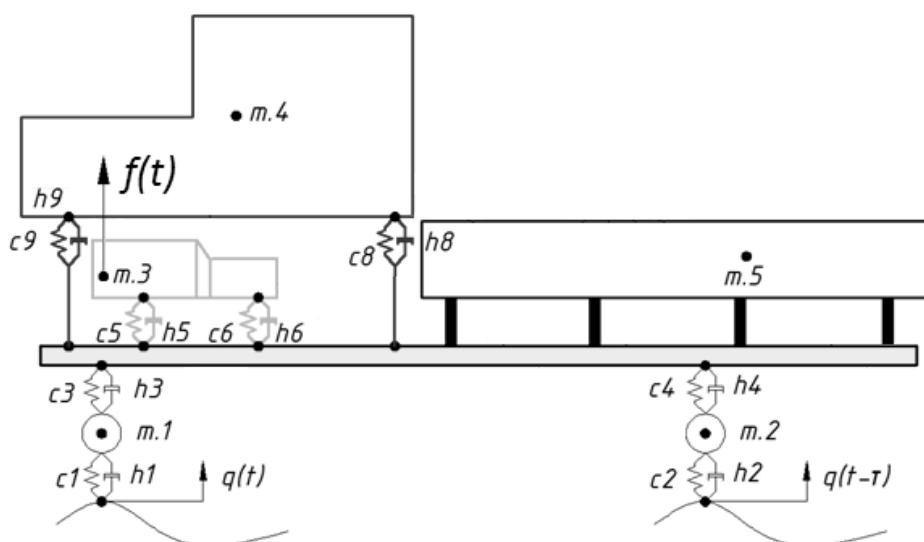


Рис. 1. Эквивалентная схема грузового автомобиля

В настоящей статье предлагается простая модель для описания этого явления, в рамках которой две материальные точки с массами  $m$  и  $M$  имитируют кабину с водителем и поддерживающий ее мост (рис. 2). Можно принять их за соответствующие центры масс. Взаимодействие между ними осуществляется упругими силами (амортизаторы, рессоры и т.п.), которые

считаются удовлетворяющими третьему закону Ньютона и линейно зависящими от расстояния между точками. Внешняя сила  $\bar{f}$  (воздействие дороги) прилагается к точке М. Положение точек определяют их радиус-векторы, исходящие из фиксированной точки О.

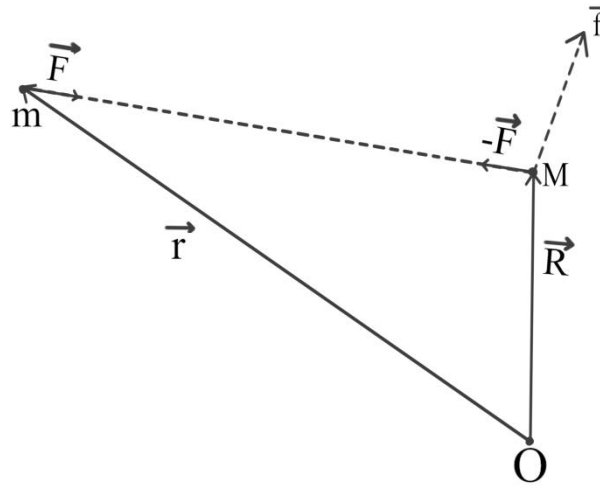


Рис. 2. Схема грузового автомобиля «Кабина-мост»

Второй закон Ньютона дает пару уравнений (1):

$$\begin{aligned} m\ddot{\bar{r}} &= \bar{F}, \\ M\ddot{\bar{R}} &= -\bar{F} + \bar{f}. \end{aligned} \quad (1)$$

Для упругой силы берется выражение (2)

$$\bar{F} = k(|\bar{R} - \bar{r}| - l), \quad (2)$$

где  $\bar{n} = \frac{\bar{R} - \bar{r}}{|\bar{R} - \bar{r}|}$  – единичный вектор вдоль направления от m к М. Это выражение учитывает

третий закон Ньютона и линейную зависимость  $\bar{F}$  от расстояния  $|\bar{R} - \bar{r}|$  между М и m. Параметр  $l$  введен для того, чтобы учесть характер  $\bar{F}$ : при больших расстояниях ( $|\bar{R} - \bar{r}| > l$ ) точки m и М притягиваются, а при малых – отталкиваются.

Наконец, используем систему отсчета, в которой центр масс покоится, т.е. (3):

$$m\bar{r} + m\bar{R} = 0. \quad (3)$$

Это необязательно инерциальная система отсчета (например, при неравномерном движении), но при необходимости учитывающая силы инерции.

Учет (2) и (3) позволяет переписать уравнения движения (1) в виде (4):

$$\begin{aligned} \bar{r} &= -\frac{M}{r}\bar{R} \text{ и} \\ M\ddot{\bar{R}} + k\left(1 + \frac{M}{m} - \frac{l}{R}\right)\bar{R} &= \bar{f}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $R = |\bar{R}|$ .

Удобнее работать с безразмерными величинами  $R^*$  и  $t^*$ , определяемыми равенствами  $R = \lambda R^*$ ,  $t = \mu t^*$ .

Если подобрать  $\lambda$  и  $\mu$  так, чтобы выполнялись равенства (5):

$$\frac{M\lambda}{\mu^2} = k\left(1 + \frac{M}{m}\right)\lambda = \frac{kl}{\mu}, \quad (5)$$

которые однозначно определяют  $\lambda$  и  $\mu$ , то основное уравнение (4) превращается в (6)



$$\ddot{\bar{R}} + \left(1 - \frac{1}{R}\right)\bar{R} = \bar{s}, \quad \bar{s} = \frac{1}{\lambda} \bar{f}. \quad (6)$$

В последнем опущен символ (\*) в обозначении  $R^*$ .

Изучим сначала невозмущенное движение при  $\bar{f} = 0$ , т.е. рассмотрим уравнение (7):

$$\ddot{\bar{R}} + \left(1 - \frac{1}{R}\right)\bar{R} = 0. \quad (7)$$

Аналогичная задача решается в небесной механике. Прежде всего, это теория планет, главной целью которой является изучение движения отдельной планеты относительно Солнца под действием главной силы – силы притяжения Солнца и менее значительных сил притяжения всех других планет и тел солнечной системы. Установлено, что небесные тела вращаются по плоской орбите, каковой может быть лишь коническое сечение – эллипс, гипербола, парабола. Тривиальный случай – движение по прямой, которое рассматривается как вырожденное. При решении этой задачи небесные тела считаются материальными точками, т.е., предполагается, что расстояния между ними во много раз больше, чем их собственные размеры.

В нашей модели, как далее будет показано, ситуация резко отличается от рассмотренной выше. Характер траектории движения оказывается более сложным. Тем не менее, математический аппарат исследуемой модели, по сути, не отличается от такового в небесной механике. Существенное значение и в данном случае имеют законы сохранения энергии и импульса. Изучение невозмущенного движения, описываемого уравнением (7) – это изучение задачи двух тел в поле центральных сил, классическим примером которой является задача двух тел в небесной механике. Можно получить два закона сохранения: закон сохранения энергии и закон сохранения момента количества движения. Для уравнения (7) формально их можно получить, умножая скалярно на  $\dot{\bar{R}}$ , а также умножая на  $\bar{R}$  векторно. Приведем окончательные результаты (8):

$$\frac{d}{dt} [\bar{R}, \dot{\bar{R}}] = 0, \text{ т.е. } \bar{\Omega} = [\bar{R}, \dot{\bar{R}}] = const \text{ и} \quad (8)$$

$$\dot{\bar{R}}^2 + (\bar{R} - 1)^2 = const.$$

В справедливости (8) проще всего убедиться дифференцированием, имея в виду, что  $\dot{\bar{R}}^2 = (\dot{\bar{R}}, \dot{\bar{R}})$ , а  $R^2 = (\bar{R}, \bar{R})$ .

Закон сохранения момента количества движения  $\bar{\Omega} = [\bar{R}, \dot{\bar{R}}] = const$  показывает, что движение М происходит в плоскости, перпендикулярной  $\bar{\Omega}$ . Определение орбиты М и ее параметров, т.е. по существу решение основного уравнения (7) получается следующим образом. Введем декартову систему координат так, чтобы ось Z была параллельна  $\bar{\Omega}$ , а также сопутствующую ей цилиндрическую систему координат. Тогда

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \{x, y, 0\} = \{R \cos \varphi, R \sin \varphi, 0\}, \\ \dot{\bar{R}} &= \{\dot{x}, \dot{y}, 0\} = \{\dot{R} \cos \varphi - R \sin \varphi \dot{\varphi}, \dot{R} \sin \varphi + R \cos \varphi \dot{\varphi}, 0\} \text{ и} \\ \dot{\bar{R}}^2 &= \dot{R}^2 + R^2 \dot{\varphi}^2 \text{ и (8) переходит в (9):} \\ \dot{R}^2 + R^2 \dot{\varphi}^2 + (R - 1)^2 &= k^2 (= const). \end{aligned} \quad (9)$$

Для  $\Omega = |\bar{\Omega}|$  получается выражение  $\Omega = x\dot{y} - y\dot{x} = R^2 \dot{\varphi}$ .

Теперь для определения орбиты после подстановки в (9)  $\dot{\varphi} = \frac{\Omega}{R^2}$  получаются два уравнения (10), (11):

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\Omega}{R^2}, \quad \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = k^2 - \frac{\Omega^2}{R^2} - (R - 1)^2. \quad (10)$$

Зависимость R от  $\varphi$  описывается уравнением

$$\frac{dR}{d\varphi} = \pm \frac{R^2}{\Omega} \sqrt{k^2 - \frac{\Omega^2}{R^2} - (R-1)^2}, \quad (11)$$

допускающим решение в эллиптических интегралах. Значение констант  $k$  и  $\Omega$  определяются из начальных данных и движение  $M$  происходит в кольце (12):

$$R_{\min} \leq R \leq R_{\max}, \quad (12)$$

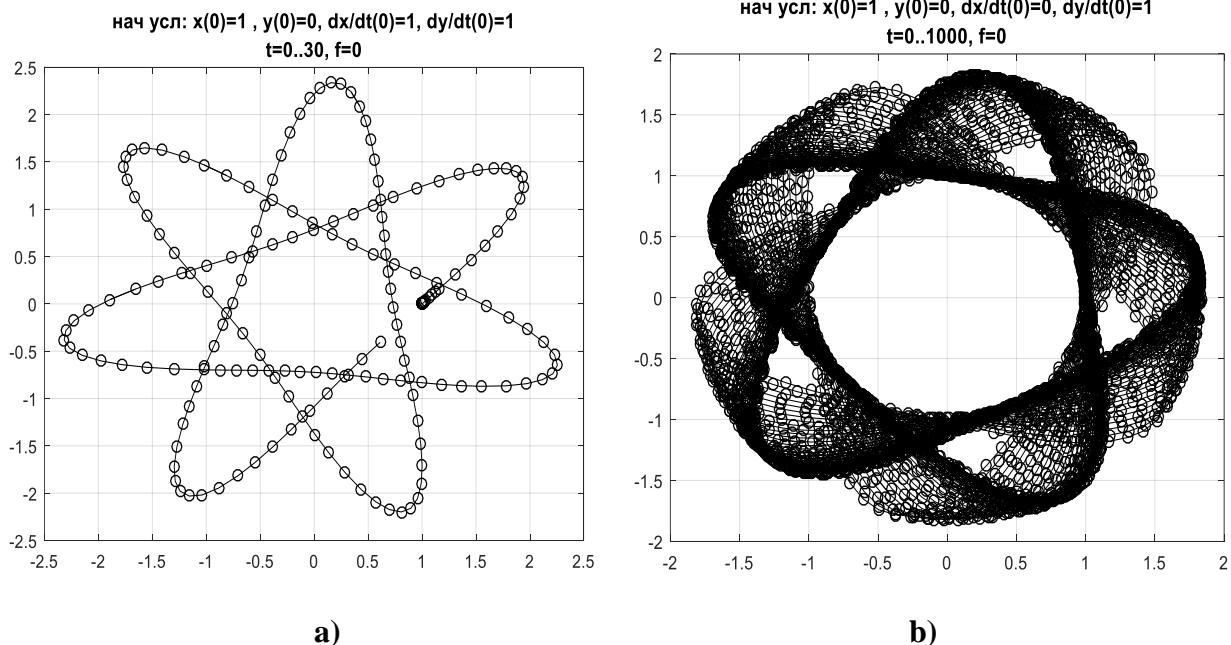
где  $R_{\min}$  и  $R_{\max}$  – корни подкоренного выражения (11).

При наличии внешней силы  $\bar{f}$  не удастся проинтегрировать основное уравнение (6). Поэтому сделаем некоторые правдоподобные ограничения на характер  $\bar{f}$ . Пусть  $\bar{f}$  моделирует последовательность кратковременных «толчков», т.е.  $\bar{f}$  отличается от нуля на последовательность (допускается и случайной) коротких временных промежутков. Рассмотрим воздействие одного «толчка», длящегося промежутков времени  $[0, \tau]$ . Интегрирование (6) по  $t$  в пределах от 0 до  $\tau$  дает (13):

$$\dot{\bar{R}} \Big|_0^\tau + \int_0^\tau \left(1 - \frac{1}{R}\right) \bar{R} d\tau = \int_0^\tau \bar{s} d\tau = \bar{S}. \quad (13)$$

Интегралом в левой части при малом  $\tau$  можно пренебречь и, следовательно, происходит скачок скорости  $\dot{\bar{R}}$  на величину  $\bar{S}$ . Тем самым при  $t = \tau$  изменяются начальные условия (7), и колебания будут происходить, вообще говоря, в другой плоскости. Ее положение и орбиту движения нетрудно описать.

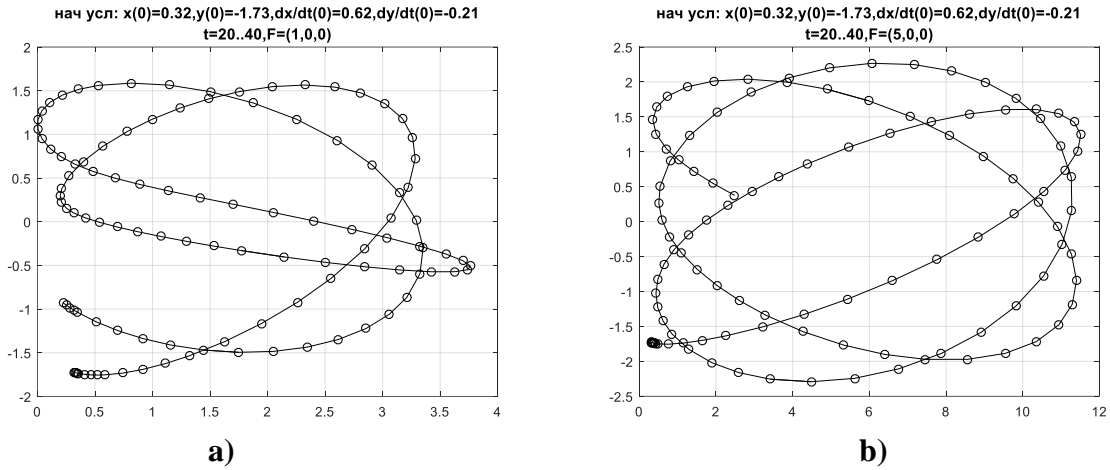
Приведем ряд полученных компьютерными вычислениями уравнений движения графиков, которые иллюстрируют движение  $M$  при различных режимах: с разными начальными условиями и внешним воздействием.



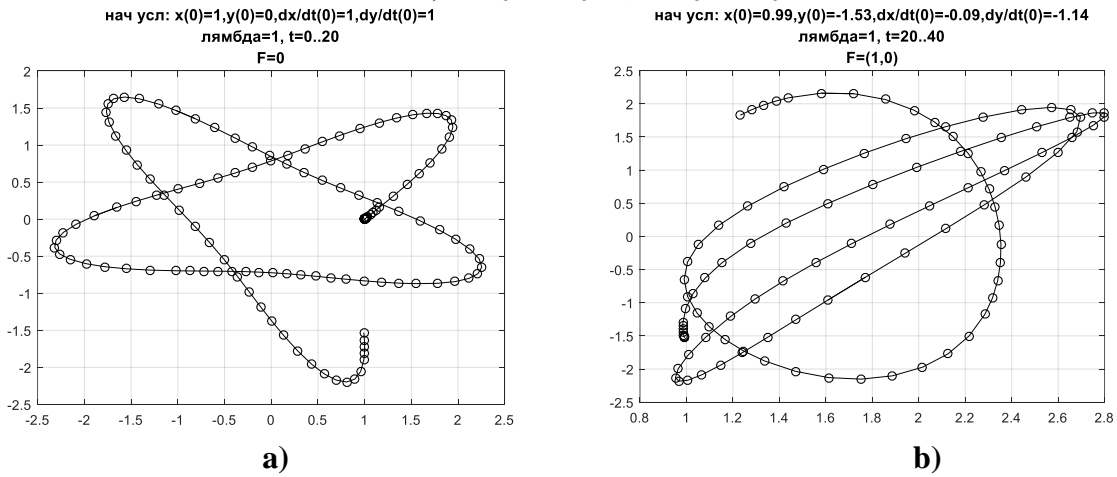
**Рис. 3. Движение при отсутствии внешнего воздействия ( $\bar{f} \equiv 0$ ):**

a) начальные условия  $x(0) = 1, y(0) = 1, \dot{x}(0) = 1, \dot{y}(0) = 1, t = \underline{0,30}$ ;

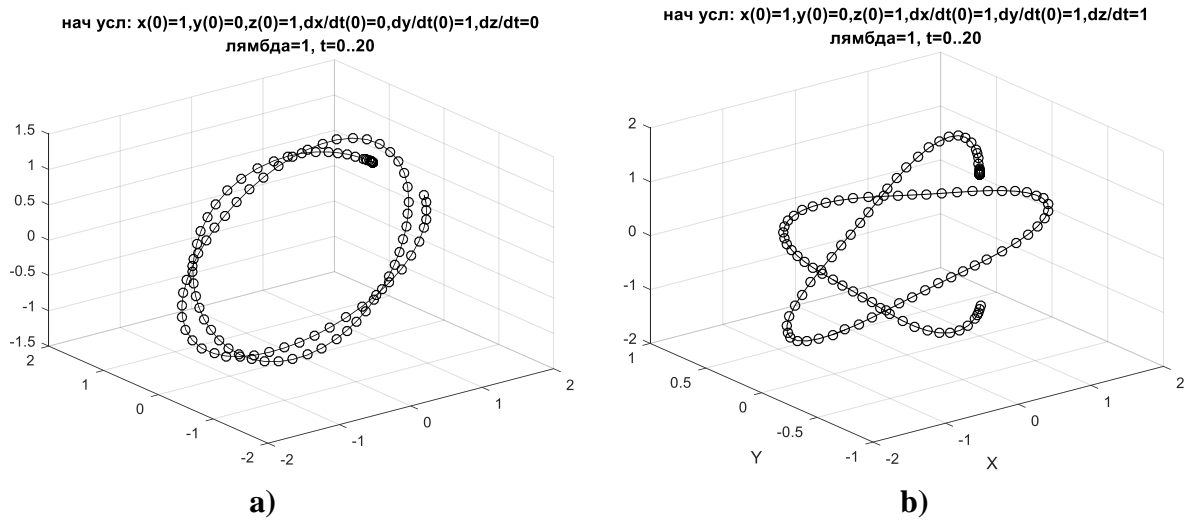
b) начальные условия  $x(0) = 1, y(0) = 0, \dot{x}(0) = 0, \dot{y}(0) = 1, t = \underline{0,1000}$



**Рис. 4. Движение при наличии внешнего воздействия, действующего в плоскости:**  
 Начальные условия  $x(0) = 0,32, y(0) = -1,73, \dot{x}(0) = 0,62, \dot{y}(0) = -0,21, t = \overline{0,30}$ :  
 а)  $\bar{f} = \{1; 0; 0\}$ ; б)  $\bar{f} = \{5; 0; 0\}$

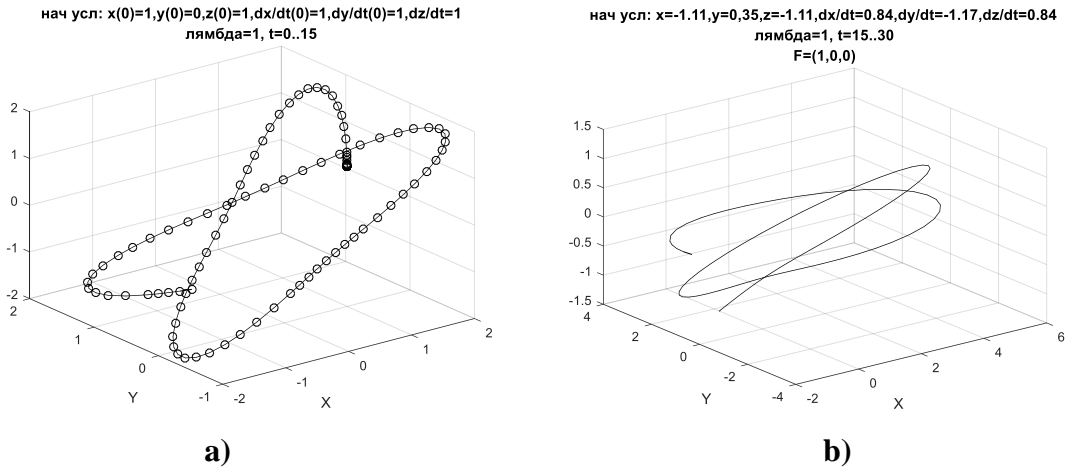


**Рис. 5. Движение при отсутствии и наличии внешнего воздействия, действующего в плоскости:**  
 а) начальные условия  $x(0) = 1, y(0) = 0, \dot{x}(0) = 1, \dot{y}(0) = 1, t = \overline{0,20}, \bar{f} = 0$ ;  
 б) начальные условия  $x(0) = 0,99, y(0) = -1,53, \dot{x}(0) = -0,09, \dot{y}(0) = -1,14, t = \overline{20,40}, \bar{f} = \{1,0,0\}$



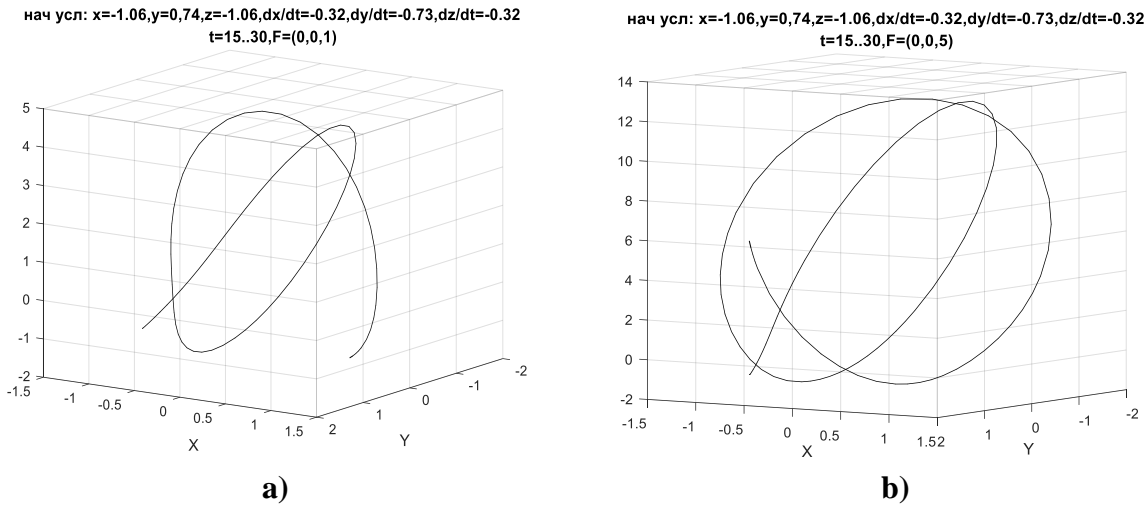
**Рис. 6. Движение при отсутствии внешнего воздействия ( $\bar{f} \equiv 0$ ):**

- а) начальные условия  $x(0) = 1, y(0) = 0, z(0) = 1, \dot{x}(0) = 0, \dot{y}(0) = 1, \dot{z}(0) = 0, t = \overline{0,20}$ ;  
 б) начальные условия  $x(0) = 1, y(0) = 0, z(0) = 1, \dot{x}(0) = 1, \dot{y}(0) = 1, \dot{z}(0) = 1, t = \overline{0,20}$



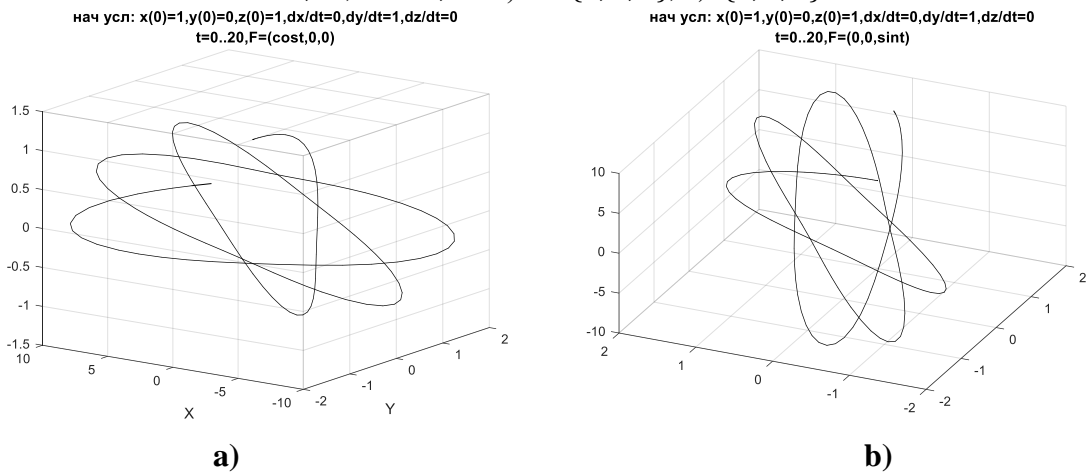
**Рис. 7. Движение при отсутствии и наличии внешнего воздействия:**

а) начальные условия  $x(0) = 1, y(0) = 0, z(0) = 1, \dot{x}(0) = 0, \dot{y}(0) = 1, \dot{z}(0) = 0, t = \overline{0, 15}, \bar{f} = 0$ ; б) начальные условия  $x(0) = -1,11, y(0) = 0,35, z(0) = -1,11, \dot{x}(0) = 0,84, \dot{y}(0) = -1,17, \dot{z}(0) = 0,84, t = \overline{15, 30}, \bar{f} = \{1, 0, 0\}$



**Рис. 8. Движение при наличии внешнего воздействия:**

Начальные условия  $x(0) = -1,06; y(0) = 0,74; z(0) = -1,06; \dot{x}(0) = -0,32; \dot{y}(0) = -0,73; \dot{z}(0) = -0,32; t = \overline{15, 30}$ : а)  $\bar{f} = \{0; 0; 1\}$ ; б)  $\bar{f} \{0; 0; 5\}$



**Рис. 9. Движение при наличии внешнего воздействия.**

Начальные условия  $x(0) = 1; y(0) = 0; z(0) = 1; \dot{x}(0) = 0; \dot{y}(0) = 1; \dot{z}(0) = 0; t = \overline{0, 20}$ : а)  $\bar{f} = \{\cos t; 0; 0\}$ ; б)  $\bar{f} = \{0; 0; \sin t\}$

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что при отсутствии внешнего воздействия модель описывает колебания, которые происходят в одной плоскости. Наличие же внешней возмущающей силы влечет за собой колебания в других плоскостях. Кроме того, наибольшее влияние на характер колебаний, по-видимому, имеет отношение масс  $\frac{m}{M}$ . Чем оно меньше, тем более сильное воздействие оказывают на водителя внешние силы.

Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации и совершенствования конструктивных элементов, потребительских и эксплуатационных параметров безрельсовых транспортных средств.

### Библиографический список

1. Бутенин, Н.В. Курс теоретической механики / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. – СПб.: Лань, 2009, – 736 с.
2. Арнольд, В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения / В.И. Арнольд. – МЦНМО, 2018, – 344 с.
3. Бухгольц, Н.Н. Основы курса теоретической механики / Н.Н. Бухгольц. – СПб.: Лань, 2009, – 480 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 26.02.2019*

L.N. Erofeeva, L.N. Mazunova

### ONE A MODEL OF THE STIMULATION OF THE VIBRATIONS IN AUTOMOBILE ELEMENTS

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

**Purpose:** The article raises the problem of undesirable fluctuations of the cabin with a driver in heavy goods vehicles.

**Design/methodology/approach:** Apparatus of theory of ordinary differential equations is used.

**Findings:** The mathematic model of the stimulation of the vibrations is given. The solution of corresponding mathematic problem is given which is accompanied by various graphs that show different movement modes of the cabin.

**Originality/value** All results are new.

*Key words:* heavy goods vehicles, vibrations, mathematical model, differential equations.

УДК 623.113 УДК 629.067

А.И. Марковнина, А.В. Папунин, В.С. Макаров, У.Ш. Вахидов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОМОЩИ ВОДИТЕЛЮ  
НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ГОРОДСКИХ ДОРОГ  
И РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВНЕДРЕНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведены теоретические и экспериментальные исследования времени задержки автомобилей в потоке, которая обусловлена временем реакции водителя на изменяющиеся условия движения. Исследование проводилось на участке ул. Надежды Сусловой города Нижнего Новгорода и показало возможность увеличения скорости и интенсивности рассматриваемого реального транспортного потока. Наблюдение за дорожной обстановкой показало зависимость времени задержки автомобиля от его положения в очереди перед перекрестком со светофорным регулированием. Была смоделирована ситуация, при которой все транспортные средства в потоке оснащены ассистентом помощи водителю при движении в дорожном заторе. Выявлено снижение задержки при внедрении ассистента. Произведен расчет экономической эффективности от внедрения системы, возможный эффект от использования которой фактически выражается в сэкономленном водителем и пассажирами времени на перемещение из некой точки города в другую.

*Ключевые слова:* скорость реакции водителя, ассистент помощи в пробке, дорожный затор, экономическая эффективность.

Внедрение интеллектуальных систем помощи водителю в мире происходит стремительными темпами. Автомобили, оснащенные подобными системами, способны не только предупреждать о возникновении опасной ситуации на дороге, но и самостоятельно предотвращать дорожно-транспортные происшествия. Вопросы о перспективности разработок интеллектуальных систем, а также беспилотных транспортных средств поднимались во многих работах [1-3].

Развитие ТС, оснащенных современными системами, призвано сократить количество ДТП, в возникновении которых существенную роль играет человеческий фактор, а именно: усталость, невнимательность и скорость реакции водителя. На скорость реакции, как показывают многие исследования, оказывает влияние большое число внешних и внутренних факторов, будь то плохие погодные условия, темное время суток или усталость (состояние) водителя. Известно, что реакцией называется ответное действие организма на внешний раздражающий фактор. К простым реакциям относятся ответные действия на единичный раздражитель (например, торможение впереди идущего автомобиля). К сложным – действие сразу нескольких факторов (например, на регулируемом перекрестке приходится следить за сменой сигналов светофора и за движением пешеходов, переходящими проезжую часть, а также следить за другим транспортом).

Продолжительность формирования реакции водителя на различные раздражители, как показали исследования, составляет:

- на торможение впереди идущего автомобиля со стоп-сигналом – 0,42 с;
- на сигналы светофора в населенном пункте – 0,40 с;
- на дорожные знаки – 0,50 с;
- на неровности на дороге – 0,80 с.

В экспертной практике принято выделять три составляющих процесса определяющих время реакции водителя:

- время обнаружения объекта, которое зависит от видимости и ширины обзора с места водителя, погодных условий;

- время, за которое водитель принимает решение о действиях, которые нужно совершить при возникновении опасности для движения;
- время с момента принятия решения до начала выполнения движения водителем (двигательной реакции) органами управления.

Время реакции водителя – это величина непостоянная, которая зависит от внешних и внутренних факторов. Для того, чтобы вывести из психического равновесия человека достаточно короткого воздействия, а электроника и механизмы изнашиваются постепенно.

В настоящее время существует большое количество систем помощи водителю: системы помощи при спуске и подъеме, система экстренного торможения, система помощи при левом повороте и ассистент проезда перекрестков.

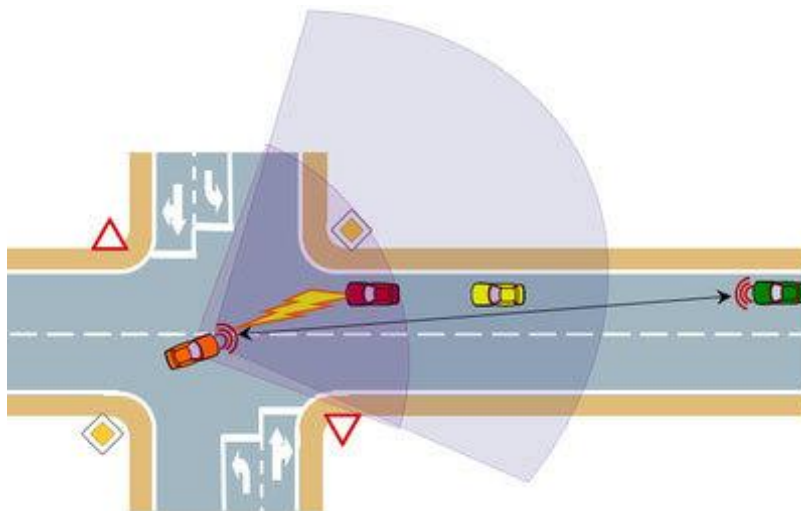


Рис. 1. Принцип действия системы помощи при повороте

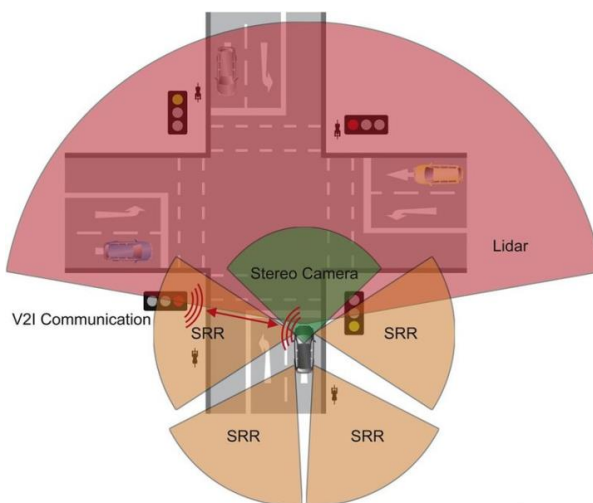


Рис. 2. Принцип действия и дальность видимости датчиков ассистента проезда перекрестков

Для проведения исследования была выбрана система Traffic Jam Assist (ассистент помощи при движении в пробке) как наиболее актуальная для городского автомобильного движения, особенно в «часы пик». Был поставлен вопрос, в каких пределах возможно увеличение скорости и интенсивности движения, если все транспортные средства из потока будут оснащены ассистентом помощи при движении в пробке, по сравнению с существующей дорожной обстановкой.

Рассматриваемая интеллектуальная система объединяет адаптивный круиз-контроль и ассистент движения по полосе, обеспечивая начало движения, плавный разгон, подруливание, торможение в пределах полосы движения. У некоторых вариаций системы (например, на автомобиле Audi A8) есть алгоритм действий в ситуации, когда автомобиль «подрезают», двигаясь близко к его передней части. У этой же модели используется допущение отсутствия необходимости держать руки на руле. В то же время у SKODA SuperbCombi это условие является обязательным. Для большинства моделей в силу низкого уровня оптического оборудования необходимо также наличие хорошего дорожного полотна с четко различимыми обозначениями на асфальте. После выезда из пробки водителю необходимо принять управление на себя. В противном случае система выдаст несколько предупреждений, а затем, не получив отклика от водителя, плавно остановит автомобиль.

При экспериментальном исследовании основным параметром выступило время задержки начала движения транспортного средства, т.е., время, проходящее с момента начала движения впереди идущего автомобиля до момента начала движения, следующего по потоку. Для проведения экспериментального исследования был выбран участок ул. Надежды Суловой в Советском районе Нижнего Новгорода на участке от д. 2 к 1 до пересечения с ул. Ванеева. Длина участка составляет 410 м, количество полос: 1 полоса в направлении от ул. Ванеева до ул. Бринского, 2 полосы в обратном направлении.

Время проведения замеров – с 7:30 до 8:30 утра, что соответствует наибольшей интенсивности транспортного потока.

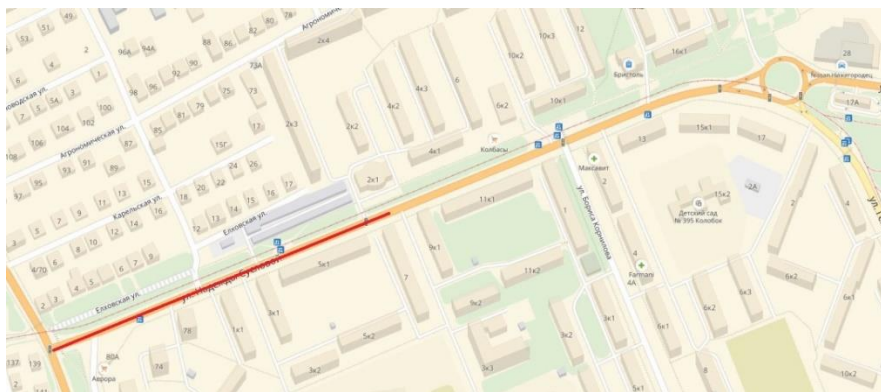


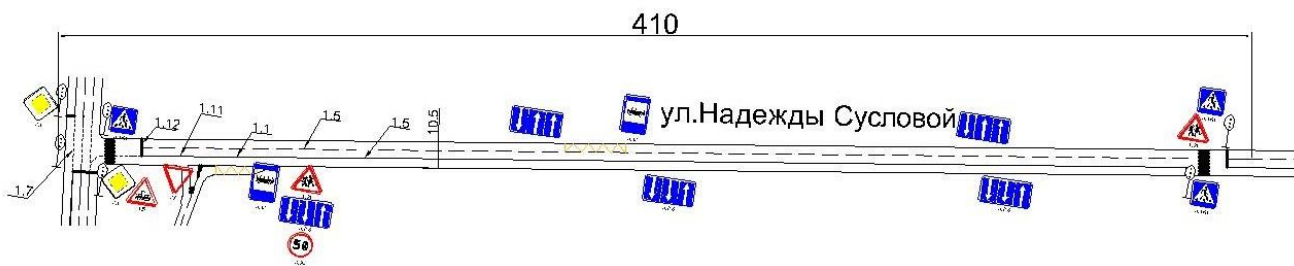
Рис. 3. Исследуемый участок, вид на Яндекс карте (дата обращения 28.03.18)



Рис. 4. Исследуемый участок на Яндекс карте, вид со спутника



Подробная схема рассматриваемого участка дороги с указанием дорожных знаков и дорожной разметки выполнена в программе AutoCAD 2007 и представлена на рис. 5.



**Рис. 5. Схема исследуемого участка дороги в среде AutoCad, с указанием дорожных знаков и дорожной разметки**

Основным исследуемым параметром было выбрано время задержки транспортного средства, то есть время, проходящее с момента начала движения первого автомобиля до момента начала движения второго, и т.д. по потоку. За начало отсчета времени по потоку, было принято начало светофорного цикла. За основу вычислений взяты значения задержки по первым шести транспортным средствам в очереди к светофору (табл. 1).

*Таблица 1*

**Задержка автомобиля в зависимости от его положения в очереди, с**

№ изм/№авто в очереди	6	5	4	3	2	1
1	0,75	1,27	1,09	0,76	0,75	-0,30
2	1,43	0,20	0,96	0,70	0,72	-0,95
3	1,46	2,07	1,97	0,20	0,50	-1,05
4	1,25	1,99	2,03	2,19	0,99	0,60
5	0,63	2,10	0,86	1,47	0,54	-0,80
6	0,50	2,99	0,46	0,93	2,40	0,50
7	0,83	2,17	1,10	1,16	1,20	-0,60
8	0,56	1,75	0,69	0,86	0,54	0,50
9	0,39	1,07	1,30	1,44	0,84	-0,30
10	0,70	2,30	1,17	0,43	0,72	-0,50
11	1,12	0,66	1,25	0,61	0,52	0,21

Отрицательные значения первого автомобиля обусловлены тем, что, как правило, водители начинают движение несколько раньше включения зеленого сигнала светофора, вовремя, когда загорается красно-желтый сигнал.

Средние значения задержки в зависимости от положения автомобилей в очереди перед светофором представлены на рис. 6. Средняя задержка по всему транспортному потоку вычисляется без учета задержки первого автомобиля, так как это значение носит единичный характер и далее по потоку отрицательного значения задержки транспортного средства не выявлено. Средняя дистанция между транспортными средствами равна 1,21 м. Для упрощения расчета допускаем дистанцию в 1,2 м. Для расчетов выбирается правая полоса движения из двух по направлению в сторону улицы Ванеева, что обуславливается большим затором по сравнению с левой полосой движения. Вводится допущение об отсутствии перестроений на рассматриваемом участке, так как во время наблюдений была выявлена закономерность, что водители перестраиваются в нужную им полосу заранее, либо в самом начале рассматриваемого участка. Во втором случае влияние перестроений незначительно, и им можно пренебречь.



Рис. 6. Средняя задержка по номеру автомобиля в очереди к светофору

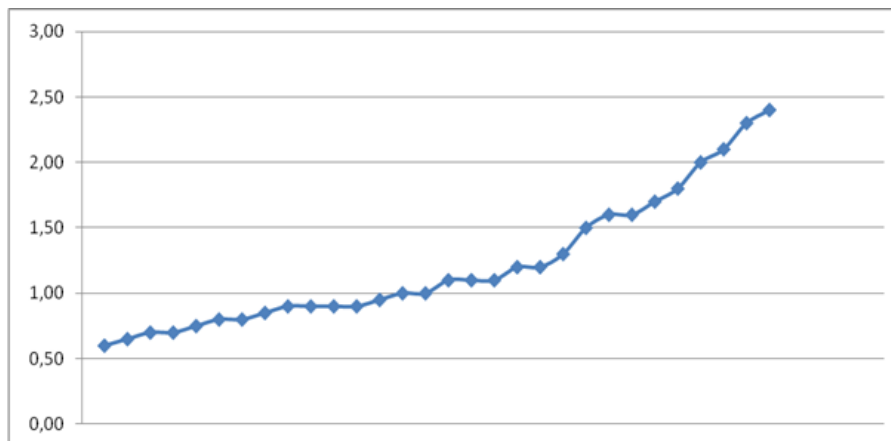


Рис. 7. Диапазон значений расстояний между автомобилями

Поскольку рассматривается одна полоса из двух, берется половинное значение всей пропускной способности. Согласно наблюдениям, потоки примерно равны, что позволяет ввести еще одно допущение о равной пропускной способности для обеих полос.

Таблица 2

#### Исходные данные для расчета

Параметр	Значение
Длина участка, м	410
Среднее время проезда участка, с	495
Дистанция, метры	1,2
Средняя длина авто, м	4,2
Задержка по потоку, с	1,36
Пропускная способность полосы	595

По формуле определим среднюю скорость по участку при отсутствии ассистента помощи в пробке в конструкции транспортных средств (1):

$$V_{ч} = \frac{S}{t_{п}}, \quad (1)$$

где  $V_{ч}$  – средняя скорость по участку транспортных средств без встроенных интеллектуальных систем, м/с;  $S$  – длина участка, м;  $t_{п}$  – полное время проезда участка без ассистента, с.

Плотность движения связана с пропускной способностью – основной характеристикой движения потока автомобилей (2):

$$P_p = V_{\text{ч}} * q, \quad (2)$$

где  $P_p$  – пропускная способность полосы, авт/ч;  $V_{\text{ч}}$  – средняя скорость по участку, км/ч;  $q$  – расчетная плотность потока, авт/км.

Для определения суммарной задержки для крайнего автомобиля в заторе необходимо количество автомобилей в пробке. Беря усредненные значения длины автомобиля и дистанции между автомобилями, можно найти необходимое число (3):

$$n = \frac{S}{L_a + L_d}, \quad (3)$$

где  $n$  – количество автомобилей на участке, шт;  $S$  – длина участка, м;  $L_a$  – длина автомобиля, м;  $L_d$  – длина дистанции между автомобилями.

Таблица 3

## Полученные значения для реального затора

$V_{\text{ч}}$	0,8 м/с, или 2,88 км/ч
$q$	207 авт/км
$n$	76 автомобилей

После проведения измерений и последующих вычислений было выявлено, что средняя скорость автомобиля на исследуемом участке длиной 410 м и расчетной плотностью потока 207 автомобилей на 1 км составила 0,8 м/с, или 2,88 км/ч. Для получения значения скорости потока при использовании на транспортных средствах ассистента помощи при движении в пробке далее вычисляется возможное время задержки, которое обусловлено особенностями электрических приборов и механизмов тормозной системы и системы питания.

Исследования показали, что время одного расчета прогнозируемой траектории движения на 5 с вперед (процессор i7, среда Win7, ОЗУ 16Гб) составляет примерно 0,05 с [1]. Относительно высокое значение дисперсии объясняется задержкой в процессе передачи данных от штатного датчика положения руля до измерительного комплекса, оцененное в 0,05 с (датчик-ЭБУ-КАN\_автомобиля-КАN\_ИМС-запись).

Суммарная задержка складывается из нескольких составляющих:

- время действия радара – отправка и получение ответного сигнала – 0,05 с;
- принятие решения центральным компьютером – 0,05 с;
- подача сигнала компьютером на механические приводы – 0,05 с;
- срабатывание механических систем, в частности тормозов – 0,1 с (рассматривается гидравлический привод).

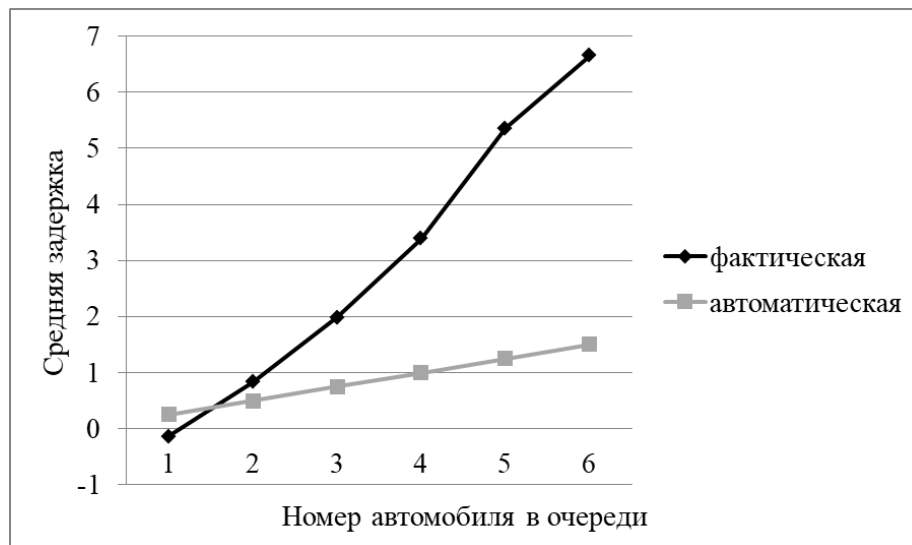
Время проезда участка складывается из непосредственного времени движения и простоя. Время простоя можно разделить на время остановки по объективным причинам (светофор, препятствие) и на время остановки по субъективным причинам – внимательность, скорость реакции, принятие решения. Таким образом, время задержки  $t_{3\text{ч}}$  принимается простоем по субъективным причинам и в процессе расчета заменяется на время задержки электроники (суммарно 0,25 с). Исключение человеческого фактора способно повысить скорость движения. Также электронное устройство самостоятельно корректирует дистанцию между транспортными средствами.

Расчет времени, которое будет затрачиваться на проезд исследуемого участка, произведен по формуле (4).

$$t_{\text{па}} = t_{\text{п}} - t_{3\text{ч}} * n + t_a * n \quad (4)$$

где  $t_{\text{па}}$  – полное время проезда участка с использованием автоматических интеллектуальных систем, с;  $t_{\text{п}}$  – полное время проезда участка без ассистента, с;  $t_{3\text{ч}}$  – время задержки человека,

$c$ ;  $t_a$  – время задержки автоматических систем помощи водителю;  $n$  – количество автомобилей в заторе.



**Рис. 8. Накопленная задержка для первых 6 автомобилей в заторе с и без использования автоматических интеллектуальных систем помощи водителю**

Получив новое время проезда участка, определим новую среднюю скорость на исследуемом участке, которая составляет 1 м/с, или 3,6 км/ч. Исходя из полученных данных, благодаря внедрению ассистента помощи при движении в пробке на рассматриваемом участке возможно увеличение скорости на 0,72 км/ч, снижение времени проезда на 84 с, увеличение пропускной способности на 148 автомобилей в час. Также возможно снижение времени задержки транспортного средства при начале движения с места в 5,44 раза, что снижает накапливаемую задержку по потоку.

Далее предлагается следующая методика расчета экономической эффективности от установки ассистента помощи при движении в пробке, основывающаяся на уровне заработной платы в исследуемом регионе – Нижегородской области. Если на исследуемом участке в 410 м было сэкономлено 84 с, то за каждый километр затора возможно сэкономить 205 с (3 мин 25 с). Средняя заработная плата по Нижнему Новгороду в марте 2018 года составила 24 500 руб. Норма рабочего времени по Трудовому Кодексу РФ составляет 160 час в месяц [4], тогда средняя стоимость часа составляет 153 руб. 13 коп., стоимость минуты, соответственно, 2 руб. 55 коп. [1]. Таким образом, экономия за каждый километр пробки составляет 8 руб. 71 коп. Предположим, что среднестатистический нижегородский рабочий ездит на работу утром и с работы – вечером и каждый день, постоянно попадая в километровый затор и туда, и обратно. В результате: 1 км затора 2 раза в день, 5 дней в неделю, 4 недели в месяц, 12 месяцев в год. Тогда всего в год нижегородский рабочий стоит в заторах 480 км. За эти километры можно сэкономить 1 224 руб. Срок службы автомобиля составляет 10 лет, за этот срок экономится 12 240 руб.

Далее, сравним стоимость оборудования автомобиля ассистентом помощи при движении в пробке и полученной ранее суммы. Для сравнения приводится автомобиль Audi A8. В базовую комплектацию не входит данный ассистент, имеется возможность установки пакета ассистирующих систем «Путешествие», включающий в себя:

- адаптивная система помощи водителю, включая ассистент движения в пробке;
- адаптивный круиз-контроль;
- ассистент сохранения полосы движения;
- ассистент поворота;
- ассистент аварийного маневрирования.

Стоимость системы на новом автомобиле на 20 января 2019 года 168 454 руб. Очевидно, что установка ассистента движения в пробке в заданных условиях водителю не выгодна. Если провести аналогичные расчеты, могут быть выявлены условия движения по городу, в которых установка ассистента будет экономически оправдана. В рассматриваемой ситуации длина затора должна составлять 4 км утром и вечером. Если рассматривать регионы с более высоким значением средней заработной платы, более высокой нагрузкой на транспортную инфраструктуру, а также тенденцию к распространению ассистирующих систем на более массовый класс автомобилей, то экономический эффект может достигать высоких значений.

Данный метод позволяет экономически оценить применение любой интеллектуальной системы помощи водителю, если эффективность применения выражается в единицах времени.

### Библиографический список

1. **Ендачев, Д.В.** Прогнозирование характеристик криволинейного движения беспилотного автомобиля / Д.В. Ендачев: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03 – М., 2016. – 185 с.
2. **Копытова, Ю.В.** Методы повышения пропускной способности дорог / Ю.В. Копытова // Молодой ученый. – 2018. – № 5. – С. 196-197.
3. **Лобанов, Е.М.** Транспортная планировка городов / Е.М. Лобанов. – М.: Транспорт, 1990. – 240 с.
4. Трудовой кодекс Российской Федерации / КонсультантПлюс. – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 15.05.2019).
5. ОДМ 218.2.020-2012. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог. – М., 2012, – 144 с.
6. СНиП 2.05.85 Автомобильные дороги. – М., – 106 с.
7. Справочник по безопасности дорожного движения: справочное пособие. – М.: РОСАВТОДОР, 2010, – 384 с.
8. Smotra.ru [Сайт]. – Режим доступа: <http://smotra.ru/en/users/tropicant/blog/114080/> (дата обращения 20.04.2018)
9. Яндекс Карты. – Режим доступа: <https://yandex.ru/maps/?clid=2270456&ll=44.005986%2C56.326887&win=332&z=11> (дата обращения 28.03.2018).
10. Carfactum.Ru [Сайт]. – Режим доступа: <http://www.carfactum.ru/2011/05/27/tehnologii-volkswagen-uidet-nevidimoe/> (дата обращения 20.04.2018).

*Дата поступления  
в редакцию: 29.03.2019*

**A.I. Markovnina, A.V. Papunin, V.S. Makarov, U.Sh. Vahidov**

**STUDYING THE INFLUENCE OF INTELLECTUAL SYSTEMS AID  
TO THE DRIVER ON THE PASSAGE OF THE URBAN ROADS  
AND CALCULATION OF THE ECONOMIC EFFECT FROM INTRODUCTION**

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

**Purpose:** This article examines the increase in the capacity of urban roads through the introduction of intelligent driver assistance systems and calculates the economic effect of the introduction of the system.

**Design / methodology / approach:** The main investigated parameter was chosen the delay time of the vehicle, then the calculation of the delay electronics. Next, the calculation of the economic efficiency of the implementation of Traffic Jam Assistant.

**Findings:** A decrease in the vehicle delay time was detected when the Traffic Jam Assistant was used when starting off by 5.44 times, which reduces the accumulated flow delay and time spent on moving.

Research limitations/implications: This study was carried out on the section of the road without a gradient, the assumption was introduced that there were no rebuildings on the section.

**Originality/value:** The results of the study of the delay of the vehicle in urban conditions at rush hour are presented, the situation of equipping the entire flow of an intelligent driver assistance system is simulated and the time saved in the simulated situation is calculated.

*Key words:* driver reaction speed, traffic jam assistant, traffic congestion, economic efficiency.

УДК 625.768.5

И.С. Никандров, А.Л. Малыгин, И.И. Дунаев, А.А. Кукушкин, В.В. Парамонов

## ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИЛЫ РЕЗАНИЯ СНЕЖНО-ЛЕДОВОЙ МАССЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Одним из факторов, сдерживающим создание эффективной техники по разрушению торосов при строительстве ледовых аэродромов для освоения Арктического шельфа является недостаток экспериментальных данных по резанию льда. В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований по резанию снежно-ледовой массы, имитирующей ледовые торосы единичным резцом. Предварительными опытами установлено, что наибольшее влияние на удельную силу резания снежно-ледовой массы оказывают:  $\alpha$ -угол резания, град;  $V_p$  – скорость резания, м/с;  $h$  – толщина снимаемой стружки, м. Эти факторы были выбраны в качестве исходных для разработки плана многофакторного эксперимента. В результате реализации центрального композиционного ортогонального плана было получено уравнение удельной силы резания снежно-ледовой массы.

Полученная зависимость является исходной и может быть использована при определении нагрузок, действующих на рабочие органы ледорезных машин при разрушении торосов.

*Ключевые слова:* снежно-ледовая масса, резание, сопротивление резанию.

### Введение

Освоение Арктического шельфа связано с необходимостью создания взлетно-посадочных полос, ледовых аэродромов, монтажа буровых платформ, прокладки инженерных коммуникаций. Одним из сдерживающих факторов реализации этого направления является наличие ледовых торосов, для разрушения которых требуется новая эффективная техника разработки льда. Большой опыт в ее создании накоплен в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева, где были созданы десятки образцов ледорезных машин [1]. Однако, несмотря на успехи в опытно-конструкторской работе в целом, на стадии проектирования отсутствовал концептуальный подход. Во многом это объясняется недостатком экспериментальных данных по резанию льда, затрудняющим создание эффективной техники.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований по резанию снежно-ледовой массы единичным резцом. Полученные данные позволят более обоснованно подойти к определению нагрузок, действующих на рабочие органы машин, разрушающих ледовые торосы.

### Экспериментальная часть

Исследования проводились на стенде, созданном на базе горизонтально-фрезерного станка. Образцы смерзшейся снежно-ледовой массы, имитирующие торосы, готовились замораживанием смеси воды и снега в формах размером 300x200x100 мм. Для резания использовались стальные резцы шириной  $B = 16$  мм с углом резания  $\alpha = 15,7 \div 64,3$  град., углом скоса режущей кромки  $\beta = 12$  град. Скорость резания менялась в пределах  $V_p = 4 \div 16$  см/с, толщина снимаемой стружки лежала в пределах  $h = 10 \div 30$  мм.

Геометрические параметры резцов и режимы резания выбирались на основании рекомендаций [2]. Для замера силы резания использовался прецизионный пресс с усилием сжатия до 5000 Н. Погрешность измерения составляла  $\pm 0,1$  %.

На рис. 1 представлена зависимость удельной силы резания от содержания доли снега в смерзшейся смеси при температуре  $t = -20^\circ\text{C}$ .

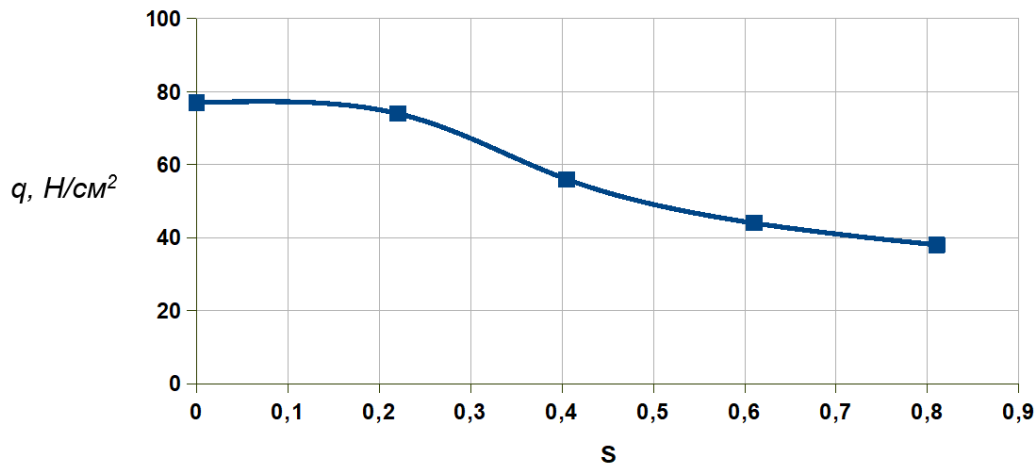


Рис. 1. Зависимость удельной силы резания ( $q, \text{Н/см}^2$ ) от доли снега ( $S$ ) в снежно-ледовой массе

Как видно из графика, с увеличением доли снега от 0 до 0,2 удельная сила снижается незначительно. При дальнейшем увеличении от 0,2 до 0,6 происходит более резкое снижение удельной силы резания, однако при дальнейшем увеличении  $S$  снижение удельной силы замедляется.

На рис. 2 представлена зависимость удельной силы резания от температуры льда (график 1) и снежно-ледовой массы (график 2).

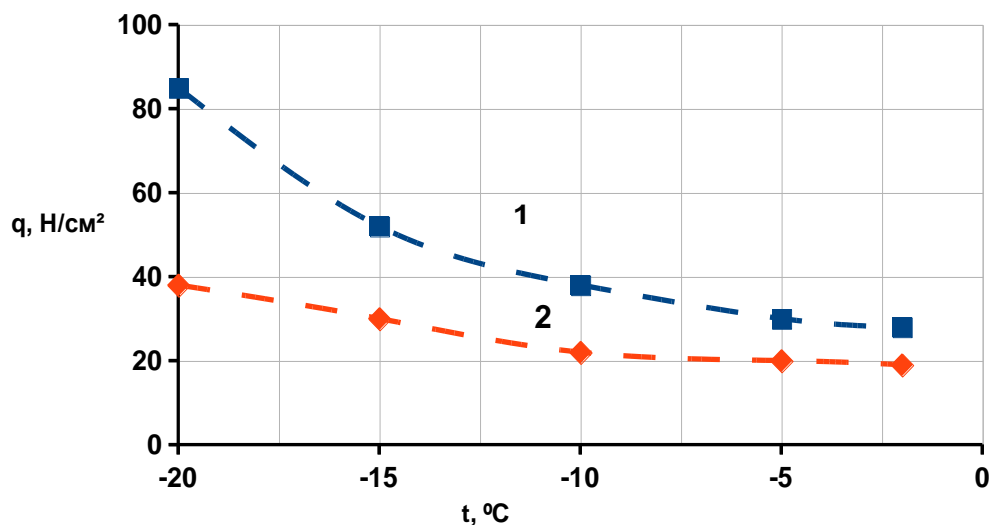
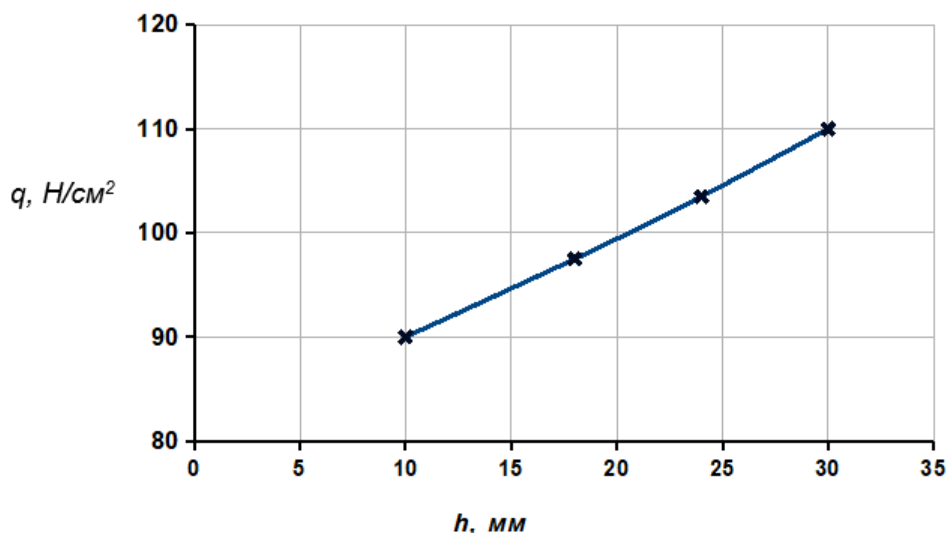


Рис. 2. Зависимость удельной силы резания ( $q, \text{Н/см}^2$ ) снежно-ледовой массы ( $S$ ) от температуры ( $t, ^\circ\text{C}$ )  
1 – лед, 2 – снежно-ледовая масса ( $S = 0,6$ )

На рис. 3 представлена зависимость удельной силы резания снежно-ледовой массы от толщины снимаемой стружки.





**Рис. 3. Зависимость удельной силы резания ( $q, \text{Н/см}^2$ ) снежно-ледовой массы ( $S$ ) от толщины снимаемой стружки ( $h, \text{мм}$ )**  
 ( $t = -15^\circ\text{C}$ ;  $V_p = 4 \text{ см/с}$ ;  $S = 0,6$ )

Предварительными экспериментами установлено, что наибольшее влияние на удельную силу резания оказывают:

- $\alpha$  – угол резания;
- $V_p$  – скорость резания;
- $h$  – толщина снимаемой стружки.

Эти аргументы были выбраны в качестве исходных факторов для разработки плана многофакторного эксперимента.

Для построения адекватной модели удельной силы резания экспериментально был реализован центральный композиционный ортогональный план, включающий 8 опытов полнофакторного эксперимента.

Величина угла скоса режущей кромки составляла  $\beta = 12$  град.; ширина реза  $B = 16$  мм; температура разрушаемого блока лежала в пределах  $t = -(19 \div 21)^\circ\text{C}$ ; доля снега в массе  $S = 0,6$ .

При этом сумма опытов равнялась (1):

$$N = N_{\text{п}} + 2n_{\text{ф}} + 1, \quad (1)$$

где  $N_{\text{п}}$  – число опытов полного факторного эксперимента (ПФЭ);  $n_{\text{ф}}$  – число действующих факторов ( $n_{\text{ф}} = 3$ );  $2n_{\text{ф}}$  – число опытов в звездных точках с координатами  $n_{\text{ф}} = 3$ .

$$\begin{pmatrix} \pm\alpha_3 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\alpha_3$  – звездное плечо, для  $n_{\text{ф}} = 3$  равно 1,215; опыт в центре плана при координатах (0-0-0).

В качестве переменных факторов нами приняты:

- $X_1$  – угол резания, град.;
- $X_2$  – глубина резания, м;
- $X_3$  – скорость резания, см/с.

Функцией отклика являлось удельное сопротивление резанию снежно-ледовой массы ( $q, \text{Н/см}^2$ ). Пределы варьирования переменных факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Варьирование переменных факторов

Условие фактора		$X_1$ , град.	$X_2$ , м	$X_3$ , см/с
Шаг варьирования		20	0,01	5
Нулевой уровень		40	0,02	10
Верхний уровень	+1	60	0,03	15
	+1,215	64,3	0,032	16
Нижний уровень	-1	20	0,01	5
	-1,215	15,7	0,008	4

## Результаты и их обсуждение

Матрица композиционного плана Хартли для  $n_{\phi} = 3$  (табл. 2).

Таблица 2

## Матрица композиционного плана Хартли

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1, X_2$	$X_1, X_3$	$X_2, X_3$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$	Значение функции отклика	
										$q_{min}$	$q_{max}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	51	56
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	87	94
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	41	44
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	96	111
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	46	50
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	114	120
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	55	61
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	37	43
9	-1,215	0	0	0	0	0	0,747	0,73	0,73	98	101
10	+1,215	0	0	0	0	0	0,747	0,73	0,73	162	167
11	0	-1,215	0	0	0	0	0,73	0,747	0,73	131	136
12	0	+1,215	0	0	0	0	0,73	0,747	0,73	140	144
13	0	0	-1,215	0	0	0	0,73	0,73	0,747	120	126
14	0	0	+1,215	0	0	0	0,73	0,73	0,747	93	96
15	0	0	0	0	0	0	0,73	0,73	0,73	95	99

После обработки результатов эксперимента получено следующее уравнение (3):

$$q = 93,8 + 14,3X_1 - 4,5X_2 - 1,1X_3 - 4,8X_1X_2 - 3,0X_1X_3 - 4,7X_2X_3 - 33,6X_1^2 + 14,3X_2^2 - 3,2X_3^2. \quad (3)$$

Проверка полученной модели на воспроизводимость с помощью критерия Кохрена по данным параллельных опытов показала положительный результат. После отсева малозначительных коэффициентов с помощью критерия Стьюдента [3] уравнение математической модели удельной силы резания снежно-ледовой массы единичным резцом приобрело следующий вид (4):

$$q = 93,8 + 14,3X_1 - 4,5X_2 - 4,8X_1X_2 - 4,7X_2X_3 - 33,6X_1^2 + 14,3X_2^2, \quad (4)$$

или после перевода кодированных переменных в физические величины (5):

$$q = 219,4 + 71,7\alpha + 510h - 29,5ah - 94hV_p - 0,084\alpha^2 + 463000h^2. \quad (3)$$

## Заключение

Полученная зависимость является исходной и может быть использована в разработке вычислительных алгоритмов и программ для определения нагрузочных характеристик рабочего органа. Это позволит обоснованно подойти к методике выбора рациональных конструктивных и режимных параметров ледорезных машин для разрушения торосов.

## Библиографический список

1. Николаев, А.Ф. Исследование и комплекс машин для разработки мерзлых грунтов, льда и снега / А.Ф. Николаев. – Горький, 1967, – 164 с.
2. Горшков, А.С. Резание смерзшейся грунто-ледяной массы клиновым резцом / А.С. Горшков, В.Ф. Кулепов, А.Д. Шурашов, И.С. Никандров // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №6.
3. Красовский, Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Фиалковский. – Минск: изд-во БГУ им. В. И. Ленина, 1982, – 302 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 25.04.2019*

I.S. Nikandrov, A.L. Malygin, I.I. Dunaev, A.A. Kukushkin, V.V. Paramonov

## THE CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE CUTTING FORCE OF THE SNOW-ICE MASS

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

**Purpose:** to determine the loads acting on the working bodies of ice-cutting machines in the destruction of hummocks.  
**Design/methodology / approach:** the study of physical models on the ground and the construction of a mathematical model based on the results of experimental studies.  
**Findings:** the Obtained dependence is the initial one and can be used to determine the loads acting on the working bodies of ice-cutting machines in the destruction of hummocks.  
**Research limitations/implications:** the results of experimental studies on cutting snow and ice mass with a single cutter will allow a more reasonable approach to determining the loads acting on the working bodies of machines that destroy ice hummocks.  
**Originality /value:** for the first time, the dependence of the specific cutting force on the content of the proportion of snow in the frozen mixture, on the ice temperature, on the thickness of the chip removed.

*Key words:* snow-ice mass, cutting, cutting resistance.

УДК 621.43.057

С.А. Плотников<sup>1</sup>, П.Я. Кантор<sup>1</sup>, А.С. Зубакин<sup>1</sup>, М.Н. Втюрина<sup>2</sup>**О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ  
НА ГЕНЕРАТОРНОМ ГАЗЕ**Вятский государственный университет<sup>1</sup>  
Вятская государственная сельскохозяйственная академия<sup>2</sup>

Объектом исследования является топливная смесь, состоящая из бензина и генераторного газа. Цель – исследование влияния молекулярного состава горючих компонентов на характер процесса их сгорания, методологическая основа – системный анализ. В качестве основной задачи можно обозначить теоретические расчеты времени сгорания смеси бензина с генераторным газом. Определены оптимальные значения угла опережения зажигания искрового двигателя. На основе теоретического анализа происходящих процессов предложено выражение для оценки времени сгорания капли бензина. Расчеты показывают, что при прочих равных условиях время сгорания генераторного газа в цилиндре двигателя оказывается несколько больше времени сгорания бензина, что приводит к необходимости увеличения угла опережения зажигания (УОЗ). Данные расчетов проверены экспериментально на двигателе 1Ч 6,3/5,4. Установлены фактические значения оптимальных УОЗ для каждого вида топлива.

*Ключевые слова:* генераторный газ, бензин, зажигание, двигатель, процесс сгорания, токсичные компоненты.

Использование генераторного газа в качестве моторного топлива для ДВС впервые упоминается в конце XIX в. В настоящее время генераторный газ является реальной альтернативой товарному моторному топливу в отдаленных районах нашей страны, где доставка традиционного топлива является достаточно затратной. Особенно экономически выгодно использовать генераторный газ, полученный из отходов лесопиления, сельскохозяйственного производства и т.п. [1]. Как отмечается многими исследователями, падение развиваемой мощности двигателем достигает 50 % при работе на генераторном газе [1-3]. Известны различные способы компенсации этого эффекта, например, повышение степени сжатия, увеличение сечения впускного тракта, установка оптимального УОЗ. Наиболее перспективна работа на смесях бензина и генераторного газа. Особенно актуальным является такой способ при работе двигателя в нестационарных режимах (пуск, перегрузка, переходные режимы). Процесс сгорания чистого генераторного газа, как и смеси генераторного газа и бензина, не описан в научной литературе и требует дальнейших теоретических и практических исследований. На основании изложенного можно сформулировать цель: изучение процесса сгорания генераторного газа, его смеси с бензином.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

- предопределить химические аспекты сгорания различных видов топлива;
- установить теоретически оптимальные значения угла опережения зажигания (УОЗ) для каждого вида топлива;
- подтвердить или опровергнуть теоретические предпосылки путем исследования процесса сгорания;
- сделать выводы на основании полученных результатов.

**Теоретическая часть**

Сгорание генераторного газа отличается от сгорания бензина вследствие различного химического состава (табл. 1) и агрегатного состояния. Как известно, основными горючими

компонентами ГГ являются водород  $H_2$  и монооксид углерода  $CO$ , содержание которых составляет, соответственно, 12...20 % и 17...32 % по объему. Известно также, что «процесс превращения» исходных углеводородов в конечные продукты горения –  $CO_2$  и  $H_2O$  разделен на две стадии [3, с. 45]:

- на первой, протекающей с очень высокой скоростью, происходит окисление углеводородов до  $CO$ ;
- на второй, медленной стадии,  $CO$  окисляется до  $CO_2$ .

Таблица 1

Химический состав генераторного газа

Наименования сырья	Горючие компоненты, %				Балласт, %		
	$H_2$	$C_nH_m$	$CO$	$CH_4$	$O_2$	$N_2$	$CO_2$
Древесные чурки, $\omega=20\%$	14-18	0,1-0,3	18-22	2,1-2,5	1,4-1,8	48-52	8-10

Основная цель настоящего исследования состоит в качественном объяснении этого эффекта. Отметим некоторые особенности молекулярного строения  $H_2$  и  $CO$ , обуславливающие их особенности, как горючих веществ. Обе молекулы весьма прочны. Известно, что энергия связи молекулы водорода составляет 432 кДж/моль, энергия активации процесса окисления 242 кДж/моль [4]. Энергия связи молекулы монооксида углерода составляет 1069 кДж/моль, энергия активации – 201 кДж/моль. Прочность молекулы  $CO$  обусловлена наличием тройной связи между атомами углерода и кислорода: две ковалентные связи образованы за счет спаривания двух  $p$ -электронов атома кислорода с аналогичными электронами атома углерода, третья связь создана неподеленной электронной парой атома кислорода по донорно-акцепторному механизму. Реакция горения водорода и монооксида углерода инициируется следующими процессами (1), (2):



Константа  $k$  скорости химической реакции обычно определяется уравнением Аррениуса (3):

$$k = Ae^{-\frac{E}{RT}}, \tag{3}$$

где  $E$  – энергия активации;  $T$  – абсолютная температура;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $A$  – предэкспоненциальный множитель, характеризующий эффективность столкновений молекул реагирующих веществ.

Согласно данным исследований, для реакции (2) значение множителя  $A$  равно  $2,5 \cdot 10^{12}$  см<sup>3</sup>/(моль×с) [4, 5]. Скорость реакции определяется как:

$$\frac{dC}{dt} = C_1 C_{O_2} k = C_1 C_{O_2} Ae^{-\frac{E}{RT}}, \tag{4}$$

где  $C_1$  – концентрация горючего (водорода или монооксида углерода);  $C_{O_2}$  – концентрация кислорода.

Применительно к процессам, происходящим в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, выражение (4) следует расценивать как сугубо оценочное, пригодное только для ориентировочных оценок времени горения по следующим причинам. Во-первых, температура газа в процессе сгорания топлива возрастает приблизительно в 2,5 раза, что, вследствие вышеуказанной экспоненциальной зависимости, приводит к возрастанию скорости реакции на несколько порядков. Во-вторых, процесс горения развивается по цепному механизму, в котором важнейшую роль играют свободные радикалы (1) и (2). Это обстоятельство также приводит к существенному росту скорости реакции по сравнению с (3). Попытки детального анализа про-

цесса горения углеводородов с количеством атомов углерода от 7 до 16 приводят к необходимости рассмотрения около 8 000 элементарных реакций [6], что, в свою очередь, требует чрезвычайно больших объемов вычислительной работы. Ситуация осложняется еще и тем, что для многих из элементарных реакций отсутствует надежная информация относительно констант их скоростей.

Согласно данным исследований, энергия активации для паров бензина составляет 78,5...80 кДж/моль [7], что в 2,5 раза меньше энергии активации для монооксида углерода. При этом предэкспоненциальный множитель в (3), определяемый эффективными сечениями взаимодействующих молекул, для реакций горения водорода, монооксида углерода и паров бензина должен быть одинаковым по порядку величины. Однако многократного увеличения скорости сгорания бензина по сравнению с генераторным газом, которого следовало бы ожидать вследствие экспоненциальной зависимости от энергии активации, не происходит. Это связано, по-видимому, с тем, что испарение капель бензина, диаметр которых, по данным разных источников, составляет от 0,02 мм до 0,2 мм, представляет собой достаточно медленный процесс, лимитирующий скорость его сгорания. Для оценки времени испарения капли бензина воспользуемся результатами исследований [8]. Согласно экспериментальным данным, скорость испарения капли жидкого углеводорода, определяемая производной квадрата ее диаметра по времени, в зависимости от температуры при  $T \geq 650$  К носит приближенно линейный характер [8]. Экстраполируя указанную зависимость на область температур, характерных для процесса горения бензина, получаем, что при  $T = 2200$  К скорость уменьшения квадрата диаметра капли равна (5):

$$K = \left| \frac{d(d^2)}{dt} \right| = 4,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (5)$$

Для оценки времени  $\tau$  испарения капли бензина, практически равного, согласно вышесказанному, времени ее сгорания, примем начальный диаметр капли равным  $d_0 = 0,065$  мм, что согласуется с данными относительно характера распыления топлива при низких давлениях [9, с. 44]. Тогда предварительную оценку времени сгорания можно провести по следующему выражению (6):

$$\tau = \pi d_0^2 / K. \quad (6)$$

Подсчитанное по выражению (6) значение времени сгорания для бензина будет равно  $\tau = 0,0031$  с. Сочетание вышеуказанных факторов приводит к тому, что при прочих равных условиях время сгорания генераторного газа в цилиндре двигателя оказывается несколько больше времени сгорания бензина. Это обстоятельство приводит к необходимости увеличения угла опережения зажигания (УОЗ) при работе двигателя на генераторном газе. Нами был проведен расчет сравнительного промежутка времени процесса сгорания в цилиндре искрового двигателя при его работе на чистом бензине, чистом ГГ и смеси, содержащей 30 % бензина и 70 % ГГ. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

#### Данные расчета сравнительного промежутка времени процесса сгорания

Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Состав смеси	Время сгорания, с
3000	Бензин – 100%	0,0031
3000	30%Б + 70%ГГ	0,0036
3000	Генераторный газ -100%	0,0039

Расчеты показывают, что для заданных условий работы двигателя время сгорания генераторного газа по сравнению с аналогичным значением для чистого бензина увеличивается

примерно на 0,001 с. Для случая использования смеси, содержащей 30 % бензина и 70 % генераторного газа, это увеличение составляет 0,0005 с.

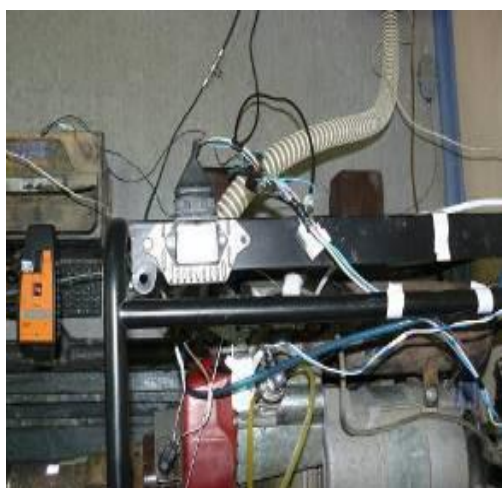
Таким образом, если при работе двигателя на чистом бензине оптимальное значение УОЗ равно  $27^\circ$ , то, с учетом данных расчетов, для нормальной работы искрового ДВС на чистом ГГ значение УОЗ должно составлять приблизительно  $38...42^\circ$ . В случае же использования смеси, содержащей 30 % бензина и 70 % ГГ значение УОЗ должно составлять  $34...36^\circ$ .

### Методика проведения эксперимента

Определение оптимального угла опережения зажигания проводилось в соответствии с ГОСТ 14846-81 «Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний» (СТ СЭВ 765-77) по регулировочным характеристикам при постоянной частоте вращения  $3000 \text{ мин}^{-1}$  и постоянном положении дроссельной заслонки. Все испытания проводились при стандартных атмосферных условиях, температуре и плотности топлива.

### Экспериментальная часть

Для определения оптимального значения УОЗ на различных видах топливах на одноцилиндровый двигатель воздушного охлаждения 1Ч 6,3/5,4 в составе лабораторного стенда, была установлена система электронного зажигания высокой мощности (рис. 1). Данная система позволяет изменять значение УОЗ при работе двигателя в пределах  $\pm 90^\circ$  от ВМТ. Программный комплекс DiaMag-2, в составе которого присутствует восьмиканальный осциллоскоп, позволял одновременно получать информацию по 8 каналам, а также производить запись получаемого сигнала в память ПЭВМ. Данные давали возможность графически оценить момент образования искры на диаграмме давления, что значительно облегчало анализ полученных данных [10]. За основу конструкции был использован датчик-распределитель 40.3706 с датчиком Холла. Для визуального контроля угла опережения зажигания и предварительной настройки на передней части был закреплен угломер. На переднем носке коленчатого вала был установлен датчик положения ВМТ для обеспечения работы программного комплекса DiaMag-2.



а)



б)

**Рис. 1. Общий вид модернизированной системы зажигания (а) и регулируемый датчик-распределитель с датчиком Холла (б)**

### Результаты и выводы

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Работа искрового ДВС возможна на бензине, генераторном газе, а также их смеси.
2. Значение оптимального УОЗ для двигателя 1Ч6,8/5,4 при его работе на бензине должно находиться в пределах 26...28° до ВМТ, на ГГ – 38...42° до ВМТ, и при работе на смеси, содержащей 30 % бензина и 70% ГГ – 34...36° до ВМТ, соответственно.
3. Фактические значения оптимальных УОЗ: для бензина – 26°, для ГГ – 40°, для смеси, содержащей 30 % бензина и 70 % ГГ – 36°.

### Библиографический список

1. **Плотников, С.А.** Определение количественных характеристик двигателя бытовой электростанции при использовании генераторного газа в качестве альтернативного топлива / С.А. Плотников и др. // Problemele Energeticii Regionale Termoenergetica. – № 2 (34). – 2017. – С. 105-111.
2. **Зубакин, А.С.** Определение оптимального угла опережения зажигания двигателя 1Ч 6,8/5,4 при работе на генераторном газе и смеси бензина и генераторного газа. / А.С. Зубакин, А.С. Кузнецов // Успехи современной науки. – №7. – 2017. – С. 132-163.
3. **Корольченко, А.Я.** Процессы горения и взрыва / А.Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2007. – 266 с.
4. **Гардинер, У.** Химия горения / У. Гардинер. – М.: Мир, 1988. – 464 с.
5. **Басевич, В.Я.** Кинетика «голубых» пламен при газозоном окислении и горении углеводородов и их производных / В.Я. Басевич, С.М. Фролов // Успехи химии. – № 76 (9). – 2007. – С. 927-944.
6. **Басевич, В.Я.** Механизмы окисления и горения нормальных парафиновых углеводородов: переход от C<sub>1</sub>-C<sub>10</sub> к C<sub>11</sub>-C<sub>16</sub> / В.Я. Басевич и др. // Химическая физика. – Т. 32. – № 4. – С. 1-10.
7. **Шишков, В.А.** Алгоритм определения угла опережения зажигания при переключении с бензина на газ для контроллера электронной системы управления двигателем // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 13. – №4. – 2011. – С. 235-240.
8. **Селиванов, С.Е.** Кинетика испарения капель жидких топлив / С.Е. Селиванов, М.И. Кулик // Вестник ХНАДУ. – Вып. 52. – 2011. – С. 105-109.
9. **Кутовой, В.А.** Впрыск топлива в дизелях / В.А. Кутовой. – М.: Машиностроение, 1981. – 120 с.
10. **Плотников, С.А.** Анализ процесса сгорания генераторного газа и его смеси с бензином в поршневом двигателе / С.А. Плотников, А.С. Зубакин // Двигателестроение. – 2018. – № 3. – С. 14-18.

*Дата поступления  
в редакцию: 10.04.2019*

**S.A. Plotnikov<sup>1</sup>, P.Y. Kantor<sup>1</sup>, A.S. Zubakin<sup>1</sup>, M.N. Vtyurina<sup>2</sup>**

### ABOUT SOME FEATURES OF WORK OF THE ENGINE ON GENERATING GAS

Vyatka state University<sup>1</sup>  
Vyatka state agricultural academy<sup>2</sup>

**Object** of research is the fuel mix consisting of gasoline and generating gas. Research problems were theoretical calculations of time of combustion of a mix of gasoline with generating gas.

**The purpose was research** of influence of molecular structure of combustible components on character of process of their combustion.

**Methods** of the present{true} researches were theoretical calculations and the system analysis.

**Carried out researches** and their analysis have allowed to define{determine} optimum values of a corner of an advancing of ignition of the spark engine.

*Key words:* generator gas, gasoline, ignition, engine, combustion process, toxic components.



УДК 629.113

Д.М. Порубов, А.В. Пинчин, Д.Ю. Тюгин, А.В. Тумасов, П.О. Береснев, В.В. Беляков

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УДЕРЖАНИЯ В ПОЛОСЕ ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ КОММЕРЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

Представлена система удержания транспортного средства в полосе движения, предназначенная для функционирования в сложных дорожно-климатических условиях на территории Российской Федерации. Данная система помощи водителю, разработанная на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева, имеет огромное значение для повышения безопасности движения колесных транспортных средств – ведущего тренда мировой автомобильной промышленности. Предложен компонентный состав системы удержания в полосе движения, разработаны алгоритмы и программное обеспечение модуля распознавания дорожной разметки и определения выхода из полосы движения. Представлены результаты испытания системы, разработки алгоритмов и программного обеспечения для управления электромеханическим усилителем рулевого управления.

*Ключевые слова:* система помощи водителю, система удержания в полосе движения, рулевое управление с электромеханическим усилителем.

### Введение

Повышение безопасности дорожного движения колесных транспортных средств за счет внедрения интеллектуальных систем является одним из приоритетных направлений развития автомобильной отрасли. Пассивные и активные системы помощи водителю (ADAS) используются для предотвращения ДТП, возникающих в результате ошибок водителя или уменьшения последствий. Одним из видов ADAS являются системы, обеспечивающие контроль движения транспортного средства в полосе, предотвращая непреднамеренный выезд из полосы движения. Согласно статистике ГИБДД, в РФ с января по июнь включительно в 2018 году произошло 5 874 аварий со смертельным исходом, произошедших из-за выезда водителями на встречную полосу движения – в них погибли 1 868 чел. [1]. В связи с этим актуализируется вопрос о возможности решений в отношении систем, обеспечивающих контроль движения транспортного средства в полосе.

### Обзор систем помощи водителю

Для сокращения числа аварий, связанных с непреднамеренным выездом из занимаемой полосы движения, к настоящему времени многие автопроизводители оснащают выпускаемые транспортные средства системами предупреждения о выходе из полосы движения и системами удержания в полосе движения.

Производитель Kia [2] оснащает свои автомобили системой предупреждения о сходе с полосы движения (LDWS – Lane Departure Warning System). Электронный блок управления системой с помощью видекамеры фиксирует видеопоток, обрабатывает данную информацию, распознает дорожную разметку, определяет положение транспортного средства (ТС) между линиями дорожной разметки и контролирует непреднамеренный выход из занимаемой полосы движения. При непреднамеренном смещении с полосы движения (не включен соответствующий сигнал поворота) система предупреждает водителя об этом и оповещает звуковым сигналом или индикацией на приборной панели. Система работает при скорости движения автомобиля более 60 км/ч и при ширине полосы движения от 2,5 до 5,0 м.

Автомобильный производитель Volkswagen AG [3] комплектует свои автомобили системой удержания в полосе движения (Lane Assist). Электронный блок управления на основе

информаций, поступающей от видеокамеры, данных о траектории движения автомобиля, оценивая действия водителя, предупреждает о сходе с полосы движения звуковым сигналом или вибрацией рулевого колеса. Если водитель не предпринимает никаких действий, Lane Assist вмешивается, плавно корректируя движение автомобиля с помощью электроусилителя рулевого управления. Величина корректирующего момента не превышает 3 Нм, поэтому достаточно небольшого усилия со стороны водителя для его преодоления. Система удержания в полосе движения работает на скорости более 65 км/ч. При скорости движения ниже 60 км/ч Lane Assist переходит в пассивный режим работы. При пассивном режиме работы камера продолжает следить за дорогой и отправляет полученные данные на блок управления, но корректирующее воздействие на рулевое управление и подача предупредительных сигналов не производятся. Для устранения запотевания окна камеры и для удаления обледенения система удержания в полосе движения оснащена нагревательным элементом, выполненным в виде резистивной пленки, наклеенной непосредственно на ветровое стекло.

Другим производителем, оснащающим свои автомобили системой удержания в полосе движения, является Mazda [4]. Система LAS (Lane Keep Assist System) имеет схожий функционал с системой Lane Assist (Volkswagen AG), но предусматривает несколько вариантов («поздняя» и «ранняя») настройки момента срабатывания корректирующего воздействия. При выборе «поздней» настройки момента срабатывания система оказывает корректирующее воздействие на рулевое колесо в том случае, если существует опасность отклонения автомобиля от полосы движения. Если выбрана «ранняя» настройка момента срабатывания, система оказывает корректирующее действие на рулевое колесо непрерывно, помогая удерживать автомобиль посередине полосы движения. Еще одним производителем, комплектующим свои автомобили системой удержания в полосе движения, является Mercedes-Benz [5]. Главным отличием от вышеперечисленных систем является реализация корректирующего воздействия с помощью тормозной системы. При непреднамеренном отклонении от полосы движения производится кратковременное одностороннее тормозное действие, таким образом корректируется движение автомобиля относительно центра полосы.

Необходимо отметить, что системами удержания в полосе движения и предупреждения о непреднамеренном выезде из занимаемой полосы движения комплектуются легкие коммерческие автомобили (Light commercial vehicles (LCV)) различных марок Volkswagen AG, Mercedes-Bens, Ford, Citroen и т. д. Это обусловлено, существующей тенденцией повышения безопасности грузопассажирских перевозок, а также большей усталостью водителя (относительно личного транспорта) при выполнении соответствующих работ. Для оценки существующих тенденций развития перечисленных систем проведем бенчмаркинг существующих решений на рынке для легких коммерческих транспортных средств.

Проведенный бенчмаркинг в сегменте LCV представлен в табл. 1. На основе проведенного обзора систем можно сделать вывод, что существующие системы предупреждения о непреднамеренном выезде из занимаемой полосы движения и системы удержания в полосе движения имеют схожую компонентную базу. Стоит отметить, что автомобили фирмы VW и MB имеют в составе систему удержания в полосе движения. Для остальных рассмотренных ТС имеется только система оповещения о не преднамеренном выходе из полосы движения. Все производители используют в качестве сенсора – видеокамеру. Минимальная скорость движения для работы систем у большинства ТС составляет 60 км/ч. Работа систем предупреждения о непреднамеренном выезде из занимаемой полосы движения и удержания в полосе движения на всех автомобилях может быть неправильной в сложных погодных условиях. На автомобилях фирмы Ford и Citroen информирование водителя происходит звуковым сигналом и индикацией на приборной панели, на остальных ТС присутствует вибрация рулевого колеса. На всех ТС видеокамера расположена на верхней части ветрового стекла.

Таблица 1

**Бенчмаркинг систем предупреждения о сходе с полосы движения  
и удержания в полосе движения**

Функции	Fiat[6]	Ford[7]	MB[5]	Citroen[8]	VW[3]
Сенсор	Видеокамера	Видеокамера	Видеокамера	Видеокамера	Видеокамера (монохромная)
Минимальная скорость движения	60	65	60	60	65
Работа в сложных погодных условиях	Возможна неправильная работа системы				
Функция автоматического корректирования траектории движения ТС	–	–	+	–	+
Метод удержания в полосе	Только информирование	Только информирование	Тормозная система	Только информирование	Рулевое управление
Методы передачи информации	Визуальный и звуковой	Визуальный, звуковой и тактильный	Визуальный, звуковой и тактильный	Визуальный и звуковой	Визуальный, звуковой и тактильный
Место расположения камеры	Верхней части ветрового стекла				

На следующем этапе необходимо оценить существующие нормативные документы в данной области, а также выявить основные положения, определяющие целевые показатели системы (минимальная скорость, радиус кривизны дороги, ширина полосы движения и т.д.)

### Нормативные документы и проблемы адаптации ADAS систем в РФ

Разработку и сертификацию систем предупреждения о сходе с полосы движения и удержания в полосе движения производят по следующим нормативным документам: система предупреждения о выходе транспортного средства из полосы движения (LDWS), правила ЕЭК ООН № 130 [9], ISO 17361 [10]. Согласно правилам ЕЭК ООН № 130, система предупреждения о сходе с полосы движения должна предупреждать водителя о непреднамеренном пересечении транспортным средством видимой разметки полосы движения на дороге с минимальным радиусом внутренней полосы движения 250 м и передавать видимый для водителя сигнал предупреждения.

Испытания работы системы, согласно правилам ЕЭК ООН № 130, должны проводиться в следующих условиях:

- на гладкой, сухой асфальтовой или бетонной поверхности при температуре окружающей среды в диапазоне 0°C – 45°C;
- на полосу движения должна быть нанесена видимая маркировка (разметка) в надлежащем состоянии и из материалов, соответствующих стандарту видимой маркировки полосы движения;

- условия видимости должны быть приемлемыми для безопасного движения на требующейся испытательной скорости;
- вес автомобиля и распределение массы по осям может быть любыми, но не превышающим максимальных значения, указанных в технических характеристиках автомобиля;
- испытания проводятся при значениях давления в шинах, рекомендованных изготовителем транспортного средства.

Система удержания транспортного средства в занимаемой полосе движения – Правила ЕЭК ООН № 79–04 [11], ISO 11270 [12], SAE J3048 [13]. Согласно данным правилам, система удержания в полосе движения должна исключать пересечение автомобилем разметки полосы движения, иметь устройство активации и деактивации и позволять водителю деактивировать однократным воздействием. Условия испытаний системы удержания в полосе движения такие же, как при испытании системы предупреждения о сходе с полосы движения, согласно правилам ЕЭК ООН № 130.

По результатам анализа нормативных документов был выявлен ряд проблем, затрудняющий функционирование вышеуказанных систем на территории РФ:

- допускаемое значение кривизны дороги 250 м, указанное в Правилах ЕЭК ООН № 130, при котором система должна предупреждать водителя о пересечении разметки, не может гарантировать безопасность и высокую эффективность работы системы в условиях дорожной инфраструктуры РФ, где допускается радиус кривизны 150 м;
- температура окружающей среды при испытаниях систем, согласно правилам ЕЭК ООН № 130, должна находиться в диапазоне 0°C – 45°C; значительную часть времени на территории РФ температура окружающего воздуха находится в диапазоне ниже 0 °C;
- для целей испытания на официальное утверждение, упомянутого в пунктах 6.2.3 (Видимая маркировка полосы движения) и 6.5 (Испытание на предупреждение о выходе из полосы движения) настоящих Правил, ширина полосы движения не должна превышать 3,5 м. В РФ на дорогах I и II категории ширина полосы составляет 3,75 м, на дорогах V категории ширина полосы – 4,5 м.

Необходимо отметить, что система предупреждения о сходе с полосы движения к настоящему времени обязательна в странах Европейского Союза при получении одобрения типа транспортного средства для категорий N2, M2 [14], а также для регистрации транспортных средств категорий N2, M2.

Из проведенного анализа систем и нормативных документов видно, что системы предупреждения о сходе с полосы движения и системы удержания в полосе движения являются востребованными на рынке легковых транспортных средств, а также, согласно требованиям нормативных документов, являются обязательными при выпуске коммерческого транспорта. При этом на рынке отсутствуют Российские компании – разработчики ADAS систем. Таким образом, существует экономическая и социальная потребность в отечественной разработке систем предупреждения о выходе из занимаемой полосы движения и удержания в полосе движения, которые должны функционировать в дорожно-климатических условиях РФ с учетом минимального радиуса кривизны дорожной разметки 150 м и ширины полосы движения от 2,75 до 4,5 м.

### **Разработка ADAS, учитывающей кривизну траектории в РФ**

Предлагаемая к разработке система удержания в полосе движения состоит из модуля распознавания дорожной разметки и определение выхода из полосы движения, а также модуля корректировки траектории движения ТС по полосе.



При включении зажигания блок управления производит самодиагностику системы рулевого управления (РУ) за счет опроса различных типов датчиков (датчик положения руля, крутящего момента на рулевом колесе, датчик положения вала электродвигателя и т.д.) При обнаружении неисправности происходит поиск источника неисправности и попытка ее устранения. Если неисправность не устранена, ЭБУ переключает систему РУ в аварийный режим. В данном режиме происходит обесточивание электродвигателя и датчиков, поворот управляемых колес осуществляется водителем за счет механического соединения рулевого колеса и оповещает водителя об ошибке индикацией на приборной панели. Если по окончании самодиагностики неисправностей не обнаружено, производится калибровка системы, определяется положение рулевого колеса и колес управляемой оси. В случае возникновения ошибок при калибровке производится информирование водителя и повторная самодиагностика и калибровка. При успешной калибровке блок управления системой РУ активирует режим усилителя, в котором при повороте рулевого колеса водителем реализуется вспомогательное усилие за счет электродвигателя. Изменение вспомогательного усилия производится в зависимости от скорости движения транспортного средства и регулируется в зависимости от силы тока, подаваемого от блока управления системой РУ электродвигателю. Производится постоянная диагностика системы ЭУР. При возникновении неисправности блок управления переводит ЭУР в аварийный режим с оповещением водителя. В случае необходимости внешнего управления (от системы удержания в полосе движения) электронный блок управления переключается в режим внешнего управления и производит поворот управляемой оси на заданный угол. При воздействии водителя на рулевое колесо ЭБУ перейдет в режим работы управления водителем. В случае неисправности блок управления проверяет возможность ее устранения и переводит ЭУР в аварийный режим с оповещением водителя, если неисправность не может быть устранена. Алгоритм работы электронного блока управления системы рулевого управления, позволяющий реализовать вышеуказанные режимы работы, представлен на рис. 2.

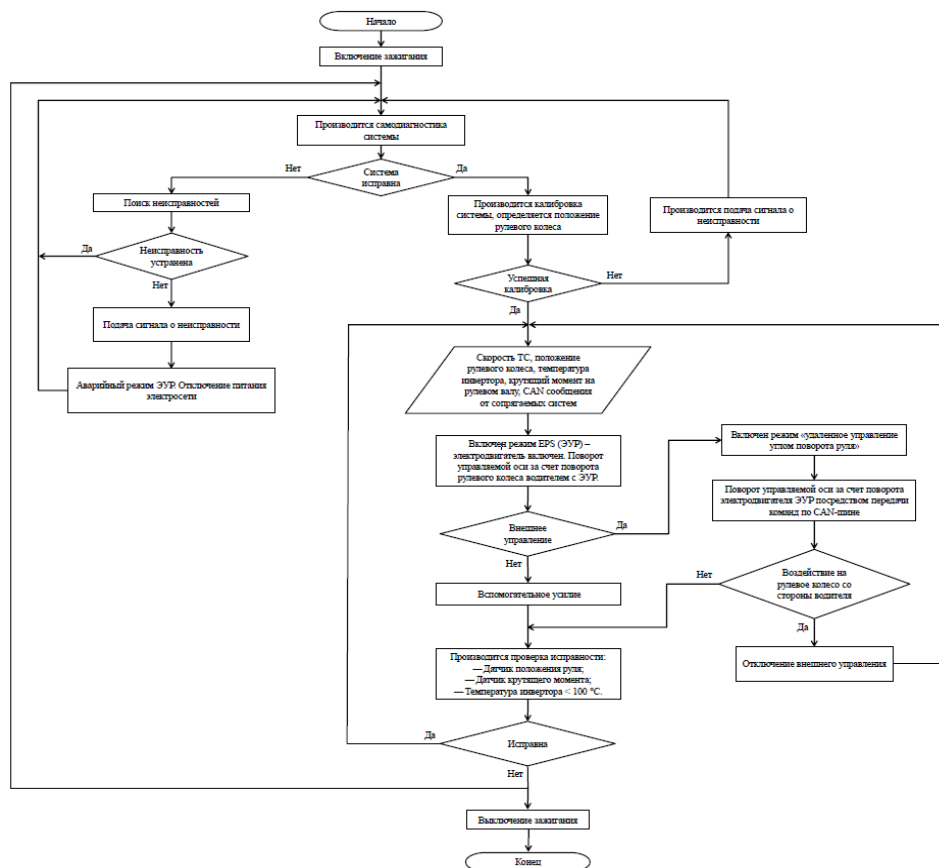


Рис. 2. Алгоритм работы электронного блока управления системы рулевого управления

По вышеуказанному алгоритму было реализовано программное обеспечение для управления электромеханическим усилителем рулевого управления с возможностью внешнего управления для реализации системы удержания в полосе движения. На данный момент система проходит испытания и доработку. Разработанный блок управления электроусилителем рулевого колеса представлен на рис. 3. Алгоритмы, описанные выше, интегрированы в разработанный блок управления.

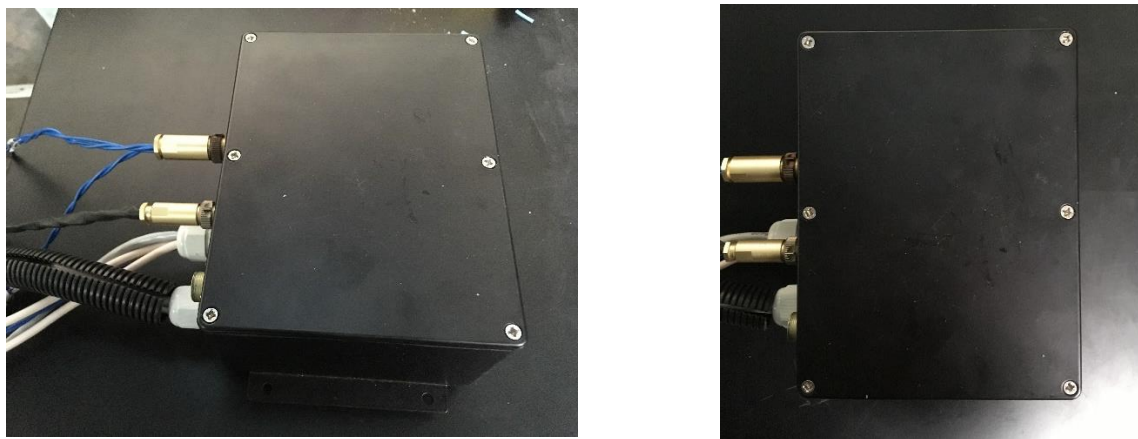


Рис. 3. Электронный блок управления системы рулевого управления

### Выводы

Проведен анализ существующих систем предупреждения о непреднамеренном выезде из занимаемой полосы и удержания в полосе движения и нормативных документов, в результате которого выделены характеристики систем, адаптированных к эксплуатации на территории РФ. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение модуля распознавания дорожной разметки и определения выхода из полосы движения. Проведены испытания данной системы, по результатам которых подтверждена работоспособность системы в дорожных условиях РФ. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для управления электромеханическим усилителем рулевого управления как в ручном режиме, так и в режиме внешнего управления.

Следующим этапом работ является разработка модуля корректировки траектории движения ТС по полосе, интеграция и отладка системы удержания в полосе движения в транспортное средство ГАЗель Next и проведение дорожных испытаний системы в различных дорожно-климатических условиях.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства безопасных экспортноориентированных автомобилей ГАЗ с элементами автономного управления и возможностью интеграции с электроплатформой на базовых компонентах российского производства» по договору №03.G25.31.0270 от 29.05.2017г. (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года №218). Экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы».*

### Библиографический список

1. ГИБДД РФ [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Режим доступа: <https://гибдд.рф>, свободный.
2. KIA Motors [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Режим доступа: <http://www.kia.com>, свободный.

3. Volkswagen AG [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Режим доступа: <https://www.volkswagen.com>, свободный. Mazda Motor Corporation [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Режим доступа: <http://www.mazda.com>, свободный.
4. Mercedes-Benz [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Режим доступа: <https://www.mercedes-benz.com>, свободный.
5. Fiat Professional [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Режим доступа: <https://www.fiatprofessional.com>, свободный.
6. Ford Motor Company [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Режим доступа: <https://www.ford.com>, свободный.
7. Citroen [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – Режим доступа: <http://www.citroen.com>, свободный.
8. Правила ЕЭК ООН № 130. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения механических транспортных средств в отношении системы предупреждения о выходе из полосы движения (СПВП). – Режим доступа: <http://www.vashdom.ru/gost/41.13-99/>, свободный.
9. ISO 17361:2017. Intelligent transport systems. – Lane departure warning systems. – Performance requirements and test procedures.
10. Правила ЕЭК ООН № 79. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств в отношении оборудования рулевого управления. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200027812>, свободный.
11. ISO 11270:2014. Intelligent transport systems. – Lane keeping assistance systems (LKAS). – Performance requirements and test procedures.
12. SAE J3048. Driver-Vehicle Interface Considerations for Lane Keeping Assistance Systems.
13. Commission Regulation (EU) No 351/2012 of the European Parliament and of the Council as regards type-approval requirements for the installation of lane departure warning systems in motor vehicles.
14. **Порубов, Д.М.** Система автоматизированного управления движением транспортных средств на основе распознавания дорожной сцены и ее объектов / Д.М. Порубов, П.О. Береснев, Д.Ю. Тюгин, А.В. Тумасов, В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин // Известия московского государственного технического университета МАМИ. – № 1. – 2018. – С. 52-63.

*Дата поступления  
в редакцию: 14.05.2019*

**D.M. Porubov, A.V. Pinchin, D.Y. Tyugin, A.V. Tumasov, P.O. Beresnev, V.V. Belyakov**

## **THE DEVELOPMENT OF LANE KEEPING ASSIST SYSTEM FOR COMMERCIAL VEHICLE**

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

**Purpose:** Development of lane keeping assist system for commercial vehicle for moving in difficult weather conditions in the Russian Federation.

**Design/methodology/approach:** The approach is based on the study of foreign experience in the development of lane keeping assist system. Technological equipment, capable to work in severe climatic conditions of the Russian Federation is studied.

**Findings:** The component composition of the system was proposed. Algorithms and software of module detect lane and define the lane departure were developed. The module was tested. Algorithms and software for control of electromechanical power steering were developed.

**Research limitations/implications:** This study is the starting point for continuing experimental studies of lane keeping assist system for a vehicle.

**Originality/value:** The developed prototype of the system is planned to be installed on light commercial vehicles.

*Key words:* ADAS, lane keeping assist system, electromechanical steering system.



УДК 629.34

И.В. Прохоров, Д.О. Бутарович, Д.М. Рябов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ВОЗДУХА  
ОБИТАЕМЫХ ЗОН САЛОНА ЭЛЕКТРОБУСА**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

В настоящее время практически все транспортные средства комплектуются климатическими установками. Создание благоприятного температурного режима в салоне при перевозке пассажиров с наименьшими энергозатратами есть необходимое условие как для электробусов, так и в целом для конкурентоспособности российских транспортных средств. В статье описывается проведенный эксперимент для получения температурного поля в салоне электробуса. В дальнейшем данные эксперимента будут использоваться для подтверждения результатов математического моделирования тепловых потоков внутри салона.

*Ключевые слова:* климатическая система, температурное поле, микроклимат салона, электробус, энергоэффективность.

Микроклимат и воздушная среда во многом определяет благоприятное физическое состояние человека, оказывает влияние на его работоспособность, воздействует на тепловой обмен организма. Для создания комфортных условий в транспортном средстве создана совокупность систем, отвечающих за микроклимат.

Работа наземного общественного транспорта осуществляется в широких диапазонах параметров окружающей среды: температуры воздуха от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+35^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность воздуха от 20 % до 99 %, скорость ветра от 0 до 15 м/с. Для данных эксплуатационных норм обеспечение заданных показателей микроклимата является сложной многопараметрической задачей. Нежелательное ухудшение одного из параметров возможно компенсировать изменением в определенных границах другими параметрами микроклимата. Регулировка параметров температуры необходима с учетом множества параметров микроклимата, таких как влажность воздуха, радиационная температура, воздушные потоки в обитаемых зонах транспортного средства. При создании надлежащего микроклимата сложность задачи усугубляется неравномерным распределением показателей по объему среды, ввиду больших размеров внутреннего пространства, конструктивных особенностей салона транспортного средства. В настоящее время среди комплекса параметров микроклимата, полученных экспериментальным путем, наиболее точным является определение температуры воздуха салона – основного параметра, от которого зависит комфортное состояние пассажиров. Целью настоящего исследования является определение температурного поля воздуха обитаемых зон салона электробуса.

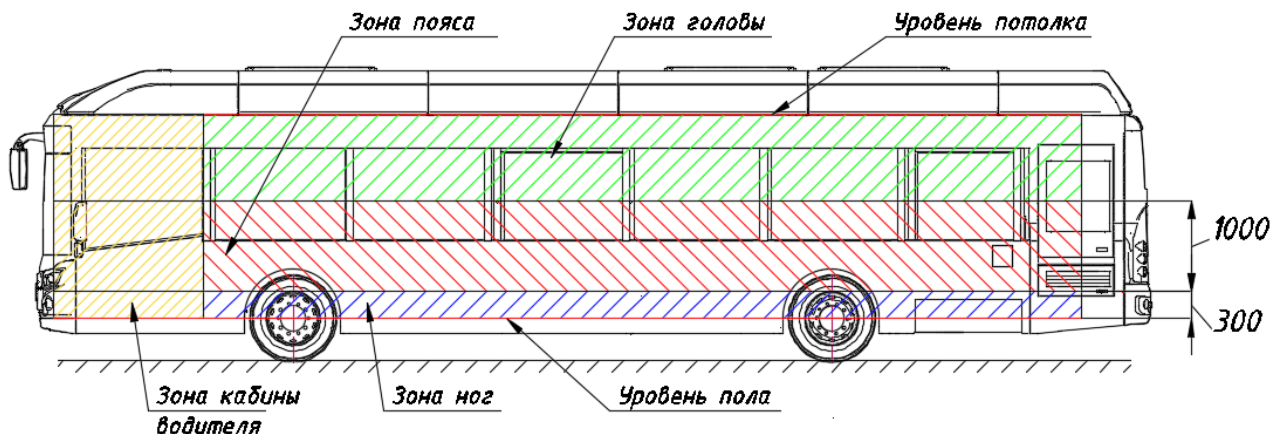
Согласно требованиям к параметрам микроклимата по ГОСТ Р 50993-96 «Автотранспортные средства. Системы отопления, вентиляции и кондиционирования. Требования к эффективности и безопасности» для АТС категории М3 I класса (городской автобус)», температура воздуха пассажирских мест в зоне ног не менее  $0^{\circ}\text{C}$ , в зоне головы – не менее  $10^{\circ}\text{C}$ . В настоящее время данные показатели не отражают реальных потребительских требований, что, в конечном счете, ведет к неконкурентоспособности ТС. Как правило, диапазон комфортных для человека температур находится в прямой зависимости от четырех основных факторов:

- наружная температура воздуха;
- степень двигательной активности людей;
- степень теплоизолированности находящейся на людях одежды (легкой, средней или теплой);
- относительная влажность воздуха.

Условно необходимо разделить обитаемое пространство транспортного средства на зоны (рис. 1). Для салона электробуса выделено 4 зоны:

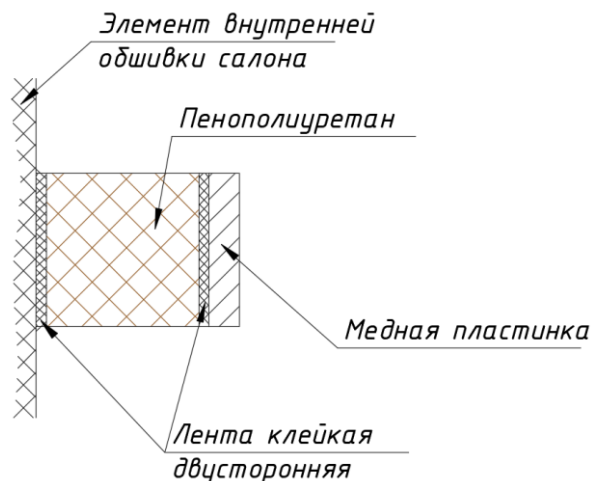
- зона кабины водителя;
- зона ног (0-300 мм по уровню пола);
- зона пояса (300-1300 мм по уровню пола);
- зона головы (1300 мм и выше от уровня пола).

Температура в зоне кабины в данном исследовании не рассматривается.



**Рис. 1. Зонирование обитаемого пространства электробуса**

В качестве индикаторов использовались медные квадратные пластинки размером 15х15 мм, установленные через теплоизолятор на элементы внутренней обшивки салона. В качестве теплоизолятора приняты пенополиуретановые фрагменты соответствующего размера. Данная схема индикаторов (рис. 2) проста в изготовлении, установке, не требует протяжки проводов.



**Рис. 2. Индикатор температуры**

Всего установлено 27 температурных индикаторов, расположение которых представлено на рис. 3. Также на схеме указано расположение отопителей и калориферов в электробусе.

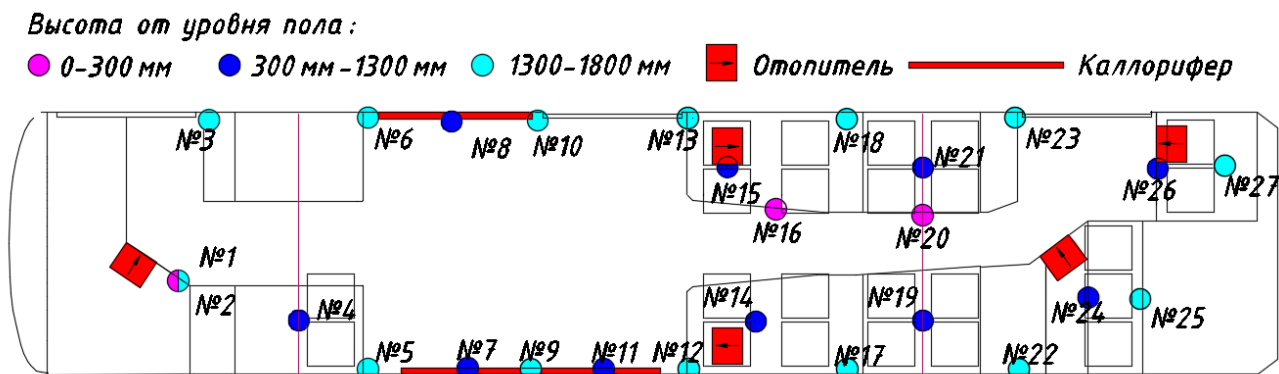


Рис. 3. Расположение индикаторов

В ходе опытной эксплуатации электробуса в Москве на маршруте М2, с помощью тепловизора Fluke Ti32, с определенной периодичностью за 30 мин было выполнено 380 измерений температуры индикаторов. При эксперименте все отопители и калориферы работали на максимальной мощности, электробус осуществлял движение по маршруту М2 с остановками, но без посадки и высадки пассажиров. На момент начала эксперимента преобладала облачная погода, без осадков, значение температуры окружающего воздуха составляло +4 °С, электробус находился в автобусном парке. После предварительного десятиминутного прогрева и выезда на маршрут сняты начальные значения индикаторов (табл. 1).

Таблица 1

Начальные значения температуры индикаторов

Зона ног		Зона пояса		Зона головы	
Номер индикатора	Показание, °С	Номер индикатора	Показание, °С	Номер индикатора	Показание, °С
1	10	4	8,5	2	10
16	12,5	7	11,5	3	9,5
20	12	8	11,5	5	11,5
		11	13	6	10,5
		14	13	9	12
		15	13,5	10	12,5
		19	12,5	12	15
		21	13	13	13
		24	13,5	17	15,5
		26	14	18	16
				22	14
				23	14
				25	15
				27	12

Показания после 30 мин эксплуатации представлены в табл. 2. Благодаря значениям индикаторов и их изменению во времени, получено температурное поле обитаемого пространства электробуса при определенных погодных условиях и работе системы обогрева салона. За время эксперимента в среднем температура салона увеличилась на 12,7°С, разница между наибольшими и наименьшими показателями так же значительно не поменялась и составила 8°С.

Таблица 2

## Значения температуры индикаторов через 30 мин

Зона ног		Зона пояса		Зона головы	
Номер индикатора	Показание, °С	Номер индикатора	Показание, °С	Номер индикатора	Показание, °С
1	26 (+16)	4	21,5 (+13)	2	27 (+17)
16	22 (+10,5)	7	27 (+15,5)	3	23,5 (+14)
20	21 (+9)	8	28 (+16,5)	5	24,5 (+13)
		11	27,5 (+14,5)	6	25 (+14,5)
		14	28,5 (+15,5)	9	25,5 (+13,5)
		15	27,5 (+14)	10	24 (+11,5)
		19	21 (+8,5)	12	28,5 (+13,5)
		21	21 (+8)	13	27 (+14)
		24	24 (+10,5)	17	27 (+11,5)
		26	27,5 (+13,5)	18	27 (+11)
				22	25,5 (+11,5)
				23	25 (+11)
				25	26,5 (+11,5)
				27	23,5 (+11,5)

Температура индикаторов зоны ног между средней и задней дверью увеличилась на 9-10°C, в районе передней двери на 16°C – ввиду близкого расположения отопителя. По индикаторам № 8, № 7, № 11, расположенным в зоне пояса центральной накопительной площадки электробуса, можно сказать, что прогрев воздуха в данной области происходит интенсивнее и, в целом, показания выше средней температуры по салону на 2-3°C. Зона головы в центральной накопительной площадке имеет среднюю температуру салона, кроме граничной зоны начала сидений из-за расположенных под сиденьями отопителей. Индикаторы № 15 и № 14, расположенные между сиденьями рядом с отопителями, № 17, № 18, так же имеют одни из самых высоких температурных показателей. Температура индикаторов № 19 и № 21 ниже средней на 4°C – вероятно, это связано с слабой циркуляцией воздуха за рядами сидений. Температура индикаторов в задней части салона имеет небольшой разброс от средней температуры по салону. В дальнейшем полученные в ходе эксперимента значения температуры воздуха в обитаемых зонах электробуса будут использоваться для верификации результатов расчетной модели, созданной в ANSYS CFX (рис. 4).

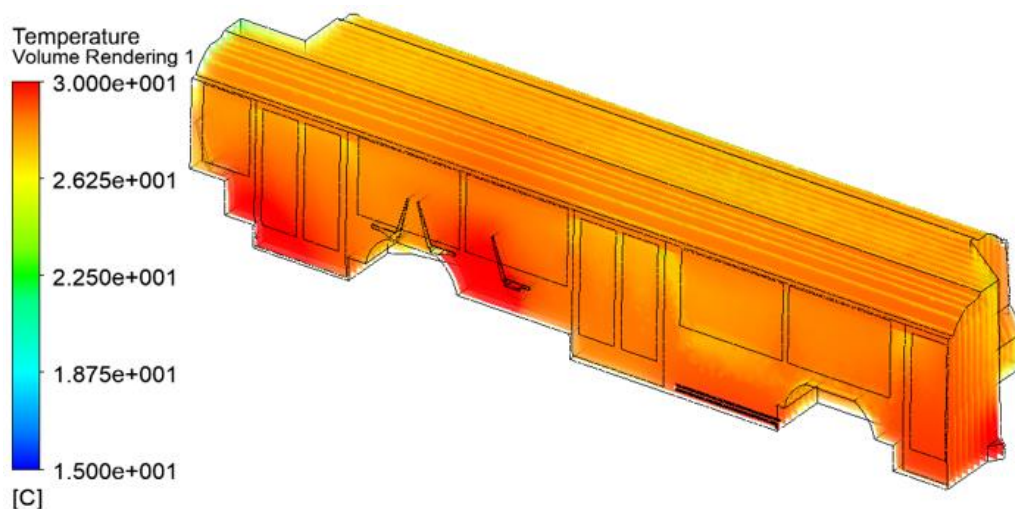


Рис. 4. Результаты моделирования температурного поля обитаемого пространства электробуса

## Библиографический список

1. Дроздов, В.Ф. Отопление и вентиляция. Часть II. Вентиляция / В.Ф. Дроздов. – М.: Высшая школа, 1984, – 250 с.
2. Палутин, Ю.И. Методические основы совершенствования параметров воздушной среды салонов автомобилей: дис. ...докт. техн. наук / Ю.И. Палутин. – Н. Новгород, 1997, – 327 с.
3. Гегенбах, В. Отопление, вентиляция и микроклимат в салоне автомобиля. Аэродинамика автомобиля / В. Гегенбах. – М.: Машиностроение, 1987, – С. 318-342.
4. Андронов, В.Н. Внутренняя аэродинамика и улучшение микроклимата салона автомобиля: дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Андронов. – М., 1987.
5. Андронов, В.Н. Исследование процесса теплообмена в салоне автомобиля. Исследование эксплуатационных качеств тракторов и автомобилей / В.Н. Андронов, Ю.И. Палутин // Труды ГСХИ. – Т. 155. – 1981. – С. 48-52.
6. Бромлей, М.Ф. Проектирование отопления и вентиляции / М.Ф. Бромлей, В.П. Щеглов. – М., 1965.
7. Гнипович, В.И. Исследование кузовов автобусов с целью получения данных для расчета систем отопления и вентиляции: автореферат дисс... канд. техн. наук / В.И. Гнипович. – М., 1972, – 21 с.
8. Joel, M. Devonshire. Sayer Radiant Heat and Thermal Comfort in Vehicles // Human Factors. The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society / M. Devonshire, Joel, R. James. – № 47(4). – 2005. – P. 27-39.

*Дата поступления  
в редакцию: 25.04.2019*

**I.V. Prokhorov, D.O. Butarovich, D.M. Ryabov**

**INVESTIGATION OF THE AIR THERMAL FIELD IN PASSENGER COMPARTMENT  
OF THE ELECTRIC BUS**

Bauman Moscow State Technical University

**Purpose:** Currently, almost all vehicles are equipped with climate control systems. Creating a favorable temperature regime in the cabin when transporting passengers with the least energy costs is a necessary condition for both electric buses and, in general, for the competitiveness of Russian vehicles. The purpose of the article is to experimentally determine the temperature field of the electric bus.

**Approach:** The article describes the experiment conducted to obtain a temperature field in the interior of an electric bus.

**Findings and implications:** The results of air temperature measurements in populated areas will be used for reliable calculation results.

*Key words:* hvac-system, temperature field, interior microclimate, electric bus, energy efficiency.

УДК 629.113

**Е.И. Торопов, А.С. Вашурин, А.В. Тумасов, А.А. Васильев****ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ВИРТУАЛЬНО-ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДИНАМИКИ КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДОРОЖНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье рассматриваются результаты проведенных испытаний по оценке эффективности системы электронного контроля устойчивости (ЭКУ) легкого коммерческого автомобиля согласно правилам ООН №13-11. Основная цель исследования – апробация методики виртуально-физических испытаний, а также валидация и верификация математической модели криволинейного движения легкого коммерческого автомобиля по результатам натуральных испытаний.

*Ключевые слова:* Правила ООН № 13-11, sine with dwell, программно-аппаратный комплекс, hardware-in-the-loop, HIL, системы электронного контроля устойчивости, ЭКУ, ISO 19365.

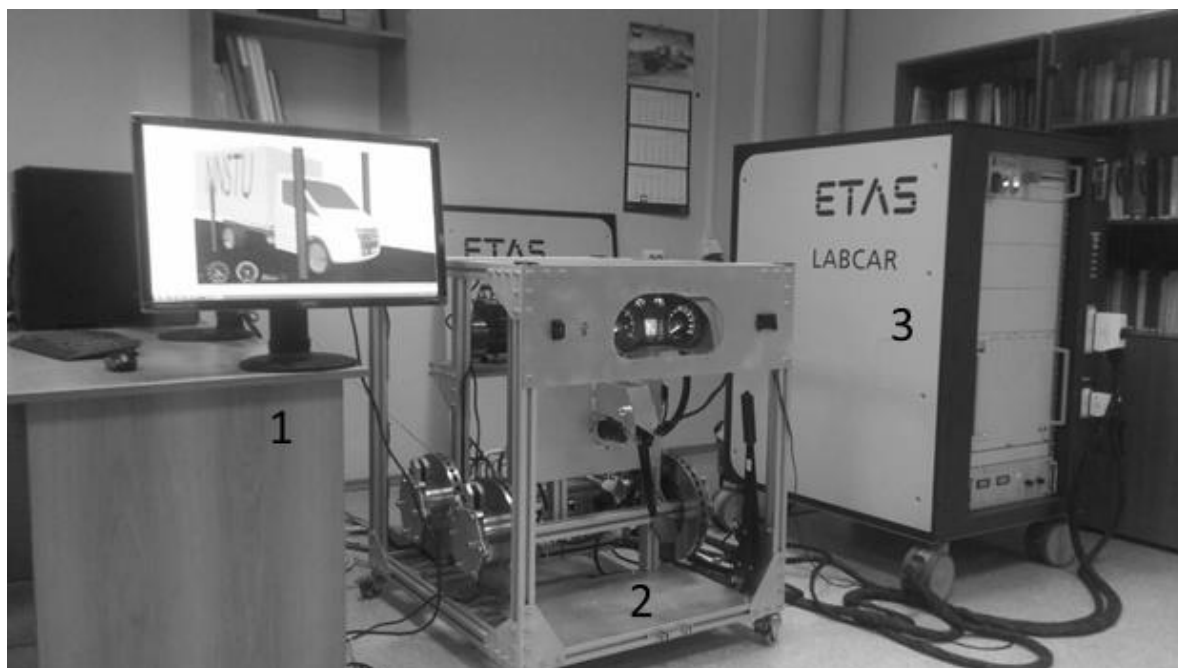
**Введение**

Одной из актуальных проблем современного автомобилестроения является проблема повышения активной безопасности транспортных средств, которая определяется их тормозными свойствами, а также свойствами устойчивости и управляемости.

Наиболее перспективным методом оценки эксплуатационных свойств транспортных средств является применение имитационного моделирования движения автомобилей с использованием гибридных стендовых установок, включающих в себя как реальные агрегаты конструкции транспортного средства, так и специальное программное обеспечение. Такие комплексы позволяют моделировать практически любые условия движения автомобиля с учетом особенностей работы реальных компонентов, что расширяет возможности инженеров конструкторов при выполнении исследовательских работ, направленных на совершенствование конструкции автомобиля с целью улучшения его эксплуатационных свойств и повышения уровня активной безопасности. Специалистами Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева был разработан подобный стенд виртуально-физического моделирования (HIL-стенд), который должен позволить проводить оценку поведения легкого коммерческого автомобиля с установленной системой ЭКУ. Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта по договору № 02.G25.31.0193 от 27.04.2016 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218) [1].

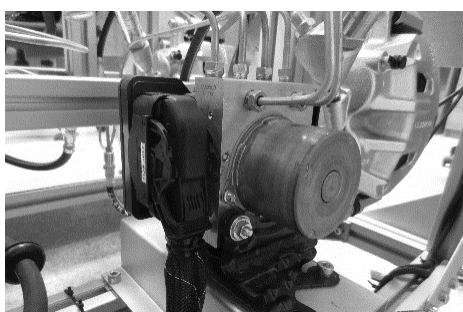
Внешний вид HIL-стенда изображен на рис. 1. Особенностью данной системы является то, что в качестве физической части используется реальная тормозная система от легкого коммерческого автомобиля (рис. 2).

Классический способ подтверждения эффективности работы электронных систем курсовой устойчивости – это проведение динамических маневров на реальном автомобиле, предписанных Правилами ООН № 13-11 (Приложение 21) и ООН № 140 [3, 4]. Стоит отметить, что данными правилами предусмотрена проверка соответствия требованиям нормативных документов модификаций транспортных средств, созданных на основе базового автомобиля по результатам моделирования на HIL-стенде (Добавление 1 «Моделирование динамической устойчивости» и Добавление 2 «Средство моделирования динамической стабильности и его аттестация»).

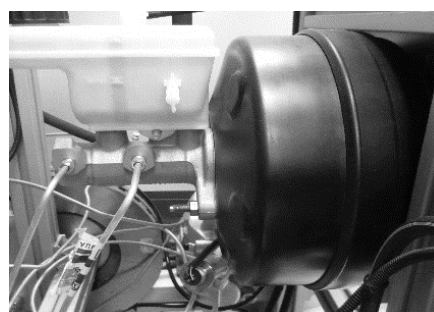


**Рис. 1. Внешний вид НЦ-системы, разработанной в НГТУ:**

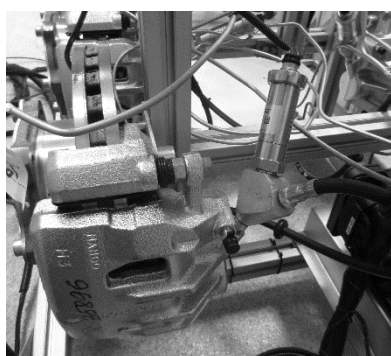
- 1 – виртуальная часть: компьютер со средой Vi-Grade CRT Software;
- 2 – физическая часть с компонентами тормозной системы автомобиля, в том числе, с электронным блоком системы ЭКУ);
- 3 – компьютер реального времени (среда ETAS LabCAR)



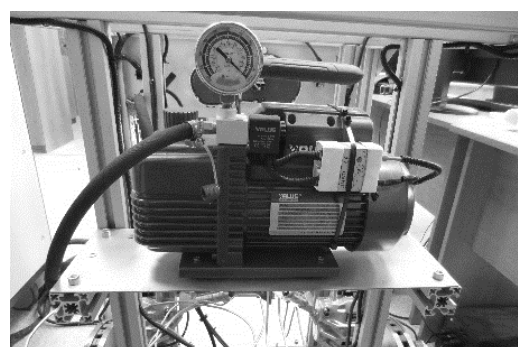
а)



б)



в)



г)

**Рис. 2. Компоненты физической части стенда полунатурных испытаний:**

- а) электрогидравлический блок системы ЭКУ;
- б) главный тормозной цилиндр + вакуумный усилитель;
- в) рабочий тормозной цилиндр с установленным датчиком давления;
- г) вакуумный насос



### Подготовка и проведение натурных испытаний

Для отладки комплекса и его аттестации была проведена серия натурных испытаний на легком коммерческом автомобиле (ЛКА), оснащённом ЭКУ. На автомобиле было установлено измерительное оборудование ЦКП «Транспортные системы» НГТУ для получения массива экспериментальных данных [1, 2]. Расположение измерительного оборудования в транспортном средстве показано на рис. 3, схема измерительной установки представлена на рис. 4.



а)



б)



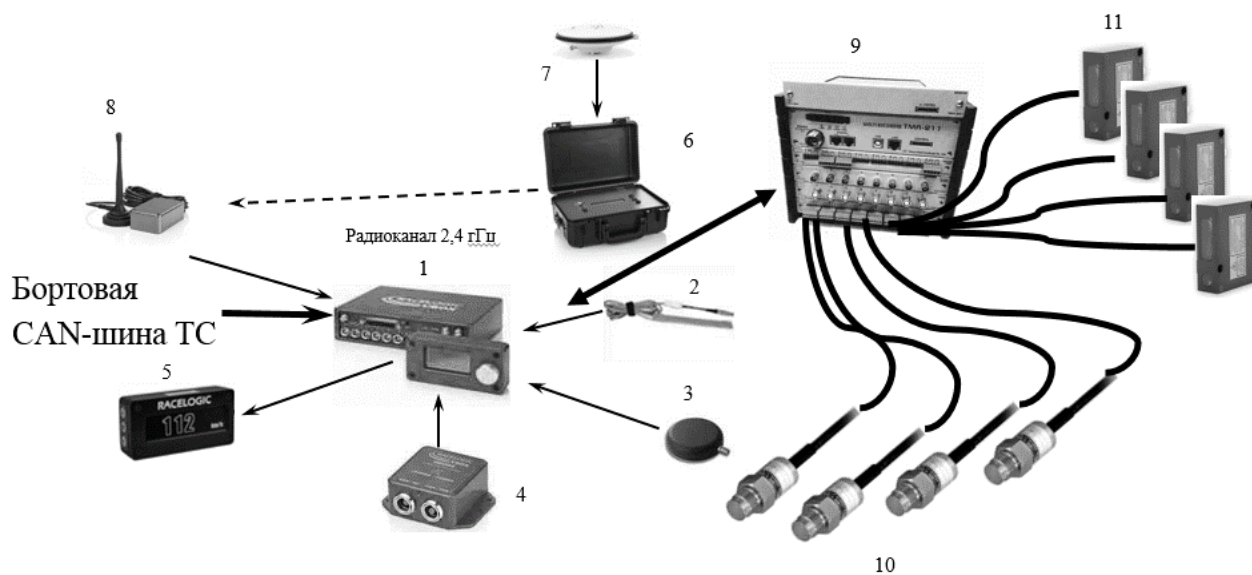
в)



г)

**Рис. 3. Установка измерительного оборудования в испытуемом транспортном средстве:**  
а) установка комплекта многофункционального измерителя скорости; б) «рулевой» робот;  
в, г) установка датчиков давления в тормозную магистраль





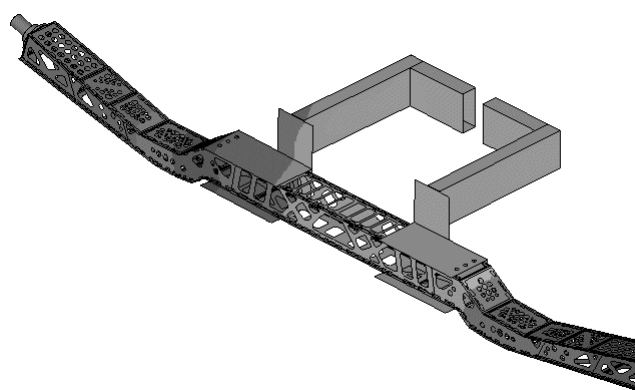
**Рис. 4. Принципиальная схема измерительной установки:**

- 1 – многофункциональный измеритель скорости Racelogic VBox 3i 100Hz; 2 – ручной триггер;
- 3 – GPS-антенна измерителя скорости; 4 – 3-х осевой гироскоп; 5 – монитор;
- 6 – RTK-базовая станция; 7 – GPS-антенна базовой станции; 8 – телеметрия базовой станции;
- 9 – система сбора данных TMR-200; 10 – датчики давления, встроенные тормозные магистрали;
- 11- лазерные датчики отрыва колес

Для предотвращения опрокидывания автомобиля при выполнении маневров с «рулевым» роботом было решено изготовить дополнительные опоры. На основании результатов собственных экспериментов и исследований NHTSA (Национальное управление безопасностью движения на трассах – США) была разработана конструкция «аутригера», учитывающая особенности конструкции ЛКА «ГАЗ» и выдерживающая необходимую нагрузку (установка на транспортном средстве – рис. 5а). Также были проведены необходимые прочностные расчеты (рис. 5б).



а)



б)

**Рис. 5. «Аутригер» НГТУ:**

- а) установка на испытуемом транспортном средстве; б) конечно-элементная модель

Испытания проводились на полигонах «Березовая пойма» ГАЗ и НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ» с активированной и деактивированной системой ЭКУ (всего было выполнено

более 500 заездов). В различных погодных условиях (сухой / влажный асфальт). При активированной системе ЭКУ испытания проводились при нажатой и отпущенной педали акселератора. Были выполнены следующие маневры:

- «вход в поворот радиусом 35м» (по ГОСТ 31507-2012 «Автотранспортные средства. Управляемость и устойчивость. Технические требования. Методы испытаний»);
- переставка 20 м (по ГОСТ 31507-2012);
- двойная переставка по ISO 3888-2;
- синусоида с остановкой (sine with dwell);
- «рыболовный крючок» (fishhook);
- ассиметричная синусоида;
- рывок руля;
- двойная переставка по ISO 3888-1;
- переставка (20 м) с переходом с высокого коэффициента сцепления на низкий.

С помощью измерительного оборудования фиксировались следующие параметры движения транспортного средства: траектория, скорость, продольное и поперечное ускорения, скорость рыскания, давления в тормозных механизмах, отрыв колес. Также часть необходимой информации была получена из бортовой CAN-шины: угол поворота руля, обороты двигателя, крутящий момент двигателя, угловая скорость вращения колеса, запрашиваемый водителем крутящий момент двигателя, запрашиваемый ЭКУ крутящий момент двигателя, срабатывание функций ЭКУ [1, 2]. После проведения маневров и обработки полученных данных встала задача по сопоставлению результатов моделирования и натурных испытаний.

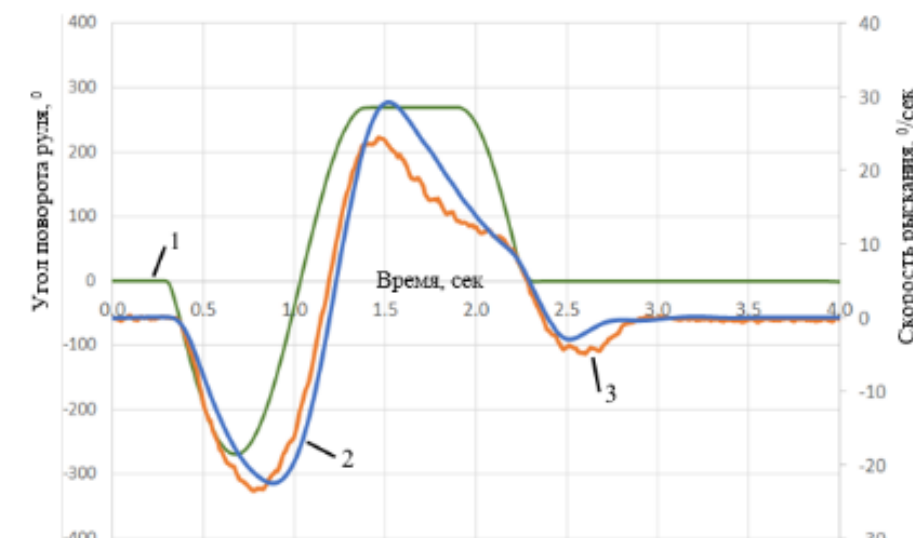
### Проверка адекватности моделирования

Подтверждение адекватности моделирования проводится путем сопоставления с результатами типовых натурных испытаний, предписанных Правилами ООН №13-11. Наиболее показательным маневром является «Sine with dwell», требования к адекватности получаемых результатов при моделировании данного маневра приведены в ISO 19365 «Passenger cars – Validation of vehicle dynamic simulation – Sine with dwell stability control testing» [5]. Результаты сопоставления приведены в табл. 1 и на рис. 6. Была получена приемлемая сходимость результатов моделирования с реальными испытаниями.

Таблица 1

Таблица сопоставления результатов моделирования и натурных испытаний

Параметр	Значение		Расхождение	Максимальное расхождение по ISO 19365
	Натурный эксперимент	Моделирование		
Значение первого пика скорости рыскания ( $\psi'_1$ ), °/с	23,5	-22,47	4,1 %	±15 %
Значение второго пика скорости рыскания ( $\psi'_2$ ), °/с	24,44	29,15	19 %	±25 %
Время перехода скорости рыскания через ноль, с	1,15	1,19	0,04	±0.1 s
Боковое перемещение центра тяжести т.с, м	4.64	4,22	7,5 %	±18 %



**Рис. 6. График результатов натурных испытаний и результатов моделирования**  
 1 – график воздействия на рулевое колесо; 2 – скорость рыскания (эксперимент);  
 3 – скорость рыскания (моделирование)

### Заключение

1. Максимальные значения сопоставляемых параметров имеют хорошую сходимость и не превышают значений, предписанных в ISO 19365.
2. Получена валидированная модель криволинейного движения легкого коммерческого автомобиля с возможностью компиляции в С-код для тестирования в режиме жесткого реального времени.

### Библиографический список

1. **Вашурин, А.С.** Программно-аппаратный комплекс для оценки управляемости легких коммерческих автомобилей, оснащенных системами электронного контроля устойчивости. Проведение натурных испытаний для отладки работы комплекса / А.С. Вашурин, Ю.П. Трусов, Е.И. Торопов // Актуальные вопросы машиноведения. – Т.6. – 2017.
2. **Вашурин, А.С.** Проведение натурных испытаний для отладки программно-аппаратного комплекса для оценки управляемости легких коммерческих автомобилей, оснащенных системами электронными контроля устойчивости. Особенности выполнения маневров на сухом и влажном асфальте / Е.И. Торопов, Ю.П. Трусов, П.С. Мошков, А.А. Аникин, А.С. Вашурин, Ю.И. Палутин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – № 4. – 2017. – С. 172-177.
3. Правила ООН №13-11 Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения механических транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200027802>, свободный.
4. Правила ООН №140 Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения пассажирских автомобилей в отношении систем электронного контроля устойчивости (ЭКУ). - Режим доступа: <http://rdocs3.cntd.ru/document/456073635>, свободный.
5. ISO 19365 Passenger cars – Validation of vehicle dynamic simulation – Sine with dwell stability control testing.

*Дата поступления  
 в редакцию: 04.02.2019*

**E.I. Toropov, A.S. Vashurin, A.V. Tumasov, A.A. Vasiliev**

**VERIFICATION OF THE VIRTUAL PHYSICAL TESTING METHODOLOGY  
OF THE VEHICLES DYNAMICS BY RESULTS OF ROAD TESTS**

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

**Purpose:** The aim is verification of virtual model for HIL-testbench electronic stability control system by results of the road tests.

**Design/methodology/approach:** International standards of road testing electronic stability control system were studied and was developed.

**Findings:** The obtained results of convergence satisfy requirements of ISO 19635. Also autriggers for testing were patented.

**Research limitations/implications:** A verified model of the curvilinear motion of the vehicle was developed based on the results of scientific developments.

**Originality/value:** Results and scientific developments of this project will allow to implement the national program of import substitution in transport engineering.

*Keywords:* UN Regulation No. 13-11, sine with dwell, HIL-testbench, Hardware-in-the-loop, HIL, electronic stability control system, ESC, ISO 19635.

УДК 629.331

М.Г. Черевастов, Ю.И. Молев

**ПРИМЕНЕНИЕ КВАДРАТИЧНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УПРАВЛЯЕМОСТИ АВТОМОБИЛЯ,  
ОБЛАДАЮЩЕГО НЕДОСТАТОЧНОЙ ПОВОРАЧИВАЕМОСТЬЮ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

На основе применения косвенного интегрального метода оценки качества переходного процесса проведено исследование реакции автомобиля, обладающего недостаточной поворачиваемостью, на ступенчатое управляющее воздействие. За критерий качества переходного процесса взята квадратичная интегральная оценка. В результате проведенного исследования построены зависимости величины интегральной оценки от различных конструктивных параметров автомобиля и параметров его движения, сделаны выводы о влиянии последних на данную оценку и управляемость транспортного средства.

*Ключевые слова:* квадратичная интегральная оценка, недостаточная поворачиваемость, управляемость автомобиля.

При изучении управляемости автомобиля возможно рассмотрение как установившихся режимов движения транспортного средства, так и переходных процессов, вызванных управляющим воздействием водителя. Протекание установившегося режима в большей степени характеризуется передаточным коэффициентом, связывающим входные возмущения, приложенные к автомобилю, с реакциями автомобиля на эти возмущения. Величина данного коэффициента непосредственно влияет на управляемость, а большие его значения значительно ухудшают управление колесной машиной [1]. Не менее важным при исследовании управляемости автомобиля является освещение вопроса, связанного с оценкой качества вызываемого переходного процесса как результата приложенного управляющего воздействия, с позиции отставания реакции по угловой скорости автомобиля от угла поворота управляемых колес. Для изучения качества переходного процесса с применением косвенного метода оценки нами действовала квадратичная интегральная оценка, широко используемая в теории автоматического управления и регулирования [2]. Общее выражения для ее определения выглядит следующим образом (1):

$$J_0 = \int_0^{\infty} (\Delta\omega)^2 dt \quad (1)$$

где  $\Delta\omega = \omega(t) - \omega(\infty)$ ;  $\omega(t)$  и  $\omega(\infty)$  – мгновенная угловая скорость автомобиля, и угловая скорость после завершения переходного процесса соответственно.

В настоящей статье также использованы следующие обозначения:

$a$  – расстояние от центра тяжести автомобиля до передней оси;

$b$  – расстояние от центра тяжести автомобиля до задней оси;

$\theta_n$  – угол поворота управляемых колес;

$C_1$  – коэффициент сопротивления уводу шин передних колес;

$C_2$  – коэффициент сопротивления уводу шин задних колес;

$J_z$  – момент инерции автомобиля, относительно вертикальной оси, проходящей через его центр тяжести;

$L$  – колесная база;

$M$  – масса автомобиля;

$V$  – поступательная скорость автомобиля.

Исходя из условия, определяющего наличие недостаточной поворачиваемости автомобиля  $aC_1 - bC_2 > 0$ , возможны два основных варианта установления реакции по угловой скорости, при одном из которых реакция нарастает монотонно аperiodически, при другом – носит колебательный характер. Условием первого варианта является  $aC_1 - bC_2 > \frac{4J_z V^2}{L^2}$ , для второго  $0 < aC_1 - bC_2 < \frac{4J_z V^2}{L^2}$ . Таким образом, для вычисления косвенной интегральной оценки необходимо рассматривать свой соответствующий интервал. Прежде чем перейти к вычислению интегральной оценки, напомним, что для определения зависимости  $\omega = f(t)$ , описывающей переходный процесс, нами использовалась запись уравнений движения автомобиля в форме производных устойчивости [3] с характерной для нее отрицательной величиной коэффициента сопротивления боковому уводу колеса. Управляющее воздействие является известной функцией времени – мгновенное изменение угла поворота управляемых колес в начальный момент времени до нового установившегося значения.

Проанализируем случай, когда переходный процесс носит колебательный характер. Выражение для угловой скорости автомобиля, вызванной управляющим воздействием, являющимся известной функцией времени, в этом случае будет иметь следующий вид (2):

$$\omega(t) = T_1 + T_4 e^{-\frac{B_1 t}{2}} \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (2)$$

где  $B_1 = -\frac{L(aC_1 + bC_2)}{J_z V}$ ;  $B_2 = \frac{MV^2(aC_1 - bC_2) + L^2 C_1 C_2}{J_z MV^2}$ ;  $\omega_k^2 = B_2 - \left(\frac{B_1}{2}\right)^2$ ;

$$T_1 = \omega(\infty) = \frac{\theta_n LV}{L^2 + MV^2 \left(\frac{a}{C_2} - \frac{b}{C_1}\right)}; T_2 = -T_1;$$

$$T_3 = \frac{\theta_n}{J_z} \left( \frac{L^2(aC_1 + bC_2)}{L^2 + MV^2 \left(\frac{a}{C_2} - \frac{b}{C_1}\right)} - aC_1 \right);$$

$$Z = -\frac{T_2}{\omega_k} \left( \frac{B_1}{2} - \frac{T_3}{T_2} \right);$$

при  $Z > 0$  имеем  $T_4 = \sqrt{T_2^2 + Z^2}$   $\varphi_k = \arcsin\left(\frac{T_2}{\sqrt{T_2^2 + Z^2}}\right)$ ;

при  $Z < 0$  имеем  $T_4 = -\sqrt{T_2^2 + Z^2}$   $\varphi_k = -\arcsin\left(\frac{T_2}{\sqrt{T_2^2 + Z^2}}\right)$ .

Далее находим:

$$\Delta\omega = T_1 + T_4 e^{-\frac{B_1 t}{2}} \sin(\omega_k t + \varphi_k) - T_1 = T_4 e^{-\frac{B_1 t}{2}} \sin(\omega_k t + \varphi_k).$$

Теперь определим  $(\Delta\omega)^2$ :

$$\begin{aligned} (\Delta\omega)^2 &= T_4^2 e^{-B_1 t} \sin^2(\omega_k t + \varphi_k) = T_4^2 e^{-B_1 t} \left( \frac{1 - \cos(2\omega_k t + 2\varphi_k)}{2} \right) = \\ &= \frac{T_4^2}{2} e^{-B_1 t} - \frac{T_4^2}{2} e^{-B_1 t} \cos(2\omega_k t + 2\varphi_k). \end{aligned}$$

На следующем этапе переходим к нахождению квадратичной интегральной оценки, подставляя полученное выше выражение для  $(\Delta\omega)^2$  в формулу (1). Получаем:

$$J_0 = \int_0^{\infty} \left( \frac{T_4^2 e^{-B_1 t}}{2} - \frac{T_4^2 e^{-B_1 t}}{2} \cos(2\omega_k t + 2\varphi_k) \right) dt = \int_0^{\infty} \frac{T_4^2 e^{-B_1 t}}{2} dt - \int_0^{\infty} \frac{T_4^2 e^{-B_1 t}}{2} \cos(2\omega_k t + 2\varphi_k) dt .$$

Запишем отдельно решение для каждого интеграла:

$$1. \int_0^{\infty} \frac{T_4^2 e^{-B_1 t}}{2} dt = - \frac{T_4^2}{2B_1} e^{-B_1 t} \Big|_0^{\infty} = \frac{T_4^2}{2B_1} .$$

$$2. \int_0^{\infty} \frac{T_4^2 e^{-B_1 t}}{2} \cos(2\omega_k t + 2\varphi_k) dt = \frac{T_4^2}{2} \int_0^{\infty} e^{-B_1 t} \cos(2\omega_k t + 2\varphi_k) dt .$$

Обозначим  $R = \int_0^{\infty} e^{-B_1 t} \cos(2\omega_k t + 2\varphi_k) dt .$

Проведя двойное последовательное интегрирование по частям, получим выражение для  $R$ :

$$R = \frac{B_1 \cos(2\varphi_k) - 2\omega_k \sin(2\varphi_k)}{B_1^2 + 4\omega_k^2} .$$

Окончательно имеем:

$$J_0 = \frac{T_4^2}{2} \left( \frac{1}{B_1} - \frac{B_1 \cos(2\varphi_k) - 2\omega_k \sin(2\varphi_k)}{B_1^2 + 4\omega_k^2} \right) . \tag{3}$$

Выражение (3) дает зависимость косвенной интегральной оценки от различных параметров, связанных как с конструкцией автомобиля, так и с параметрами его движения при колебательном законе переходного процесса установления угловой скорости автомобиля.

Перейдем к рассмотрению другого варианта, когда установление угловой скорости автомобиля происходит монотонно аperiodически и описывается выражением (4):

$$\omega(t) = E_1 + E_2 e^{s_1 t} + E_3 e^{s_2 t} , \tag{4}$$

где  $s_{1,2} = \frac{-B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4B_2}}{2}$ ;  $E_1 = \omega(\infty) = \frac{A_2}{s_1 s_2}$ ;  $E_2 = \frac{A_1 + E_1 s_2}{s_1 - s_2}$ ;  $E_3 = -(E_1 + E_2)$ ;

$$A_1 = -\frac{aC_1 \theta_n}{J_z} ; A_2 = \frac{LC_1 C_2 \theta_n}{MVJ_z} .$$

Тогда выражение для  $\Delta\omega$  будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta\omega = E_1 + E_2 e^{s_1 t} + E_3 e^{s_2 t} - \omega(\infty) = E_2 e^{s_1 t} + E_3 e^{s_2 t} .$$

Далее найдем  $(\Delta\omega)^2$ :  $(\Delta\omega)^2 = (E_2 e^{s_1 t} + E_3 e^{s_2 t})^2 = E_2^2 e^{2s_1 t} + 2E_2 E_3 e^{(s_1+s_2)t} + E_3^2 e^{2s_2 t} .$

Вычислим интеграл (1) при условии, что  $s_1 < 0, s_2 < 0$ :

$$J_0 = \int_0^{\infty} (E_2^2 e^{2s_1 t} + 2E_2 E_3 e^{(s_1+s_2)t} + E_3^2 e^{2s_2 t}) dt = E_2^2 \int_0^{\infty} e^{2s_1 t} dt + 2E_2 E_3 \int_0^{\infty} e^{(s_1+s_2)t} dt + E_3^2 \int_0^{\infty} e^{2s_2 t} dt = \frac{E_2^2}{2s_1} e^{2s_1 t} \Big|_0^{\infty} + \frac{2E_2 E_3}{s_1 + s_2} e^{(s_1+s_2)t} \Big|_0^{\infty} + \frac{E_3^2}{2s_2} e^{2s_2 t} \Big|_0^{\infty} = \left( 0 - \frac{E_2^2}{2s_1} \right) + \left( 0 - \frac{2E_2 E_3}{s_1 + s_2} \right) + \left( 0 - \frac{E_3^2}{2s_2} \right) =$$

$$= -\frac{E_2^2}{2s_1} - \frac{2E_2E_3}{s_1 + s_2} - \frac{E_3^2}{2s_2}.$$

Окончательно запишем:

$$J_0 = -\left(\frac{E_2^2}{2s_1} + \frac{2E_2E_3}{s_1 + s_2} + \frac{E_3^2}{2s_2}\right). \quad (5)$$

Выражение (5) устанавливает функциональную связь между квадратичной интегральной оценкой и различными параметрами автомобиля и его движения.

Для наглядной демонстрации общей тенденции приведем результаты расчетов величины интегральной оценки для грузового автомобиля категории  $N_1$  ( $C_1 = -80000 \left[ \frac{H}{\text{рад}} \right]$ ,  $C_2 = -160000 \left[ \frac{H}{\text{рад}} \right]$ ).

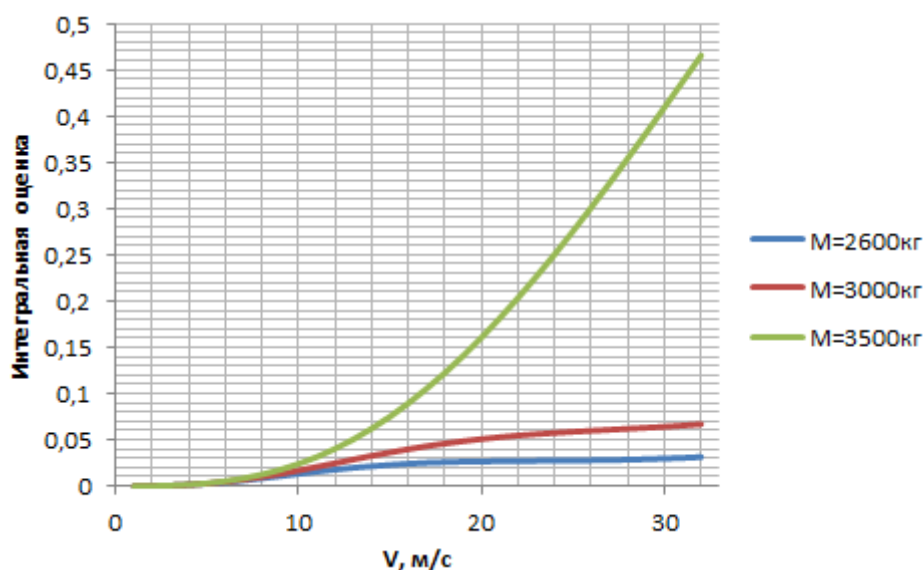


Рис. 1. Зависимость косвенной квадратичной интегральной оценки от скорости движения автомобиля при различных величинах его массы для случая  $L = 2,9$  м

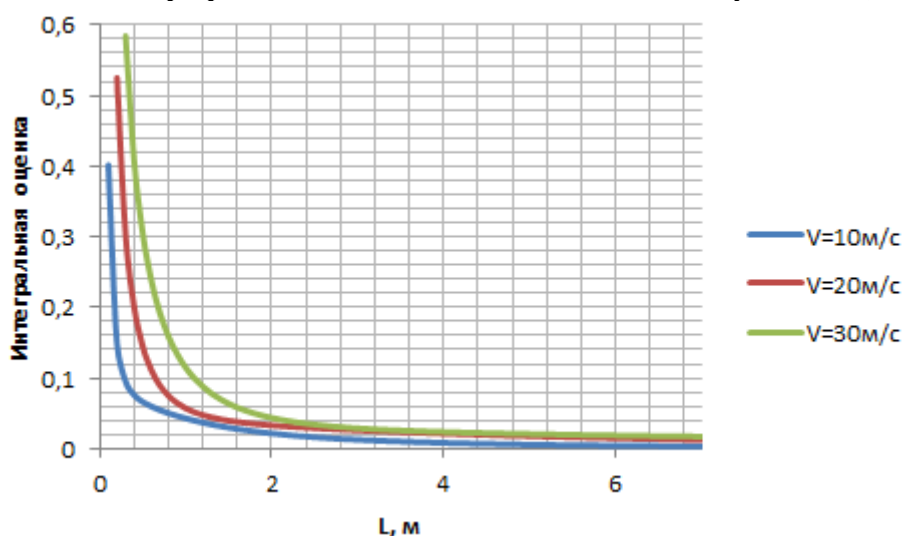


Рис. 2. Зависимость косвенной квадратичной интегральной оценки от величины колесной базы автомобиля при различных значениях скорости для случая  $M = 2600$  кг



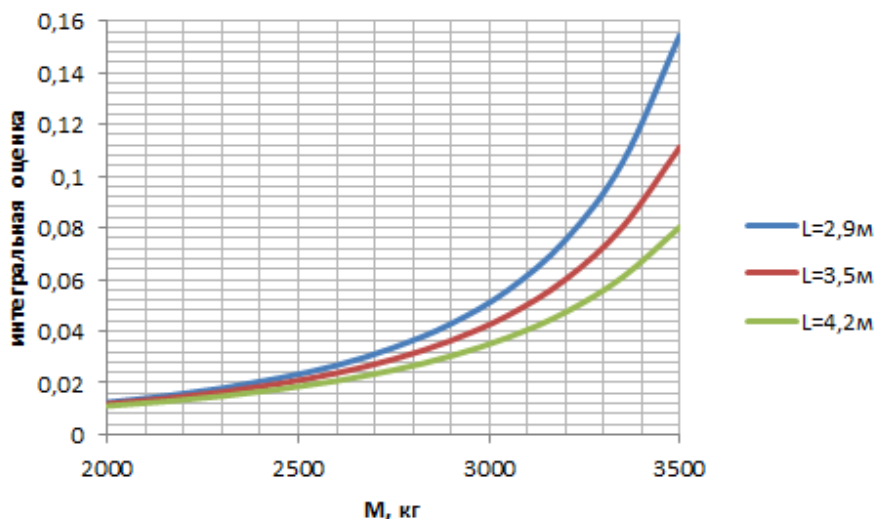


Рис. 3. Зависимость косвенной квадратичной интегральной оценки от массы автомобиля при различных значениях колесной базы для случая  $V = 20$  м/с

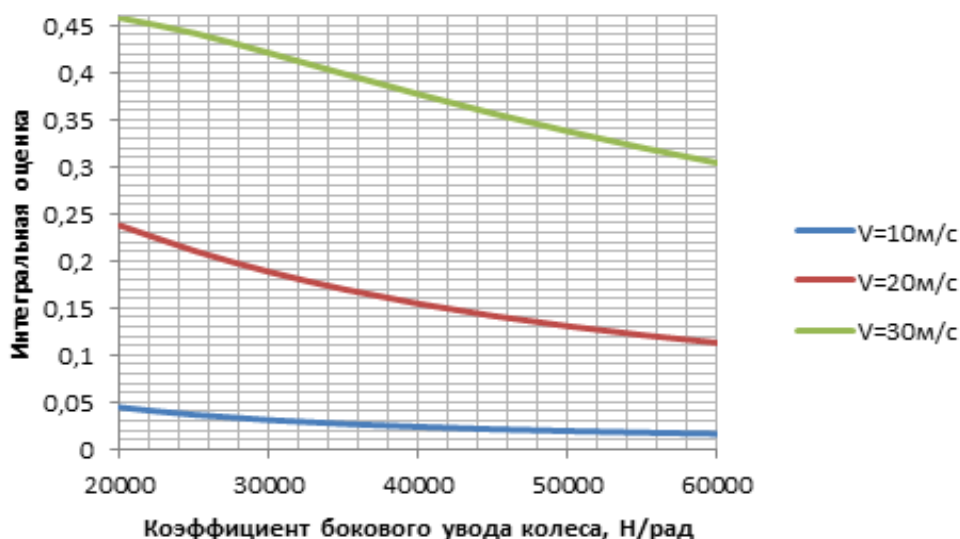
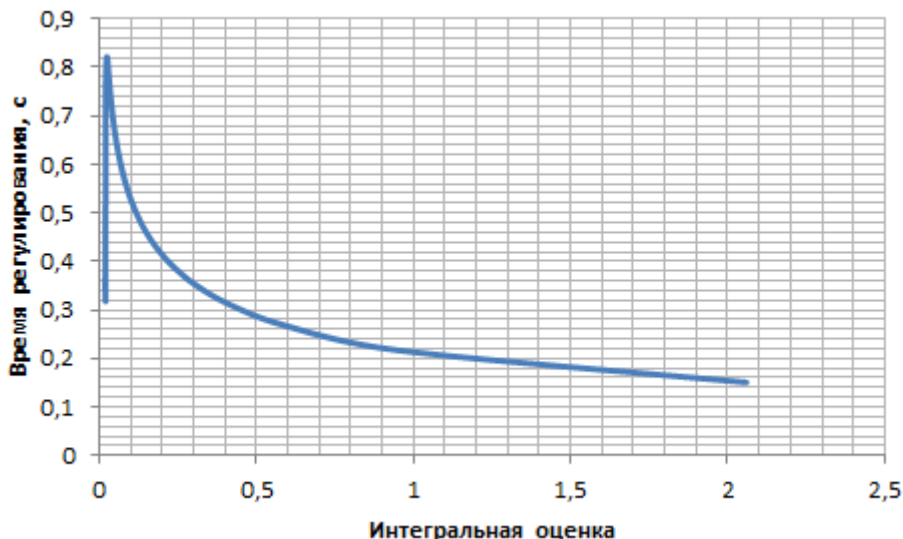


Рис. 4. Зависимость косвенной квадратичной интегральной оценки от абсолютной величины коэффициента сопротивления боковому уводу колеса автомобиля при различных значениях скорости для случая  $M = 3500$  кг

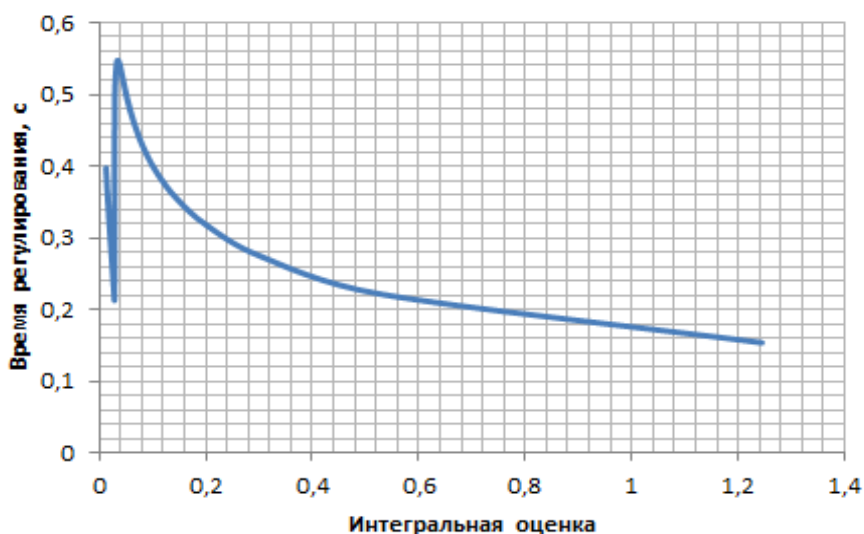
На рис. 1-4 изображены зависимости величины квадратичной интегральной оценки автомобиля, обладающего недостаточной шинной поворачиваемостью, от скорости движения, значения колесной базы, массы автомобиля и коэффициента сопротивления боковому уводу колеса (при условии идентичности всех колес) для всего диапазона изменения указанных параметров транспортного средства, определяющих условия эксплуатации. Как видно из приведенных графиков, интегральная оценка тем больше, чем больше значения скорости и массы автомобиля, и наоборот: тем меньше, чем больше величины колесной базы и коэффициента сопротивления боковому уводу колеса. Как известно из теории автоматического управления и регулирования, оптимальные параметры системы определяют по минимуму интегральной оценки, т.е., чем меньше значение оценки, тем выше качество переходного процесса. Следуя этому ходу рассуждений, мы будем иметь минимальную интегральную оценку при как можно меньшей массе автомобиля, обладающего максимально возможно большой колесной базой и колесами снабженными шинами, имеющими максимально возможный коэффициент сопротивления боковому уводу. Получив представление об изменении интегральной оценки от различных параметров, необходимо далее установить связь между быстродействием автомобиля

как чисто механической системы и качеством переходного процесса по изменению угловой скорости транспортного средства.

Рассмотрим частный случай зависимости длительности переходного процесса от интегральной оценки при изменении величины колесной базы в широком диапазоне. На рис. 5 и 6 изображены графики, описывающие данную связь.



**Рис. 5.** Зависимость длительности переходного процесса (времени регулирования) от значения косвенной квадратичной интегральной оценки для случая  $M = 2600$  кг и  $V = 30$  м/с



**Рис. 6.** Зависимость длительности переходного процесса (времени регулирования) от значения косвенной квадратичной интегральной оценки для случая  $M = 2600$  кг и  $V = 20$  м/с

При построении графиков, изображенных на рис. 5 и 6, величина  $L$  изменялась в диапазоне от 0,1 до 7 м с шагом 0,1 м, искомая зависимость получалась путем вычислений строго определенных величин времени переходного процесса и интегральной оценки, соответствующих конкретному значению  $L$  (увеличение длины колесной базы соответствует уменьшению интегральной оценки). Как видно из графиков, при монотонном увеличении длины колесной базы длительность переходного процесса сначала возрастает до своего максимума, затем резко уменьшается и далее снова возрастает, т.е. быстродействие сначала уменьшается, затем резко возрастает и снова начинает уменьшаться. При этом во всем рассматриваемом диапазоне качество переходного процесса монотонно возрастает.

Таким образом, для автомобиля, обладающего недостаточной поворачиваемостью, при увеличении колесной базы наблюдается улучшение качества переходного процесса, сопровождающееся уменьшением быстродействия. В других случаях, т.е., при изменении массы автомобиля, скорости его движения или коэффициента сопротивления боковому уводу повышение качества переходного процесса соответствует увеличению быстродействия.

### Библиографический список

1. Литвинов, А.С. Управляемость и устойчивость автомобиля / А.С. Литвинов. – М.: Машиностроение, 1971. – 416 с.
2. Воронов, А.А. Основы теории автоматического регулирования и управления / А.А. Воронов, В.К. Титов, Б.Н. Новогранов. – М.: Высшая школа, 1977. – 519 с.
3. Молев, Ю.И. Теоретический расчет переходной реакции движения автомобиля при заданной функции возмущения / Ю.И. Молев, М.Г. Черевастов // Организация и безопасность дорожного движения: материалы XI международной науч.-практ. конф.: в 2 т. / отв. ред. Д.А. Захаров. – Тюмень: ТИУ, 2018. Т. 2. – С. 89-95.

*Дата поступления  
в редакцию: 25.04.2019*

**M.G. Cherevastov, Yu.I. Molev**

### APPLICATION OF SQUARE INTEGRAL EVALUATION FOR THE STUDY OF THE CONTROLLABILITY OF A CAR OWNED WITH INSUFFICIENT TURNABILITY

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

**Purpose:** No determine the expression for calculating the indirect integral assessment of the quality of the transition process caused by the control action on the steering of a car with understeer.

**Design/methodology/approach:** In this paper, based on the application of an indirect integral method of assessing the quality of the transition process, a study was conducted of the vehicle's understeer response to a stepped control effect. The quadratic integral estimate is taken as the criterion for the quality of the transition process. As a result of the study, the dependences of the integral evaluation value on various design parameters of the vehicle and the parameters of its movement were constructed, conclusions were made on the impact of the latter on this assessment and the controllability of the vehicle.

**Findings:** In a car with understeer, with an increase in the wheelbase there is an improvement in the quality of the transition process, accompanied by a decrease in speed. In other cases, that is, when the vehicle weight, speed or drag coefficient of the lateral withdrawal change, the quality of the transition process corresponds to an increase in speed.

**Research limitations / consequences:** The paper used a flat one-mass calculation model of the car, which has its characteristic assumptions. The perturbing effect on steering is a well-known function of time and is purely idealized (step change).

*Key words:* square integral evaluation, understeer, car handling.

## НАШИ АВТОРЫ

### ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

**Андреев Вячеслав Викторович** – заведующий кафедрой «Ядерные реакторы и энергетические установки НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;  
[vyach.andreev@mail.ru](mailto:vyach.andreev@mail.ru)

**Галёмина Елена Александровна** – аспирант МИРЭА – Российского технологического университета;  
[galeminaaa@inbox.ru](mailto:galeminaaa@inbox.ru)

**Дмитриев Сергей Михайлович** – ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, профессор, д-р техн. наук;  
[nttu@nttu.ru](mailto:nttu@nttu.ru)

**Карпычев Владимир Юрьевич** – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;  
[kavlyr@yandex.ru](mailto:kavlyr@yandex.ru)

**Козелков Андрей Сергеевич** – начальник научно-исследовательского отдела 0813 Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики – Российского федерального ядерного центра, д-р физ.-мат. наук;  
[askozelkov@mail.ru](mailto:askozelkov@mail.ru)

**Крутякова Ольга Леонидовна** – научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики – Российского федерального ядерного центра;  
[puch9@yandex.ru](mailto:puch9@yandex.ru)

**Куркин Андрей Александрович** – заведующий кафедрой «Прикладная математика» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук;  
[aakurkin@gmail.com](mailto:aakurkin@gmail.com)

**Курулин Вадим Викторович** – начальник научно-исследовательской группы 0813/5 Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики – Российского федерального ядерного центра, канд. физ.-мат. наук;  
[kurulin@mail.ru](mailto:kurulin@mail.ru)

**Лабутин Николай Григорьевич** – заведующий кафедрой Приволжского института повышения квалификации Федеральной налоговой службы России, доцент, канд. техн. наук;  
[ko\\_kol1@rambler.ru](mailto:ko_kol1@rambler.ru)

**Лещева Светлана Викторовна** – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;  
[vm@nttu.ru](mailto:vm@nttu.ru)

**Мартемьянова Евгения Александровна** – старший преподаватель Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета;  
[van-gog88@mail.ru](mailto:van-gog88@mail.ru)

**Небайкин Станислав Владимирович** – аспирант Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского;  
[stn\\_nn@mail.ru](mailto:stn_nn@mail.ru)

**Обыденнова Светлана Юрьевна** – начальник планово-финансового управления НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
[romashka@nttu.ru](mailto:romashka@nttu.ru)

**Пименов Станислав Александрович** – старший научный сотрудник Научно-исследовательского института измерительных систем им. Ю.Е. Седакова», канд. тех. наук;  
[spimenov\\_m\\_fem@mail.ru](mailto:spimenov_m_fem@mail.ru)

**Старостин Николай Владимирович** – профессор Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, д-р техн. наук;  
[nvstar@mail.ru](mailto:nvstar@mail.ru)

**Тарасова Юлия Сергеевна** – старший преподаватель Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета;  
[tar06@list.ru](mailto:tar06@list.ru)

**Тятюшкина Елена Сергеевна** – младший научный сотрудник НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
[lenu4ka-07@mail.ru](mailto:lenu4ka-07@mail.ru)

**Уткин Дмитрий Александрович** – математик Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики – Российского федерального ядерного центра;  
**dimitryavich@yandex.ru**

**Фролагина Елена Владимировна** – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
**frolaginaev@gmail.com**

**Чечин Андрей Вячеславович** – доцент Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, канд. техн. наук;  
**chechin-a@yandex.ru**

**Чурсин Ростислав Андреевич** – соискатель Российского университета дружбы народов  
**rostislavche@gmail.com**

**Шамин Роман Вячеславович** – профессор МИРЭА – Российского технологического университета, Российского университета дружбы народов, д-р физ.-мат. наук;  
**roman@shamin.ru**

**Шаповал Александр Васильевич** – заведующий кафедрой промышленного дизайна Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета, канд. фил. наук;  
**k\_d@nngasu.ru**

**Шмелева Анна Геннадьевна** – доцент МИРЭА – Российского технологического университета; доцент Российского университета дружбы народов, канд. физ.-мат. наук;  
**ann\_shmeleva@mail.ru**

**Юрова Надежда Вячеславовна** – ст. преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
**vm@nntu.ru**

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ**

**Аношкин Юрий Иванович** – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;  
**yian-nn@yandex.ru**

**Асабин Анатолий Александрович** – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;  
**asanatoliy@yandex.ru**

**Власичев Герман Николаевич** – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;  
**vlas@mts-nn.ru**

**Десятников Валерий Евгеньевич** – инженер-испытатель подразделения 130 Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова, канд. техн. наук;  
**okbm@okbm.nnov.ru**

**Добров Александр Алексеевич** – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
**dobrov@nntu.ru**

**Кодочигов Николай Григорьевич** – канд. техн. наук, главный конструктор РУ ВТГР Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;  
**kodochigov@okbm.nnov.ru**

**Кралин Алексей Александрович** – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;  
**akralin@yandex.ru**

**Кузьма Матвей Михайлович** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
**kuzma.matvey@mail.ru**

**Крюков Евгений Валерьевич** – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
**e.kryukov@rambler.ru**

**Мартынюк Михаил Владимирович** – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;  
**m\_mart@mail.ru**

**Минеев Иван Владимирович** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
**van130712@gmail.com**

**Миронов Никита Анатольевич** – инженер-испытатель подразделения 130 АО Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;  
**okbm@okbm.nnov.ru**

**Мордвинцев Владимир Михайлович** – ведущий инженер Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;  
**mvm1946@yandex.ru**

**Мулин Максим Максимович** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
**max.m@nstuedu.com**

**Пичков Сергей Николаевич** – главный специалист подразделения 130 Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова, д-р техн. наук;  
**okbm@okbm.nnov.ru**

**Помысухина Алина Евгеньевна** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
**alina.p@nstuedu.com**

**Сидоров Антон Юрьевич** – начальник бюро подразделения 130 Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;  
**okbm@okbm.nnov.ru**

**Субарев Михаил Алексеевич** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
**mihail95sub@yandex.ru**

**Сухарев Юрий Петрович** – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, главный специалист Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова, д-р техн. наук;  
**y.sukharev@yandex.ru**

**Трехонин Илья Владимирович** – ведущий специалист Арзамасского приборостроительного завода им. П.И. Пландина;  
**tre.il@yandex.ru**

**Улюшкин Александр Вениаминович** – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;  
**uav1983@inbox.ru**

#### **МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО**

**Беляков Владимир Викторович** – начальник Управления научно-исследовательских и инновационных работ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;  
**belyakov@nntu.ru**

**Береснев Павел Олегович** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
**pavel.beresnev@nntu.ru**

**Бутарович Дмитрий Олегович** – доцент, старший научный сотрудник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук;  
**buta73@mail.ru**

**Бутин Данила Александрович** – инженер научно-исследовательской лаборатории НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
**Butin91@yandex.ru**

**Васильев Алексей Анатольевич** – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
**alex03111990@mail.ru**

**Вахидов Умар Шахидович** – заведующий кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева, профессор, д-р техн. наук;  
**umar-vahidov@mail.ru**

**Вашурин Андрей Сергеевич** – инженер НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;  
**Vashurin@nntu.ru**

**Втюрина Марина Николаевна** – доцент Вятской государственной сельскохозяйственной академии, канд. хим. наук;  
**Vtyurina-60@mail.ru**

**Гончаров Роман Борисович** – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана;  
**goncharov.roman@bmstu.ru**

**Дунаев Игорь Игоревич** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
**igor.dunaev@bap.boryszew.ru**

**Зубакин Алексей Сергеевич** – аспирант Вятского государственного университета;  
**expert35@mail.ru**

**Зузов Валерий Николаевич** – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук;  
**zuzvalery@rambler.ru**

**Ерофеева Лариса Николаевна** – заведующая кафедрой «Высшая математика» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;  
**erofeevaln@mail.ru**

**Кантор Павел Яковлевич** – доцент Вятского государственного университета, канд. физ.-мат. наук;  
**shawl@list.ru**

**Кукушкин Алексей Андреевич** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
**alekseyandreevich.kukushkin@bk.ru**

**Мазунова Лариса Николаевна** – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
**matematixx@mail.ru**

**Макаров Владимир Сергеевич** – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;

**makvl2010@gmail.com**

**Малыгин Александр Львович** – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;

**al.malygin.dpi@yandex.ru**

**Марковнина Алина Ивановна** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

**alinomalino@yandex.ru**

**Молев Юрий Игоревич** – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;

**moleff@yandex.ru**

**Никандров Игорь Семенович** – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук;

**ktmdpington@mail.ru**

**Палутин Юрий Васильевич** – профессор Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, д-р техн. наук;

**ait.ngtu@gmail.com**

**Папунин Алексей Валерьевич** – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

**Lexa-lenia@rambler.ru**

**Парамонов Владислав Владимирович** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

**vlad.paramonov2@mail.ru**

**Пинчин Алексей Викторович** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

**pinchinav96@gmail.com**

**Плотников Сергей Александрович** – профессор Вятского государственного университета, д-р техн. наук;

**Plotnikovsa@bk.ru**

**Порубов Дмитрий Михайлович** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

**dmitry.porubov@nntu.ru**

**Прохоров Иван Владимирович** – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана;

**prokhoroviv@yandex.ru**

**Рябов Денис Михайлович** – доцент, старший научный сотрудник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук;

**rbvdns@gmail.com**

**Торопов Евгений Иванович** – инженер НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

**evgeny.toropov@nntu.ru**

**Трусов Александр Павлович** – магистр НГТУ им. Р.Е. Алексеева;

**ait.ngtu@gmail.com**

**Тумасов Антон Владимирович** – директор Института транспортных систем НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук;

**anton.tumasov@gmail.com**

**Тюгин Дмитрий Юрьевич** – ведущий научный сотрудник НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;

**dmitry.tyugin@nntu.ru**

**Черевастов Максим Геннадьевич** – аспирант Нижегородского государственного педагогического университета им. К. Минина;

**chermaxim\_1978@mail.ru**

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ АВТОРСКИХ РЕЗЮМЕ

(АННОТАЦИЙ, РЕФЕРАТОВ К СТАТЬЯМ)

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания документа, включающее основные фактические сведения и выводы описываемой работы. Объем не менее 10 строк (100–250 слов – 850 знаков). Реферат включает: 1) предмет, тему, цель работы; 2) метод или методологию проведения работы; 3) результаты и область их применения; 4) выводы. Таблицы, формулы, рисунки (нумерация в реферате может не совпадать с текстом статьи) включаются, если раскрывают основное содержание документа и позволяют сократить объем реферата.

Реферат можно начать с изложения результатов работы и выводов. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных слов. Текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (*consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result*). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Авторское резюме из *International Journal of Operations & Production Management*. V. 22. N 8.

**B. Meijboom, M. Houtepens**

### **STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR**

#### **The title of organization**

**Purpose:** The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

**Design/methodology/approach:** A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

**Findings:** It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research in the international manufacturing sector.

**Originality/value:** Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

*Key words:* multinationals, service operations, location, decision making, case studies.



**ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ  
«ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

*Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24*

*Телефон: 8(920)00-37-877*

*E-mail: [rsl@nntu.ru](mailto:rsl@nntu.ru)*

***ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ***

- В редакцию направляют **два экземпляра** статьи и комплекта сопроводительной документации: бумажный и электронный.
- Желательно, чтобы объем статьи не превышал 10 страниц текста и 4–6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 6.
- **Статью необходимо сопроводить** актом и протоколом экспортного контроля, экспертным заключением о возможности открытого опубликования, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию, сведениями об авторах и рецензией от внешней организации, подписанной доктором наук и заверенной печатью.
- Статья должна быть подписана всеми авторами.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в таком порядке); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию; ключевые слова (не более 10).
- Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. 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.
- Статья должна завершаться **информацией на английском языке**: инициалы и фамилии авторов, тема, названия организаций, в которых работают авторы, реферат и ключевые слова.
- К статье следует **приложить файл с информацией об авторах** на русском языке: ФИО (полностью), место работы, должность, ученая степень и звание, служебный телефон и адрес электронной почты.
- Текст набирают через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм. Переносы не допускаются. Используется формат **Word for Windows** и стандартные шрифты **Times New Roman** и **Symbol**.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3 –12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается.
- 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. Изображение выполняется в формате **jpg** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисовочная подпись 11 жирный кегль.

**РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ  
ПРИНИМАЮТСЯ ПО СЛЕДУЮЩИМ АДРЕСАМ:**

**05.05.03 Колесные и гусеничные машины**

Владимир Сергеевич Макаров: [vladimir.makarov@nntu.ru](mailto:vladimir.makarov@nntu.ru)

**05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы**

Евгений Викторович Бычков: [fae\\_nir@nntu.ru](mailto:fae_nir@nntu.ru)

**05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование,  
эксплуатацию и выход из эксплуатации**

Максим Александрович Легчанов: [legchanov@nntu.ru](mailto:legchanov@nntu.ru)

**05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям).  
05.13.17 Теоретические основы информатики**

Валерий Павлович Хранилов: [hranilov@nntu.ru](mailto:hranilov@nntu.ru)

16+

**ТРУДЫ НГТУ  
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

**№ 2 (125)**

Редактор: **В.И. Казакова**  
Технические редакторы: **М.В. Прохорова, А.В. Крылова**

*Редакция:*  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.  
rsl@nntu.ru  
Свободная цена

Подписано в печать: 24.06.2019. Дата выхода в свет 27.06.2019. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 32,0. Тираж 300 экз. Заказ .

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.  
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

**Индекс 44757**  
**Объединенный каталог «Пресса России»**

**Свидетельство о регистрации**  
**периодического печатного издания**  
**ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013**