

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

# **ТРУДЫ НГТУ**

## **им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

*Журнал издается с 2010 года*

**№ 3 (138)**

**Нижний Новгород 2022**

УДК 050(06)  
ББК 9я54  
Т 78

Т78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2022. № 3 (138).  
– 128 с.

*Выходит 4 раза в год*

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

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

**Главный редактор А.А. Куркин**

### **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

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

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

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

### **РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

**Председатель**

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

### **ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА**

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

### **УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:**

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

Электронная версия журнала:  
<https://www.nntu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva>

Средство массовой информации  
зарегистрировано Роскомнадзором:  
ПИ № ФС 77-56417 от 11.12.2013

УДК 050(06)  
ББК 9я54

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

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

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

*Published since 2010*

**№ 3 (138)**

**Nizhny Novgorod 2022**

*The journal is issued 4 times a year*

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

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

## **EDITORIAL BOARD**

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

**V.P. Khranilov** – Executive Secretary of the Section «Informatics and Management in Technical and Social Systems»

**M.A. Legchanov** – Executive Secretary of the Section «Energy Systems and Complexes»

**V.S. Makarov** – Executive Secretary of the Section «Mechanical Engineering and Transport»

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

## **EDITORIAL COUNCIL**

**Chairman**

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

### **Members of Editorial Council**

**Pelinovski Dmitri**

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

**László Palkovics**

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

**Péter Várlaki**

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

**Vijay Kumar Chakka**

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

**Yalciner Akhmet**

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

Founder and publisher: federal state budgetary educational  
institution of higher education «Nizhny Novgorod State  
Technical University n.a. R.E. Alekseev»  
(603950, Nizhny Novgorod Region, Nizhny Novgorod, Minin St., 24)

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

*Electronic version of the journal:  
<https://www.nmtu.ru/content/nauka/zhurnal-trudy-ngtu-im-r-e-alekseeva>*

© Nizhny Novgorod State Technical University  
n.a. R.E. Alekseev, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ</b> .....	<b>7</b>
<b>Коротков А.В.</b> Конечно-объемная дискретизация прямого метода решения задач сопряженного теплообмена в пакете программ «Логос» .....	<b>7</b>
<b>Лабутин Н.Г., Костин П.В.</b> Моделирование действий специалиста при оценке угроз безопасности информации в информационных системах и сетях в соответствии с новой методикой ФСТЭК России .....	<b>22</b>
<b>Попов А.А., Косырева О.Н., Добротин С.А.</b> Оценка показателей прецизионности результатов измерений в научных исследованиях на основе правила сложения дисперсий .....	<b>32</b>
<b>Хлыбов А.А., Богатиков В.Н., Ерофеев В.И., Иляхинский А.В.</b> Метод и алгоритм анализа процессов управления в многоуровневых и распределенных системах в условиях неустраняемой неопределенности на основе статистической модели распределения Дирихле .....	<b>44</b>
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ</b> .....	<b>54</b>
<b>Дмитриев С.М., Соборнов П.Е., Рязанов Р.Р., Мамаев А.В., Котин А.В., Легчанов М.А., Треушников М.В.</b> Результаты экспериментального исследования и численного моделирования циклонного фильтра с постоянными магнитами для систем спецводоочистки ЯЭУ .....	<b>54</b>
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО</b> .....	<b>66</b>
<b>Елисеев М.Е., Корчажкин М.Г., Елисеева И.Н.</b> О влиянии на подвижность транспортных средств метеоусловий и определении оптимального количества и расположения дорожных метеостанций .....	<b>66</b>
<b>Колин А.А., Кравец В.Н., Мусарский Р.А., Тумасов А.В., Наумов В.Н., Кулепов В.Ф., Орлов Л.Н.</b> Исследование влияния передаточных чисел трансмиссии на показатели тягово-скоростных и топливно-экономических свойств автобуса .....	<b>75</b>
<b>Лю И, Зузов В.Н.</b> Численное моделирование клеевого соединения в автомобильных конструкциях при квазистатическом нагружении с использованием усовершенствованной модели его свойств .....	<b>84</b>
<b>Никандров И.С., Малыгин А.Л., Шурашов А.Д., Краснов Ю.В.</b> Исследование влияния хода машины планировщика и числа оборотов фрезы на силу резания снежно-ледовой массы тороса .....	<b>98</b>
<b>Тинт Наинг Вин, Алакин В.М.</b> Исследование влияния крена кузова на поперечную устойчивость грузового фургона при повороте .....	<b>106</b>
<b>Умирзиков А.М., Трояновская И.П., Бердиев А.Л., Сайдуллозода С.С.</b> Особенности механизма изнашивания автомобильных шин в условиях горных карьеров .....	<b>114</b>
<b>НАШИ АВТОРЫ</b> .....	<b>124</b>

## CONTENTS

<b>COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS .....</b>	<b>7</b>
<b>Korotkov A.V.</b> Finite-volume discretization of direct method for solving of conjugate heat transfer problems in the «LOGOS» software package .....	7
<b>Labutin N.G., Kostin P.V.</b> Modeling of a specialist's actions at assessment of information security threats in information systems and networks in accordance with the new methodology of FSTEC of Russia .....	22
<b>Popov A.A., Kosyreva O.N., Dobrotin S.A.</b> Assessment of precision indicators for measurement results in scientific research based on the variances addition rule .....	32
<b>Khlybov A.A., Bogatikov V.N., Erofeev V.I., Ilyakhinskii A.V.</b> Method and algorithm for analysis of processes of control in multilevel and distributed systems under conditions of unrecoverable uncertainty based on Dirichlet distribution statistical model .....	44
 <b>ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES .....</b>	 <b>54</b>
<b>Dmitriev S.M., Sobornov P.E., Ryazapov R.R., Mamaev A.V., Kotin A.V., Legchanov M.A., Treushnikov M.V.</b> Results of experimental research and numerical simulation of cyclone filter with permanent magnets for NPP special water treatment systems .....	54
 <b>MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION .....</b>	 <b>66</b>
<b>Eliseev M.E., Korchazhkin M.G., Eliseeva I.N.</b> About the impact of weather conditions on mobility of vehicles, and determination of the optimal number and location of road weather stations .	66
<b>Kolin A.A., Kravets V.N., Musarskiy R.A., Tumasov A.V., Naumov V.N., Kulepov V.F., Orlov L.N.</b> Study of effect of transmission gear ratios on indicators of traction-speed and fuel-economy properties of a bus .....	75
<b>Liu Yi, Zuzov V.N.</b> Numerical simulation of adhesive joint in automobile designs under quasi-static loading using an improved model of its properties .....	84
<b>Nikandrov I.S., Malygin A.L., Shurashov A.D., Krasnov Yu.V.</b> Study of effect of surface planning machine travel and effect of cutter revolutions number on hummock snow-and-ice bulk cutting force .....	98
<b>Tint Naing Win, Alakin V.M.</b> Study of effect of body roll on lateral stability of a cargo van when turning .....	106
<b>Umirzokov A.M., Troynovskaya I.P., Berdiev A.L., Saidullozoda S.S.</b> Specifics of automobile tire wear mechanism in conditions of quarries .....	114
 <b>AUTHORS .....</b>	 <b>124</b>

---

## ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

---

УДК 519.6

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_7

### КОНЕЧНО-ОБЪЕМНАЯ ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ПРЯМОГО МЕТОДА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ «ЛОГОС»

**А.В. Коротков**ORCID: 0000-0001-9110-4128 e-mail: [alvladkor79@mail.ru](mailto:alvladkor79@mail.ru)

Российский Федеральный Ядерный Центр –

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики

*Саров, Россия*

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

*Нижний Новгород, Россия*

Рассматриваются вопросы численного решения задач сопряженного теплообмена на сеточных моделях, содержащих произвольные неструктурированные сетки. Описана конечно-объемная дискретизация уравнения теплопроводности на основе прямого метода сопряжения, подразумевающая построение и решение единой системы линейных уравнений для жидкости и твердых тел относительно температуры. Представлено описание численной схемы, учитывающей разномасштабность ячеек и резко различающиеся теплофизические свойства на границе раздела жидкой и твердой сред. Показаны алгоритм построения сопряженной матрицы и вид матричных коэффициентов, отвечающих за сопряженный теплообмен и способы их вычисления. Работоспособность представленного метода демонстрируется на примере расчета задач сопряженного теплообмена, сеточные модели которых состоят из неструктурированных фрагментов сетки.

**Ключевые слова:** гидродинамические течения, метод конечных объемов, неструктурированная сетка, сопряженный теплообмен, алгоритм SIMPLE, сопряженный сеточный интерфейс, ЛОГОС.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Коротков, А.В. Конечно-объемная дискретизация прямого метода решения задач сопряженного теплообмена в пакете программ «ЛОГОС» // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 7-21. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_7

### FINITE-VOLUME DISCRETIZATION OF DIRECT METHOD FOR SOLVING OF CONJUGATE HEAT TRANSFER PROBLEMS IN THE «LOGOS» SOFTWARE PACKAGE

**A.V. Korotkov**ORCID: 0000-0001-9110-4128 e-mail: [alvladkor79@mail.ru](mailto:alvladkor79@mail.ru)

Russian Federal Nuclear Center –

The All-Russian Research Institute of Experimental Physics

*Sarov, Russia*

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Issues of numerical solution for problems of conjugate heat transfer on grid models containing arbitrary unstructured grids, are considered. Finite-volume discretization of the thermal conductivity equation based on the direct method of conjugation, implying the construction and solution of a unified system of linear equations for liquids and solids with respect to temperature, is described. Description of numerical scheme that takes into account the

different scales of cells and contrasting thermo-physical properties at a liquid–solid interface, is presented. Algorithm for arraying of conjugate matrix, and the type of matrix coefficients responsible for the conjugate heat transfer, and methods of calculation thereof, are shown. Efficiency of the presented method is demonstrated by the example of calculation of conjugate heat transfer problems, the grid models of which consist of unstructured fragments of the grid.

**Key words:** hydrodynamic flows, finite volume method, unstructured mesh, conjugate heat transfer, SIMPLE algorithm, multiple mesh interface, LOGOS.

**FOR CITATION:** A.V. Korotkov. Finite-volume discretization of direct method for solving of conjugate heat transfer problems in the «LOGOS» software package. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 3. Pp. 7-21. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_7

## Введение

Одним из наиболее востребованных классов производственных задач являются задачи сопряженного теплообмена, играющие важную роль в процессе проектирования и оптимизации конструкций изделий, при эксплуатации которых решающими факторами могут быть тепловые ограничения. Численное решение позволяет получить распределение температур в пространстве и времени, выявляющее проблемные зоны при моделировании нештатных ситуаций в проектируемых конструкциях, для которых натурный эксперимент зачастую невозможен или связан со значительными финансовыми затратами [1-5].

Для расчета задач сопряженного теплообмена на границах раздела жидкости и твердых тел могут быть использованы несколько подходов, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. Наименее требовательным к вычислительным ресурсам является способ, при котором расчет полей в жидкости производится в стационарной постановке и только в ключевых точках, используемых для построения в тепловых граничных условиях на границе раздела жидкости и твердого тела [6,7]. В таких исследованиях обычно используются гипотезы, основанные на эмпирических данных и инженерном опыте, что при расчете тепловых процессов в геометрически сложных конструкциях может привести к значительным ошибкам в оценке температурного поля. В последовательном подходе задач сопряженного теплообмена [8-12] расчет полей температуры в подобластях жидкости и твердого тела производится с помощью различных расчетных модулей. Такой подход подразумевает явное выделение границ в области сопряжения и наличия механизма обмена граничными условиями между расчетными модулями с последующей их итерационной увязкой. Основным недостатком последовательного подхода является необходимость итерационного согласования постоянно меняющихся граничных условий, значительно замедляющая процесс сходимости. Это особенно заметно при решении нестационарных задач.

В последнее время все более востребованным становится решение нестационарных задач сопряженного теплообмена на подробных трехмерных сеточных моделях. Наиболее эффективным для данных случаев является применение прямого метода сопряжения [13-17], подразумевающего одновременную дискретизацию уравнения теплопроводности в жидкости и твердом теле и построение единой связанной системы алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно температуры. Несмотря на то, что прямой метод является наиболее требовательным к вычислительным ресурсам, его использование значительно ускоряет процесс сходимости и является наиболее универсальным, позволяющим одинаково эффективно решать стационарные и нестационарные задачи.

В настоящей работе рассмотрена конечно-объемная дискретизация прямого метода сопряжения для задач, содержащих произвольные неструктурированные сетки на границе раздела жидкости и твердого тела. Представлено описание численной схемы, применяемой при дискретизации уравнения теплопереноса на границе раздела, учитывающей разномасштабность ячеек и резко различающиеся физические свойства жидкой и твердой сред. Показан алгоритм построения сопряженной матрицы, вид матричных коэффициентов, отвечающих за сопряженный теплообмен, а также способы их вычисления.



Численный метод, представленный в данной работе, реализован на базе отечественного пакета программ ЛОГОС [18-21]. Работоспособность представленного метода демонстрируется на примере решения задачи охлаждения ламинарным потоком несжимаемой жидкости шести твердотельных блоков с объемным тепловыделением и задачи расчета смешанной конвекции в квадратной камере с твердотельным блоком.

### Математическая модель

В задачах сопряженного теплообмена область численного моделирования делится на жидкую и твердую подобласти (рис. 1).

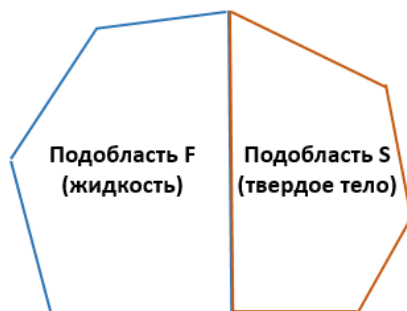


Рис. 1. Пример сопряжения жидкой и твердой подобластей

Fig. 1. Example of conjugation of liquid and solid subdomains

Рассмотрим математическую модель, в которой подобласть жидкости представляет собой ламинарную несжимаемую жидкость с постоянным коэффициентом теплопроводности и отсутствующими источниками (в том числе, диссипативными) тепла. С учетом перечисленных выше допущений, уравнения теплопереноса для подобласти жидкости, записанное относительно температуры, принимает вид:

$$\rho_F C_F \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_F C_F \nabla \cdot (\mathbf{u}T) = \nabla \cdot (k_F \nabla T), \quad (1)$$

где  $\rho_F$  – плотность жидкости;

$C_F$  – теплоемкость жидкости;

$\mathbf{u}$  – вектор скорости жидкой фазы;

$k_F$  – коэффициент теплопроводности жидкости;

$t$  – время.

В уравнении (1) вектор скорости движения жидкой фазы  $\mathbf{u}$  определяется решением системы уравнений Навье-Стокса, например, с помощью известного алгоритма SIMPLE [17, 22-24], при этом на границе раздела сред со стороны жидкости принимается граничное условие стенки с прилипанием. Рассматриваемая подобласть твердого тела представляет собой неподвижное твердое тело с постоянным коэффициентом теплопроводности с отсутствующими источниками тепла. С учетом перечисленных допущений, уравнение теплопереноса для твердой среды, записанное относительно температуры, принимает вид:

$$\rho_S C_S \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_S \nabla T), \quad (2)$$

где  $\rho_S$  – плотность твердого тела;

$C_S$  – теплоемкость твердого тела;

$k_S$  – коэффициент теплопроводности твердого тела;

$t$  – время.

Необходимым условием сопряжения уравнений (1) и (2) является выполнение закона сохранения энергии, т.е. равенство тепловых потоков на границе раздела жидкости и твердого тела:

$$q_F = q_S, \quad (3)$$

где  $q_F$  – тепловой поток со стороны жидкости,  $q_S$  – тепловой поток со стороны твердого тела.

Рассмотрим конечно-объемную дискретизацию прямого метода сопряжения, на примере дискретизации уравнений теплопереноса (1) и (2) с учетом условия сопряжения (3) для случая согласованных сеток на границе раздела сред, представляющей собой согласованный интерфейс (рис. 2).

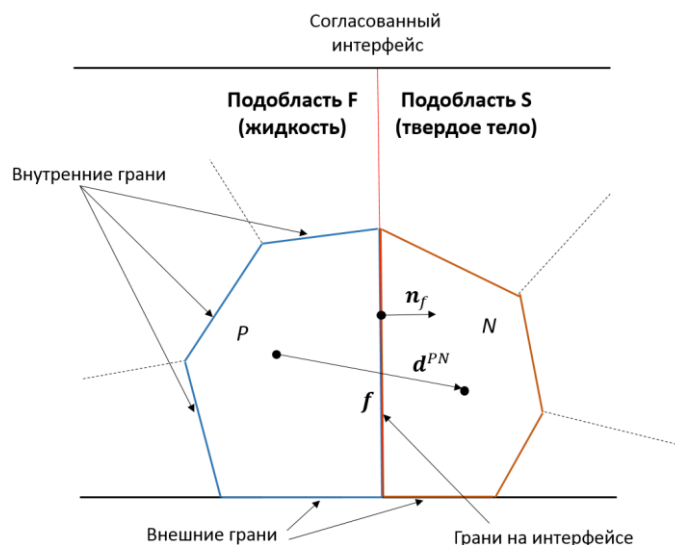


Рис. 2. Схематичный пример сетки с согласованным интерфейсом на границе раздела сред

Fig. 2. Schematic example of a grid with consistent interface at the interface of media

В качестве примера рассмотрим вычислительную область моделирования, состоящую из двух контрольных объемов, занятых жидкостью и твердым телом соответственно (рис. 2). В общем случае полный вид дискретных аналогов дифференциальных уравнений теплопереноса для ячейки  $P$  жидкой среды (1) и ячейки  $N$  твердой среды (2), представленных на рис. 2, при аппроксимации временного слагаемого с помощью неявной схемы Эйлера [25], определяются выражениями:

$$\rho_F C_F \frac{T_P - T_P^{t-1}}{\Delta t} V_P + Conv_P - D_P = 0, \quad (4)$$

$$\rho_S C_S \frac{T_N - T_N^{t-1}}{\Delta t} V_N - D_N = 0, \quad (5)$$

где  $T_P$ ,  $T_N$  – значение температуры в центрах ячеек  $P$  и  $N$  на текущем временном шаге,  $T_P^{t-1}$ ,  $T_N^{t-1}$  – значение температуры в центрах ячеек  $P$  и  $N$  на предыдущем временном шаге,  $Conv_P$  – конвективное слагаемое для ячейки  $P$  на текущем временном шаге,  $D_P$ ,  $D_N$  – диффузионные слагаемые для ячеек  $P$  и  $N$  на текущем временном шаге.

Диффузионные слагаемые в (4) и (5) для ячеек  $P$  и  $N$  на текущем временном шаге определяются выражениями:

$$D_P = \sum_{f=face(P_{inner}, P_{bound})} k_F(\nabla T_f \cdot S_f) + \sum_{f=face(P_{interface})} k_f(\nabla T_f \cdot S_f), \quad (6)$$

$$D_N = \sum_{f=face(N_{inner}, N_{bound})} k_S(\nabla T_f \cdot S_f) + \sum_{f=face(N_{interface})} k_f(\nabla T_f \cdot S_f), \quad (7)$$

где  $S_f = S_f n_f$  – площадь, ориентированная по нормали к грани  $f$ ,  $S_f$  – площадь грани  $f$ ,  $T_f$  – температура в центре грани  $f$  на текущем временном шаге,  $u_f$  – скорость в центре грани  $f$  на текущем временном шаге,  $\nabla T_f$  – градиент температуры на грани  $f$  на текущем временном шаге,  $k_f$  – коэффициент теплопроводности на интерфейсных гранях,  $f = face(P_{inner}, P_{bound})$  – суммирование по всем внутренним и внешним граням, ограничивающим ячейку  $P$ ,  $f = face(P_{interface})$  – суммирование по всем интерфейсным граням, ячейки  $P$ ,  $f = face(N_{inner}, N_{bound})$  – суммирование по всем внутренним и внешним граням, ограничивающим ячейку  $N$ ,  $f = face(N_{interface})$  – суммирование по всем интерфейсным граням, ячейки  $N$ .

Градиент температуры на внутренних гранях и гранях согласованных интерфейсов для произвольных неструктурированных сеток с учетом поправки на неортогональность [26] на итерации  $n$  текущего временного шага определяется выражением:

$$\nabla T_f = \left( T_{A_i}^n - T_{A_j}^n \right) \frac{S_f}{S_f \cdot d_{A_i A_j}} + \overline{\nabla T_f^{n-1}} - \left( \overline{\nabla T_f^{n-1}} \cdot d_{A_i A_j} \right) \frac{S_f}{S_f \cdot d_{A_i A_j}}, \quad (8)$$

где  $A_i$  и  $A_j$  – ячейки смежные через грань  $f$ ,  $d_{A_i A_j}$  – вектор между центрами ячеек  $A_i$  и  $A_j$  (рис. 2),  $T_{A_i}^n$ ,  $T_{A_j}^n$  – значение температуры в центрах смежных ячеек на итерации  $n$ ,  $\overline{\nabla T_f^{n-1}} = \lambda_f \nabla T_{A_i}^{n-1} + (1 - \lambda_f) \nabla T_{A_j}^{n-1}$  – интерполированная величина температуры на грани  $f$  на итерации  $n - 1$ .

Значения градиентов температуры в центрах ячеек могут быть вычислены по алгоритму Грина-Гаусса [23]:

$$\nabla T_{A_i} = \frac{1}{V_{A_i}} \sum_{f=face(A_i)} T_f S_f. \quad (9)$$

В конвективном слагаемом дискретного аналога дифференциального уравнения теплопереноса в жидкой среде (4) на интерфейсных гранях, представляющих собой границу раздела, принимается граничное условие стенка с прилипанием. В результате все компоненты скорости  $u_f$  на интерфейсных гранях принимаются равными нулю, и конвективное слагаемое дискретного аналога дифференциального уравнения теплопереноса для ячейки  $P$  на текущем временном шаге принимает вид:

$$Conv_P = \rho_F C_F \sum_{f=face(P_{inner}, P_{bound})} T_f (u_f \cdot S_f), \quad (10)$$

где  $u_f$  – скорость в центре грани  $f$  на текущем временном шаге,  $T_f$  – температура на интерфейсной грани  $f$  на текущем временном шаге,  $f = face(P_{inner}, P_{bound})$  – суммирование по всем внутренним и внешним граням, ограничивающим ячейку  $P$ .

Значения неизвестных величин  $T_f$  и  $u_f$  в выражении (10) для внешних граней определяются граничными условиями расчетной модели, а для внутренних граней могут быть вычислены по любой из известных схем аппроксимации [23]. Например, в случае использова-

ния схемы аппроксимации CD значения величин  $T_f$  и  $u_f$  на внутренних гранях определяются методом взвешенной интерполяции:

$$T_f = \lambda_f T_{A_i} + (1 - \lambda_f) T_{A_j}, \quad (11)$$

$$u_f = \lambda_f u_{A_i} + (1 - \lambda_f) u_{A_j}, \quad (12)$$

где  $A_i$  и  $A_j$  – ячейки смежные через внутреннюю грань  $f$ ,  $\lambda_f$  – значение геометрического интерполяционного коэффициента для грани  $f$ ,  $T_{A_i}$ ,  $T_{A_j}$  – значения температур в центрах смежных ячеек  $A_i$  и  $A_j$  на текущем временном шаге,  $u_{A_i}$ ,  $u_{A_j}$  – значения скоростей в центрах смежных ячеек  $A_i$  и  $A_j$  на текущем временном шаге.

Значение геометрического интерполяционного коэффициента  $\lambda_f$  для ячеек  $A_i$  и  $A_j$ , через грань  $f$  (рис. 2) определяется выражением:

$$\lambda_f = \frac{|n_f \cdot d^{A_i A_j}|}{|n_f \cdot d^{A_i A_j}| + |n_f \cdot d^{A_j A_i}|}, \quad (13)$$

где  $d^{A_i A_j}$  и  $d^{A_j A_i}$  – вектора, построенные между центрами ячеек  $A_i$  и  $A_j$  через грань  $f$  (рис. 2).

Равенство тепловых потоков (4), являющееся необходимым условием сопряжения уравнений (2) и (3) для смежных через интерфейс ячеек  $P$  и  $N$  (рис. 2), с учетом равенства температур на интерфейсных гранях можно записать в виде:

$$q_P = q_N = -k_F \frac{T_P - T_f}{d_{Nf}} = -k_S \frac{T_f - T_N}{d_{Pf}} = -k_f \frac{T_P - T_N}{d_{PN}}, \quad (14)$$

где  $k_f$  – коэффициент теплопроводности на интерфейсной грани  $f$ ,  $q_P$ ,  $q_N$  – тепловые потоки со стороны ячеек  $P$  и  $N$ ,  $T_P$  и  $T_N$  – значения температур в центрах ячеек  $P$  и  $N$ ,  $d_{PN}$  – вектор, построенный между центрами ячеек  $P$  и  $N$  (рис. 2).

При расчете значения усредненного коэффициента  $k_f$  на интерфейсных гранях смежных фрагментов произвольных неструктурированных сеток должны быть учтены различия коэффициентов теплопроводности сред и геометрических параметров ячеек в области сопряжения. В случае сопряжения сред со значительно отличающимися теплофизическими свойствами использование очевидных способов вычисления эффективной теплопроводности (среднегеометрическое или среднеарифметическое усреднение) может быть причиной большой погрешности, и их применение ограничено небольшими изменениями коэффициентов теплопроводности жидкости и твердого тела. В работах [17, 27, 28] показано, что наиболее универсальным и точным способом, учитывающим различие теплофизических свойств и неравномерности сеточной модели сопрягаемых сред, является среднегармонический способ расчета коэффициента теплопроводности с учетом неравномерности сеточной модели:

$$k_f = \frac{1}{\frac{\lambda_f}{k_F} + \frac{1 - \lambda_f}{k_S}}, \quad (15)$$

где  $k_F$  и  $k_S$  – коэффициенты теплопроводности жидкой и твердой сред соответственно,  $\lambda_f$  – значение геометрического интерполяционного коэффициента для интерфейсной грани  $f$  (13).

Равенство (14) позволяет совместно решать систему уравнений (5) и (6), используя одинаковый подход к дискретизации потоков тепла как со стороны жидкости, так и со сто-

роны твердого тела, приводя к общей системе алгебраических уравнений, которая решается совместно в жидкой и твердой подобластях. Например, для произвольной ячейки  $P$  (рис. 2) составляется уравнение:

$$a_P T_P + a_{PN} T_N + \sum_{i=nb(P)} a_i T_i = b_P, \quad (16)$$

где  $a_P$  – диагональный коэффициент ячейки  $P$ ,  $a_{PN}$  – недиагональный коэффициент определяющий связь ячейки  $P$  с ячейкой  $N$  через согласованный интерфейс на смежных границах жидкой и твердой сред,  $a_i$  – недиагональные коэффициенты определяющие связь ячейки  $P$  с ячейками в расчетной подобласти  $F$  через общие (внутренние) грани и  $b_P$  – правая часть,  $i = nb(P)$  – суммирование по всем соседним ячейкам  $i$  имеющим общие грани с ячейкой  $P$ .

В результате для сеточной модели, состоящей из двух согласованных расчетных под областей  $F$  и  $S$  (рис. 2), формируется СЛАУ (17), которая может быть решена одним методом, подробно описанных в работах [23, 29, 30].

Согласованный  
интерфейс

	Подобласть F (жидкость)	Подобласть S (твердое тело)	
	F <sub>1</sub>	S <sub>1</sub>	
	F <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>	
	...	...	
	F <sub>N</sub>	S <sub>N</sub>	

Рис. 3. Схематичный пример согласованного интерфейса на смежных границах жидкой и твердой сред

Fig. 3. Schematic example of a consistent interface at adjacent boundaries of liquid and solid media

$$\begin{pmatrix} a_{F_1} & \dots & 0 & a_{F_1 S_1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & a_{F_N} & 0 & \dots & a_{F_N S_N} \\ a_{F_1 S_1} & \dots & 0 & a_{S_1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & a_{F_N S_N} & 0 & \dots & a_{S_N} \end{pmatrix} (T) = (b), \quad (17)$$

где  $a_{F_i}$ ,  $i \in [1..N]$  – диагональные коэффициенты ячеек в под области  $F$ ,  $a_{S_i}$ ,  $i \in [1..N]$  – диагональные коэффициенты ячеек в под области  $S$ ,  $a_{F_i S_i}$  – недиагональные коэффициенты определяющие связь ячеек  $F_i$  с ячейками  $S_i$  через интерфейсные грани,  $(T)$  – вектор искомых температур в центрах ячеек,  $(b)$  – вектор правой части.

Для упрощения изложения в системе уравнений (17) не показаны недиагональные коэффициенты, определяющие связь ячеек через внутренние грани. Далее запишем вид коэффициентов матрицы СЛАУ (17) на итерации  $n$ , текущего временного шага без учета граничных условий. Вид диагональных коэффициентов СЛАУ (17) для ячеек жидкой среды в подобласти  $F$ :

$$a_{F_i} = \frac{\rho_F C_F}{\Delta t} V_{F_i} + a_{F_i}^{inner} + a_{F_i}^{interface}. \quad (18)$$

Слагаемое  $a_{F_i}^{inner}$  в (18) формируется за счет соседства ячейки  $F_i$  с ячейками в подобласти  $F$  через внутренние грани  $f$ :

$$a_{F_i}^{inner} = \sum_{f=face(F_i^{inner})} (C_F \rho_F \lambda_f \mathbf{u}_f^n \cdot \mathbf{S}_f - k_F \frac{S_f}{n_f d_{F_i F_j}}), \quad (19)$$

где  $f = face(F_i^{inner})$  – суммирование по всем внутренним граням ячейки  $F_i$ ,  $F_j$  – ячейка, смежная с ячейкой  $F_i$  через внутреннюю грань  $f$ .

Слагаемое  $a_{F_i}^{interface}$  в (18) формируется за счет соседства ячейки  $F_i$  с ячейками из подобласти  $S$  через интерфейсные грани  $f$ :

$$a_{F_i}^{interface} = \sum_{f=face(F_i^{interface})} (-k_f \frac{S_f}{n_f d_{F_i S_i}}), \quad (20)$$

где  $f = face(F_i^{interface})$  – суммирование по всем интерфейсным граням ячейки  $F_i$ ,  $S_i$  – ячейка, смежная с ячейкой  $F_i$  через интерфейсную грань  $f$ .

Вид диагональных коэффициентов СЛАУ (17) для ячеек твердой среды подобласти  $S$ :

$$a_{S_i} = \frac{\rho_S C_S}{\Delta t} V_{S_i} + a_{S_i}^{inner} + a_{S_i}^{interface}. \quad (21)$$

Слагаемое  $a_{S_i}^{inner}$  в (21) формируется за счет соседства ячейки  $S_i$  с ячейками в подобласти  $S$  через внутренние грани  $f$ :

$$a_{S_i}^{inner} = \sum_{f=face(S_i^{inner})} (-k_S \frac{S_f}{n_f d_{S_i S_j}}), \quad (22)$$

где  $S_j$  – ячейка смежная с ячейкой  $S_i$  через внутреннюю грань  $f$ .

Слагаемое  $a_{S_i}^{interface}$  формируется за счет соседства ячейки  $S_i$  с ячейкой  $F_j$  через интерфейсные грани  $f$ :

$$a_{S_i}^{interface} = \sum_{f=face(S_i^{interface})} (-k_f \frac{S_f}{n_f d_{S_i F_i}}). \quad (23)$$

Вид недиагональных коэффициентов СЛАУ (17), определяющих связь между ячейками в подобласти  $F$  через внутренние грани  $f$ :

$$a_{F_i F_j} = \sum_{f=face(F_i^{inner})} (C_F \rho_F (1 - \lambda_f) \mathbf{u}_f^n \mathbf{S}_f + k_F \frac{S_f}{n_f d_{F_i F_j}}). \quad (24)$$

Вид недиагональных коэффициентов СЛАУ (17), определяющих связь ячеек из подобласти  $F$  с ячейками из подобласти  $S$  через интерфейсные грани  $f$ :

$$a_{F_i S_i} = a_{S_i F_i} = \sum_{f=f_{ace}(F_i^{interface})} (k_f \frac{S_f}{n_f \cdot d^{F_i S_i}}), \quad (25)$$

Вид недиагональных коэффициентов СЛАУ (17), определяющих связь между ячейками в подобласти  $S$  через внутренние грани  $f$ :

$$a_{S_i S_j} = \sum_{f=f_{ace}(S_i^{inner})} (k_S \frac{S_f}{n_f \cdot d^{S_i S_j}}), \quad (26)$$

Вид коэффициентов правой части СЛАУ (17) для ячеек подобласти  $F$ :

$$b_{F_i} = \frac{\rho_F C_F}{\Delta t} V_{F_i} + b_{F_i}^{inner} + b_{F_i}^{interface}, \quad (27)$$

где слагаемые  $b_{F_i}^{inner}$  и  $b_{F_i}^{interface}$  имеют вид:

$$b_{F_i}^{inner} = k_F S_f \sum_{f=f_{ace}(F_i^{inner})} \left[ \nabla T_f \cdot \mathbf{n}_f - \frac{\overline{\nabla T_f} \cdot d^{F_i F_j}}{n_f \cdot d^{F_i F_j}} \right]^{n-1}, \quad (28)$$

$$b_{F_i}^{interface} = k_f S_f \sum_{f=f_{ace}(F_i^{interface})} \left[ \nabla T_f \cdot \mathbf{n}_f - \frac{\overline{\nabla T_f} \cdot d^{F_i S_i}}{n_f \cdot d^{F_i S_i}} \right]^{n-1}. \quad (29)$$

Вид коэффициентов правой части СЛАУ (17) для ячеек подобласти  $S$ :

$$b_{S_i} = \frac{\rho_S C_S}{\Delta t} V_{S_i} + b_{S_i}^{inner} + b_{S_i}^{interface}. \quad (30)$$

где слагаемые  $b_{S_i}^{inner}$  и  $b_{S_i}^{interface}$  имеют вид:

$$b_{S_i}^{inner} = k_S S_f \sum_{f=f_{ace}(S_i^{inner})} \left[ \nabla T_f \cdot \mathbf{n}_f - \frac{\overline{\nabla T_f} \cdot d^{S_i S_j}}{n_f \cdot d^{S_i S_j}} \right]^{n-1}, \quad (31)$$

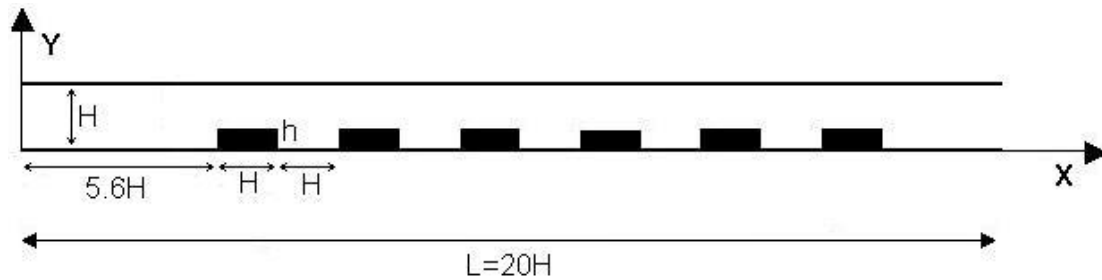
$$b_{S_i}^{interface} = k_S S_f \sum_{f=f_{ace}(S_i^{interface})} \left[ \nabla T_f \cdot \mathbf{n}_f - \frac{\overline{\nabla T_f} \cdot d^{S_i F_i}}{n_f \cdot d^{S_i F_i}} \right]^{n-1}, \quad (32)$$

Описанный прямой метод сопряжения, реализованный в пакете программ ЛОГОС [18, 19], позволяет одновременно дискретизировать уравнения теплопроводности для жидкой и твердой подобластей и строить единую сопряженную СЛАУ относительно переменной температуры. Такой подход является наиболее универсальным, позволяющим одинаково эффективно считать стационарные и нестационарные задачи, моделирующие динамические переходные процессы с теплопередачей между подобластью жидкости и подобластью твердого тела. Метод позволяет учитывать разномасштабность ячеек и резко различающиеся физические свойства жидкой и твердой сред что позволяет применять его при моделировании задач сопряженного теплообмена на произвольных неструктурированных сетках.

## Численные эксперименты

### *Охлаждение твердотельных блоков в плоском канале*

Рассмотрим работу метода на примере численного моделирования задачи охлаждения шести твердотельных блоков с объемным тепловыделением, установленных в плоском прямоугольном канале, ламинарным потоком несжимаемой жидкости при вынужденной конвекции [31]. Геометрия расчетной области схематично представлена на рис. 4.

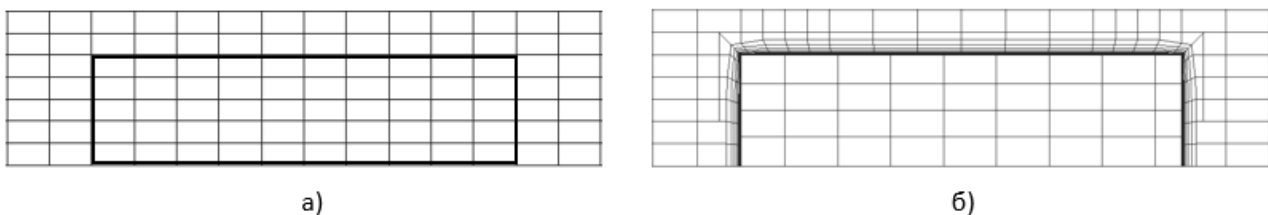


**Рис. 4. Схематическое изображение геометрии расчетной области**

**Fig. 4. Schematic representation of the computational domain geometry**

Плоский прямоугольный канал имеет высоту  $H = 1$  м и длину  $L = 20H$ . Внутри канала, вплотную к нижней стенке, расположены шесть одинаковых твердотельных блоков длиной  $H$  и высотой  $h = 0,25H$ . Левая грань первого блока находится на расстоянии  $5,6H$  от входа. Промежутки между блоками одинаковы и равны  $H$ . Каждый блок равномерно нагревается объемным источником тепла с удельной мощностью  $Q = 71,4$  Вт/м<sup>3</sup>. Стенки канала неподвижны, непроницаемы и теплоизолированы. Для верхней и нижней стенок задано граничное условие стенки с прилипанием, для боковых стенок задано условие симметрии. На левой стороне канала задан входной поток с нулевой температурой и единичным вектором скорости, направленный вдоль оси  $X$ . На правой границе задано граничное условие давления. При расчете были заданы физические параметры среды таким образом, чтобы обеспечивались значения безразмерных величин, указанных в [31]:  $Re = 100$ ,  $Pr = 0,7$ .

Расчет проводился на равномерной прямоугольной и неструктурированной сетках (рис. 5), имеющих согласованный интерфейс на границе раздела сред. Равномерная прямоугольная сетка (рис. 5а) построена таким образом, что границы твердотельных блоков точно совпадают с гранями ячеек в подобласти жидкости. Для неструктурированной сеточной модели сетки в области жидкости и в области твердотельных блоков построены независимо друг от друга согласованы при помощи препроцессора пакета программ ЛОГОС (рис. 5б).



**Рис. 5. Фрагменты расчетной сетки в области твердотельного блока**  
(а) – равномерная прямоугольная, (б) – неструктурированная

**Fig. 5. Computational grid fragments in the solid-state block domain**  
(a) – uniform rectangular, (b) – unstructured

Расчет задачи был выполнен в пакете программ ЛОГОС в параллельном режиме на 12 процессорах. Сопряжение смежных границ подобласти жидкости и твердотельных блоков осуществлялось с помощью интерфейса реализованного в соответствии с вышеописанным методом.

На рис. 6 приведены распределения полей температуры, полученные в [31] (вверху) и рассчитанные в пакете программ ЛОГОС (внизу) отображенные в одном масштабе. График на рис. 7 показывает профили температуры вдоль прямой  $y = 0,1$  м.



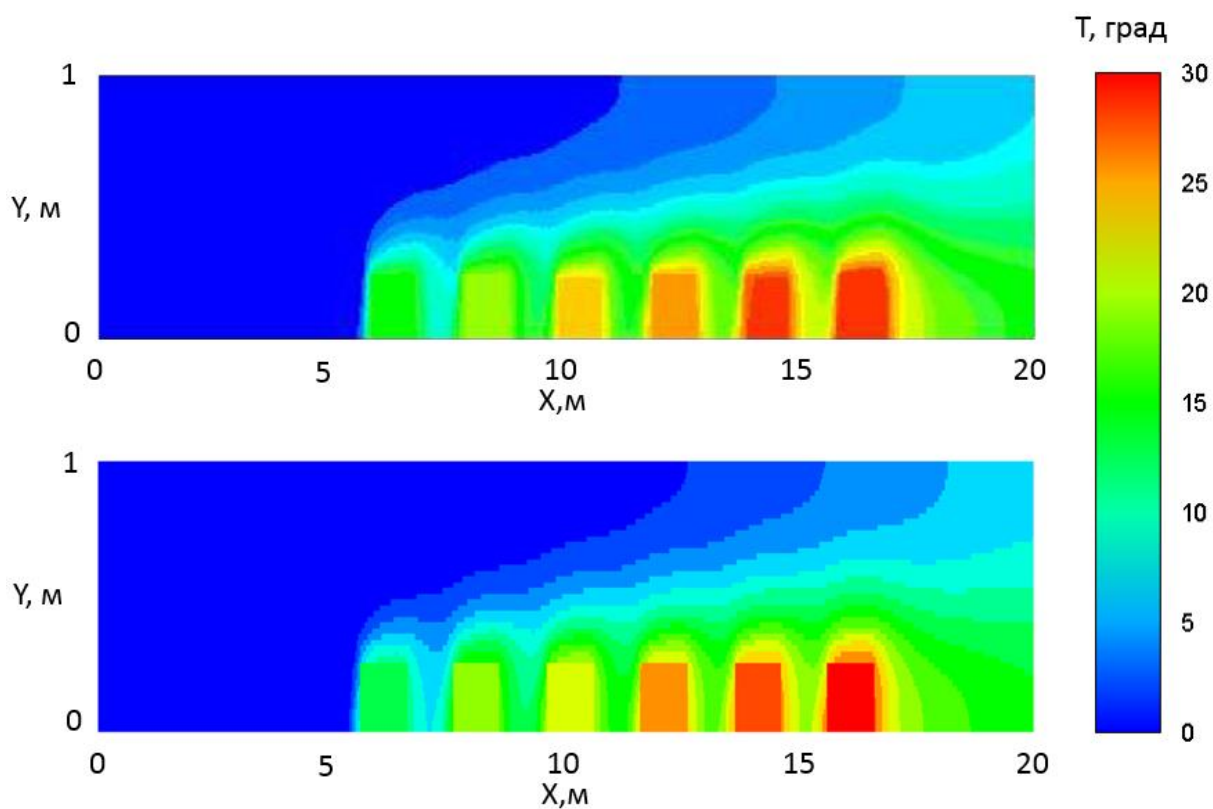


Рис. 6. Распределение полей температуры

Fig. 6. Distribution of temperature fields

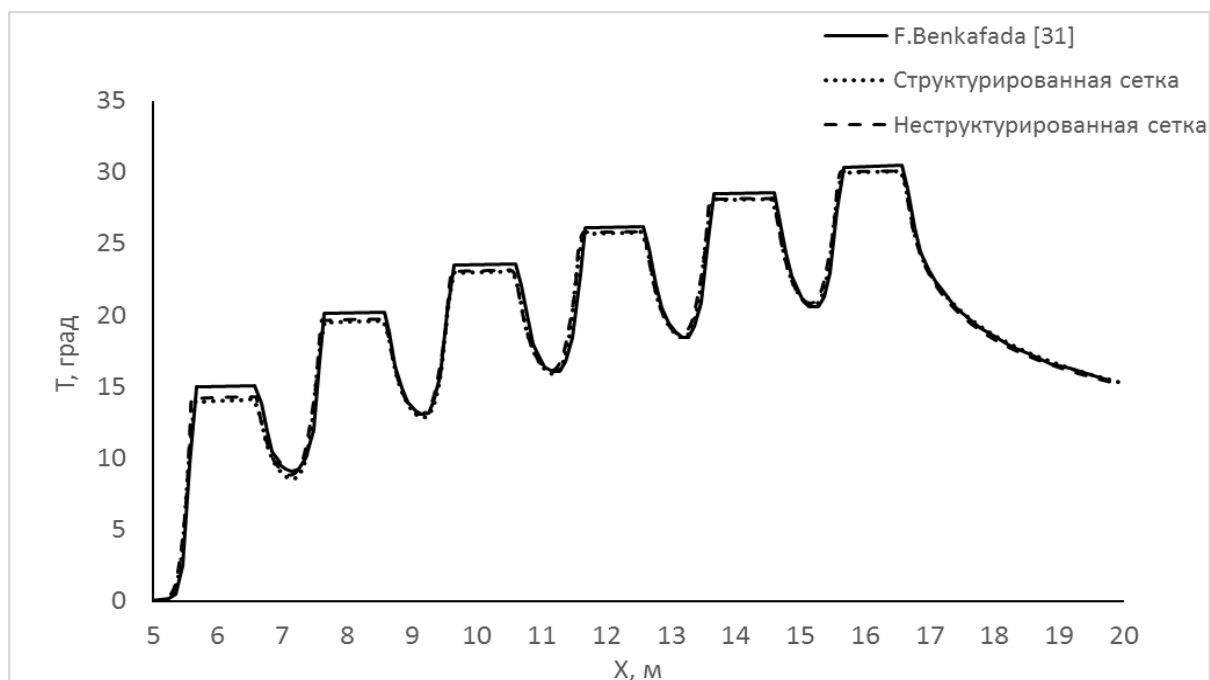


Рис. 7. Профили температуры вдоль канала

Fig. 7. Temperature profiles along the channel

Полученные результаты (рис. 6, 7) показывают, что наличие неструктурированной сетки в области твердотельных блоков несущественно повлияло на профиль температуры вдоль канала и хорошо согласуется со значениями, полученными в [31].

### Вентилируемая квадратная каверна

Рассмотрим работу метода на примере численного моделирования задачи смешанной конвекции в квадратной каверне с твердотельным блоком [32]. Геометрия расчетной области схематично представлена на рис. 8.

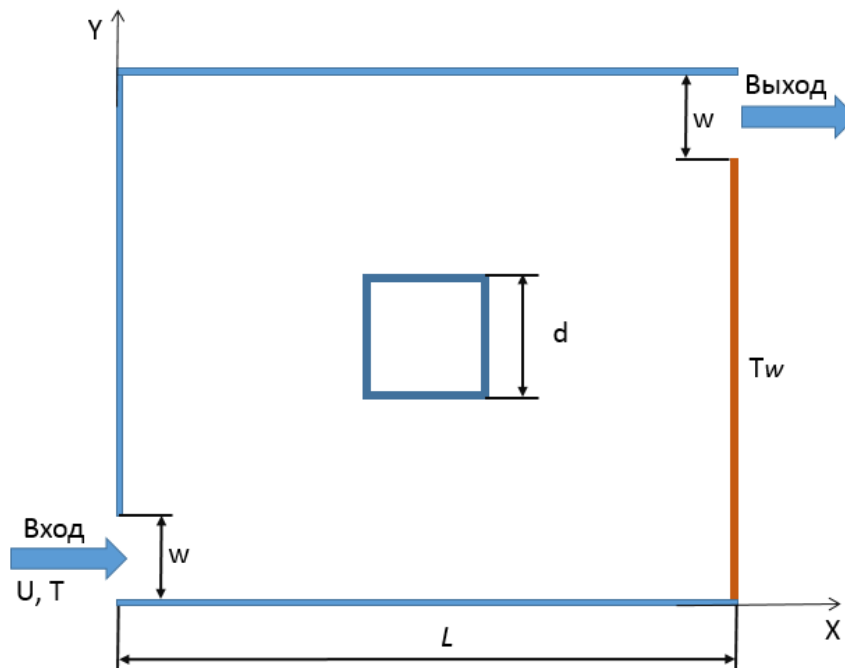


Рис. 8. Схематическое изображение геометрии расчетной области

Fig. 8. Schematic representation of the computational domain geometry

В выбранной расчетной модели длина стороны квадратной каверны  $L = 1$  м. Каверна содержит твердотельный блок с длиной стороны  $d = 0,6$  м, расположенный по центру и входное и выходное отверстия размером  $w = 0,1$  м. На правой вертикальной стенке задана постоянная температура  $T_w = 1$  К, остальные стенки теплоизолированы. На входе в каверну заданы температура  $T = 0$  К и скорость входного потока  $U$ , направленного вдоль оси  $X$ . Вязкое ламинарное несжимаемое течение рассматривается в данной задаче без учета вязкой диссипации. Физические параметры среды задаются таким образом, чтобы обеспечивались значения безразмерных величин  $Re = 100$  и  $Pr = 0,71$ , указанных в [32].

Расчет производился на равномерной прямоугольной и неструктурированной сетках (рис. 9), имеющих согласованный интерфейс на границе раздела сред. Равномерная прямоугольная сетка (рис. 9а) построена таким образом, что границы твердотельных блоков точно совпадают с гранями ячеек в подобласти жидкости. Для неструктурированной сеточной модели сетки в области жидкости и в области твердотельных блоков построены независимо друг от друга и согласованы при помощи препроцессора пакета программ ЛОГОС (рис. 9б).

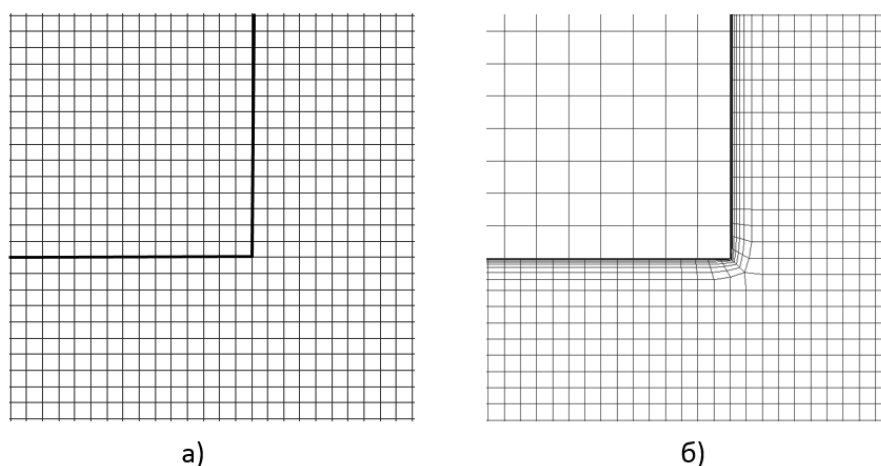


Рис. 9. Фрагменты расчетной сетки в области твердотельного блока  
(а) – равномерная прямоугольная, (б) – неструктурированная

Fig. 9. Computational grid fragments in the solid-state block domain  
(a) – uniform rectangular, (b) – unstructured

Расчет задачи выполнен в пакете программ ЛОГОС в параллельном режиме на 12 процессорах. Процесс сопряжения осуществлялся с помощью интерфейса, реализованного в соответствии с вышеописанным методом. На рис. 10 приведено распределение поля температуры, полученное на двух видах сеточных моделей, и наложенные на них изолинии температуры, полученные в работе [32].

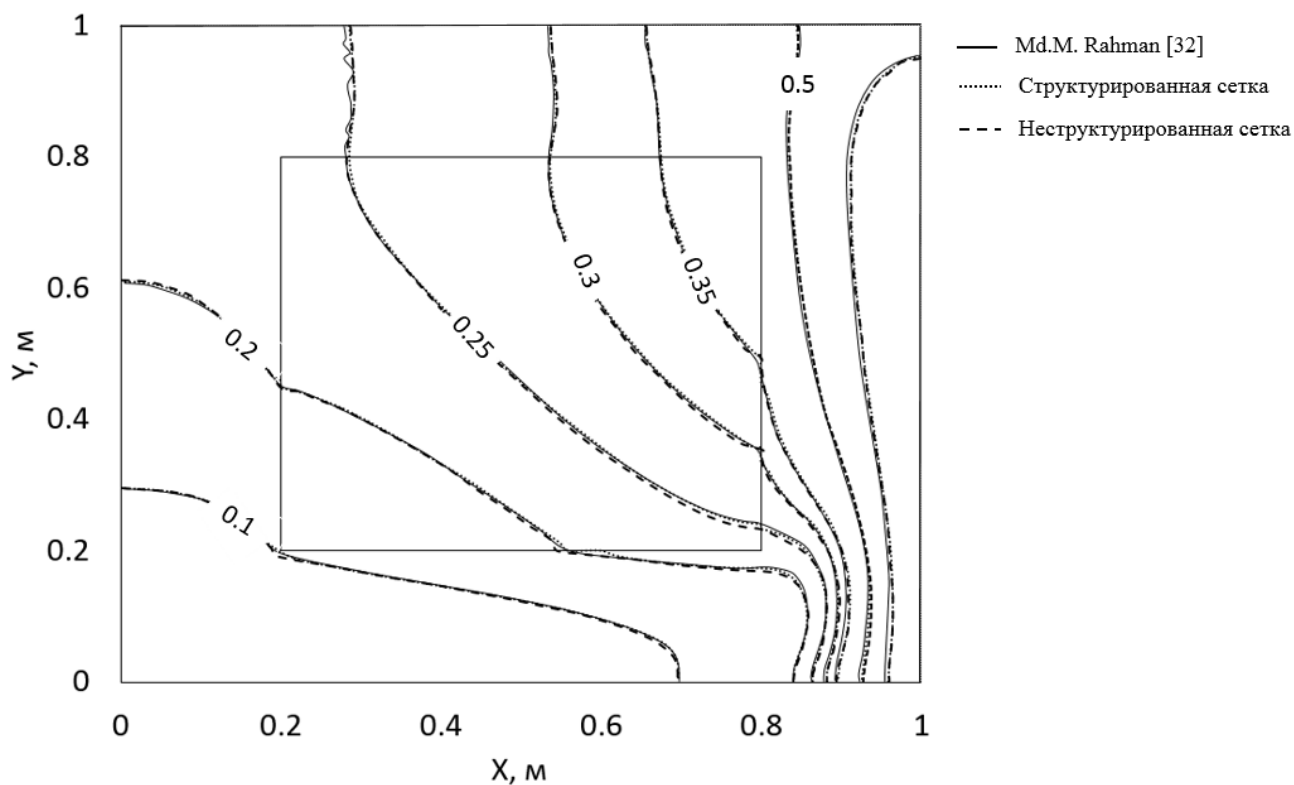


Рис. 10. Изолинии температуры

Fig. 10. Temperature isolines

Приведенные результаты расчетов (рис. 10) показывают, что наличие неструктурированной сетки в области твердотельного блока несущественно повлияло на профиль температуры вдоль канала и хорошо согласуется со значениями, полученными в [32].

### Заключение

Описан прямой метод решения задач сопряженного теплообмена, реализованный в пакете программ «ЛОГОС» в части решателя гидродинамики. Данный метод может быть одинаково эффективно использован для расчета задач стационарного и нестационарного сопряженного теплообмена. Приведены основные уравнения теплопереноса в жидкости и в твердом теле и рассмотрены особенности их аппроксимации методом конечных объемов на произвольной неструктурированной сетке с учетом разномасштабности ячеек и резко различающихся физических свойств жидкой и твердой сред. Представлены коэффициенты матрицы СЛАУ для температуры в случае решения задачи сопряженного теплообмена, результаты решения задач с применением данного метода на сеточных моделях, содержащих структурированные и неструктурированные сетки. Показано, что наличие неструктурированных сеток в области сопряжения жидкости и твердых тел не оказывает существенного влияния на распределение поля температуры.

### Библиографический список

1. **Wu M.**, Pei Y., Qin J., Li X., Zhou J., Zhan Z.S., Guo Q.-Y., Liu B., Hu T.G., Study on methods of coupling numerical simulation of conjugate heat transfer and in-cylinder combustion process in GDI engine // SAE Paper, 2017.
2. **Волков, К.Н.** Течение и сопряженный теплообмен в камере между ротором и статором // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 3. С. 126-143.
3. **Velghe A.**, Gillet N., Bohbot J., A high efficiency parallel unstructured solver dedicated to internal combustion engine simulation // Comput. Fluids, 2011, vol. 45, № 1, pp. 116–121.
4. **Волков К.Н.** Теплообмен в камере с вращающимся диском в турбулентном режиме / К.Н. Волков, П.В. Булат, И.А. Волобуев, В.А. Пронин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т.17. № 3. С. 514-524.
5. **Anderson K.R.**, Devost M., Pakdee W., Krishnamoorthy N., STAR CCM+ CFD Simulations of enhanced heat transfer in high-power density electronics using forced air heat exchanger and pumped fluid loop cold plate fabricated from high thermal conductivity materials // J. Electron. Cool. Therm. Control, 2013, vol. 3, pp. 144-154.
6. **Levis L.V.**, Provins J.I., A non-coupled CFD-FE procedure to evaluate windage and heat transfer in rotor-stator cavities // ASME Paper, 2004.
7. **Saunders K.**, Alizadeh S., Levis L.V., Provins J.I., The use of CFD to generate heat transfer boundary conditions for a rotor-stator cavity in a compressor drum thermal model // ASME Paper, 2007.
8. **Волков, К.Н.** Ускорение решения задач сопряженного теплообмена на неструктурированных сетках // Выч. мет. программирование. 2009. Т. 10. № 2. С. 184-201.
9. **Radenac E.**, Gressier J., Millan P., Methodology of numerical coupling for transient conjugate heat transfer // Computers and Fluids, 2014, vol. 100, pp. 95-107.
10. **Chaquet J. M.**, Corral R., Gisbert, F., Pastor G., A loosely coupled fluid/solid heat transfer method for disc cavities including mixing planes and a combination of 2D and 3D cavities // In ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, 2015.
11. **Tom V.**, Braembussche R. A, Novel Method for the Computation of Conjugate Heat Transfer with Coupled Solvers // In Proceedings of the Heat Transfer in Gas Turbine Systems, Antalya, Turkey, 9-14 August 2009.
12. **Shah K.**, Jain A., An iterative, analytical method for solving conjugate heat transfer problems // International Journal Heat Mass Transfer, 2015, vol. 90, pp. 1232-1240.
13. **Патанкар, С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Панткар. – М.: Атомэнергоиздат, 1984.

14. **Hwang S.**, Son C., Seo D., Rhee D.H., Cha B., Comparative study on steady and unsteady conjugate heat transfer analysis of a high-pressure turbine blade // *Appl Therm Eng.*, 2016, vol. 99, pp. 765-775.
15. **Zhang L.** Parallel simulation of engine in-cylinder processes with conjugate heat transfer modeling // *Appl. Thermal Engng.*, 2018, vol. 142, pp. 232-240.
16. **Li Y.**, Kong S.-C., Coupling conjugate heat transfer with in-cylinder combustion modeling for engine simulation // *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2011, vol. 54, pp. 2467-2478.
17. **Jiang Y.**, Zheng Q., Dong P., Yao J., Zhang H., Gao J., Conjugate heat transfer analysis of leading edge and downstream mist-air film cooling on turbine vane // *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2015, vol. 90, pp. 613-626.
18. **Kozelkov A.S.**, Kurulin V.V., Lashkin S.V., Shagaliev R.M., Yalozo A.V. Investigation of Supercomputer Capabilities for the Scalable Numerical Simulation of Computational Fluid Dynamics Problems in Industrial Applications // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2016, vol. 56, №8, pp. 1506-1516.
19. **Lashkin S.V.**, Kozelkov A.S., Yalozo A.V., Gerasimov V.Yu., Zelensky D.K., Efficiency Analysis of the Parallel Implementation of the SIMPLE Algorithm on Multiprocessor Computers // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, vol. 58, № 7, pp. 1242-1259.
20. **Козелков, А.С.** Моделирование движения тел в вязкой несжимаемой жидкости / А.С. Козелков, В.Р. Ефремов, А.А. Куркин, Н.В. Тарасова, Д.А. Уткин, Е.С. Тятюшкина // *Сибирский журнал вычислительной математики*. 2019. т. 22, № 3. С. 261-280.
21. **Tyatyushkina E.S.**, Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N., Kurulin V.V., Plygunova K.S., Utkin D.A., Verification of the LOGOS Software Package for Tsunami Simulations // *Geosciences*, 2020, vol. 10, p. 385.
22. **Козелков А.С.**, Параллельная реализация метода SIMPLE на основе многосеточного метода / А.С. Козелков, С.В. Лашкин, А.А. Куркин, А.В. Корнев, А.М. Вялых // *Сибирский журнал вычислительной математики*. 2020. Т. 23. № 1. С. 1-22.
23. **Ferziger, J.H.** Computational Method for Fluid Dynamics / J.H. Ferziger, M. Peric – New York: Springer-Verlag, 2002.
24. **Darwish M.**, Moukalled F. Unified Formulation of the Segregated Class of Algorithms for Fluid Flow at All Speeds // *Numerical Heat Transfer*, 2000, vol. 37, pp. 103-139.
25. **Mozer D.**, Kim J., Mansour N.N., DNS of Turbulent Channel Flow // *Phys. Fluids*, 1999, vol. 11, pp. 943-945.
26. **Jasak H.**, Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flow. Thesis submitted for the degree of doctor // Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science, London, 1996.
27. **Patankar S.V.**, A numerical method for conduction in composite materials, flow in irregular geometries and conjugate heat transfer // *Proc. 6<sup>th</sup> Int Heat Transfer Conf.*, Toronto, vol. 3, p. 297.
28. **Xi Chen**, Peng Han, A note on the solution of conjugate heat transfer problems using SIMPLE-like algorithms // *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2000, vol. 21, pp. 463-467.
29. **Saad Y.**, Iterative methods for sparse linear systems // Minneapolis, SIAM, 2003.
30. **Chung T. J.**, Computational Fluid Dynamics // Cambridge Univ. Press, New York, 2010.
31. **Benkafada F.**, Talbi K., Afrid M., The enhanced cooling of heated blocks mounted on the wall of a plane channel filled with a porous medium // *Revue des Energies Renouvelables*, 2008, vol. 11, №2, pp. 197-206.
32. **Rahman Md.M.**, Alim M.A., Saha S., Chowdhury M.K., Effect of the Presence of a Heat Conducting Horizontal Square Block on Mixed Convection inside a Vented Square Cavity, Nonlinear Analysis: Modelling and Control, 2009, vol. 14, №4, pp. 531-548.

*Дата поступления  
в редакцию: 22.04.2022*

УДК 004.7.056.5

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_22

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЙ СПЕЦИАЛИСТА ПРИ ОЦЕНКЕ УГРОЗ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИИ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ И СЕТЯХ В СООТВЕТСТВИИ С НОВОЙ МЕТОДИКОЙ ФСТЭК РОССИИ**

**Н.Г. Лабутин**

ORCID: 0000-0003-3565-252X e-mail: ko\_kol1@rambler.ru

Приволжский институт повышения квалификации ФНС России  
*Нижний Новгород, Россия***П.В. Костин**

ORCID: 0000-0002-5401-6011 e-mail: expert36@list.ru

Приволжский институт повышения квалификации ФНС России  
*Нижний Новгород, Россия*

Представлен анализ действий специалиста по защите информации в процессе оценки угроз информационной безопасности на объекте информатизации, которые необходимо осуществить в соответствии с новой методикой ФСТЭК России. На основании анализа положений нового методического документа впервые произведено моделирование всей процедуры действий, производимых при выявлении и оценке угроз безопасности информации. Посредством методологии IDEF0, наиболее прогрессивной и адекватной в рассматриваемой ситуации, разработана модель, которая отражает новый подход к систематизации функциональных действий специалистов по защите информации в процессе выполнения своих должностных обязанностей. Представленная модель призвана формализовать эти действия в любой информационной системе и сети, независимо от их назначения, принципов работы и особенностей функционирования.

**Ключевые слова:** оценка угроз безопасности информации, моделирование процессов, методология IDEF0, модель угроз безопасности информации, актуальные угрозы безопасности информации.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Лабутин, Н.Г. Моделирование действий специалиста при оценке угроз безопасности информации в информационных системах и сетях в соответствии с новой методикой ФСТЭК России / Н.Г. Лабутин, П.В. Костин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 22-31.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_22

## **MODELING OF A SPECIALIST'S ACTIONS AT ASSESSMENT OF INFORMATION SECURITY THREATS IN INFORMATION SYSTEMS AND NETWORKS IN ACCORDANCE WITH THE NEW METHODOLOGY OF FSTEC OF RUSSIA**

**N.G. Labutin**

ORCID: 0000-0003-3565-252X e-mail: ko\_kol1@rambler.ru

Volga institute of advanced training of FTS of Nizhny Novgorod  
*Nizhny Novgorod, Russia***P.V. Kostin**

ORCID: 0000-0002-5401-6011 e-mail: expert36@list.ru

Volga institute of advanced training of FTS of Nizhny Novgorod  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Analysis of information security specialist's actions in the process of assessment of threats to information security at an informatization facility which must be carried out in accordance with the new methodology of FSTEC (\*Federal Service for Technology and Export Control ) of Russia, is presented. Based on the analysis of provisions of the new methodological document of FSTEC of Russia, the modeling of the entire procedure performed at identifying and assessing of threats to information security, was carried out for the first time. As a result, using the IDEF0 methodology, a model of these actions has been developed, which represents a new approach to systematizing of the information security specialists' functional actions in the process of performing of their official duties. The developed model is designed to formalize these actions in any information system and network, regardless of their purpose, principles of operation and features of functioning. To model the actions of a specialist in assessing of threats to information security, the IDEF0 methodology was applied as the most progressive and suitable for the situation under consideration.

**Key words:** information security threat assessment, process modeling, IDEF0 methodology, information security threat model, current information security threats.

**FOR CITATION:** N.G. Labutin, P.V. Kostin. Modeling of a specialist's actions at assessment of information security threats in information systems and networks in accordance with the new methodology of FSTEC of Russia. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 3. Pp. 22-31. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_22

## Введение

Для каждого специалиста по защите информации (ЗИ) одним из значимых и ответственных направлений профессиональной деятельности является разработка организационно-распорядительных документов (ОРД) локального уровня. Согласно требованиям государственных регуляторов в сфере защиты информации – ФСТЭК и ФСБ России, наряду с другими ОРД, в каждой организации должен быть подготовлен и поддерживаться в актуальном состоянии локальный документ «Модель угроз безопасности информации (БИ)». При его разработке у многих специалистов по ЗИ возникают некоторые закономерные затруднения, связанные, в первую очередь, с формированием регуляторами новых требований и методик создания модели угроз БИ. Помимо этого, речь идет о растущем числе новых угроз, и, соответственно, о сложностях определения всех актуальных для данной информационной системы (ИС) угроз БИ.

В 2021 г. ФСТЭК России разработала документ «Методика оценки угроз безопасности информации», утвержденный 5 февраля 2021 г. [1]. В связи с этим ранее принятый документ «Методика определения актуальных угроз персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных» от 2008 г. утратил силу. В методике 2021 г. есть ряд нововведений, которые необходимо учитывать каждому специалисту по информационной безопасности, ответственному за «Модель угроз БИ» объекта защиты.

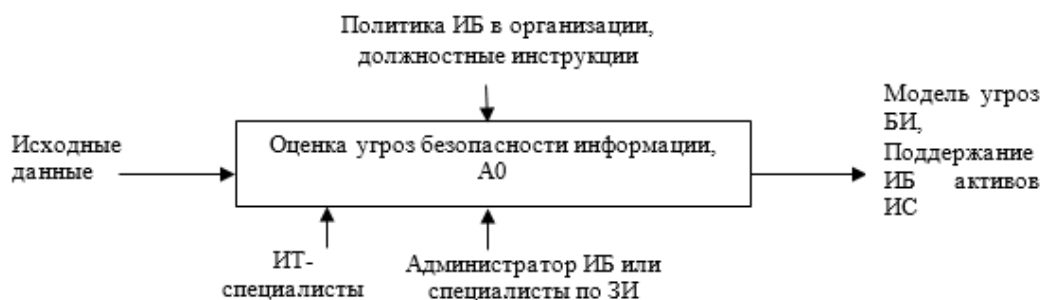
Данная статья предназначена для специалистов по защите информации для правильной оценки угроз БИ и, на основании этого, разработки Модели угроз БИ защищаемых ИС, определяемой методикой оценки угроз БИ ФСТЭК России от 5 февраля 2021 г. Представлен процесс формализации действий по оценке угроз БИ на защищаемом объекте при помощи функционального моделирования IDEF0 [2], рассмотренного в [3, 4].

## Анализ действий специалиста при определении степени угроз безопасности информации и построение модели

IDEF0 позволяет производить функциональное моделирование процессов и действий в системах любой сложности, при этом наглядно и достаточно просто отображая их в виде диаграмм с прямоугольниками и соединительными стрелками. Прямоугольниками отображаются функциональные блоки, описанные как действия, представленные глаголами. При этом верхняя сторона прямоугольника используется для обозначения управляющего воздействия на данную функцию (процесс), нижняя – для описания инструментария выполнения данной функции, левая сторона – для задания входных воздействий, правая – для определе-

ния выходных функций. Стрелки на диаграмме предназначены для указания входящих воздействий, которые обрабатываются блоком. Они могут также использоваться для указания результатов предыдущих действий или иных воздействий на функцию, реализуемую данным блоком [2].

Моделирование IDEF0 заключается в представлении моделируемой системы в виде основной целевой функции с дальнейшей ее детализацией; при этом используются декомпозиции, проводимые последовательно. Конечное состояние моделируемой системы, до которого осуществляется детализация, определяется разработчиком [2]. Диаграмма, демонстрирующая в целом действия специалиста по ЗИ при определении степени угроз безопасности информации в системах и сетях организации, представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Диаграмма А-0. Целевая (контекстная) функция «Оценка угроз безопасности информации», А0**

**Fig. 1. Diagram A-0. «Information security threat assessment» target (contextual) function, A0**

Конечной целью оценки угроз БИ на защищаемом объекте является модель угроз безопасности информации, актуальных для этого объекта. В целом это служит достижению единой основной цели – обеспечению достойного уровня безопасности информации (активов) ИС.

Исходные данные для оценки угроз БИ на объекте информатизации [1] (рис. 1):

- 1) банк данных угроз (БДУ) безопасности информации ФСТЭК России (bdu.fstec.ru), в котором представлены существующие угрозы БИ;
- 2) модели угроз безопасности информации, если они были разработаны на более высоком уровне организации (например, в ведомстве, отрасли и т.д.);
- 3) сигнатуры известных компьютерных атак из соответствующих ресурсов сети Интернет (например, STIX, CAPEC, ATT&CK, OWASP и т.д.);
- 4) сведения из конструкторской и эксплуатационной документации об имеющихся способах и системах защиты информации в эксплуатируемой ИС, такие как: назначение, технические характеристики, структура ИС, имеющиеся группы безопасности пользователей, назначенные им типовые разрешения на доступ и привилегии, а также другие подобные сведения;
- 5) правила доступа к центру обработки данных или облачного хранилища информации, если таковые предусмотрены в защищаемой ИС;
- 6) нормативные документы, вводящие в эксплуатацию информационные системы, с указанными в них сведениями о назначении, задачах и функциях систем и сетей, о правовом режиме обрабатываемой информации;
- 7) технологические или производственные документы (карты) на информационные системы, сети, в которых представлены основные критические процессы для владельца информации или оператора ИС;
- 8) результаты оценки возможного ущерба от реализованных угроз, проведенной владельцем информации или оператором ИС.



Чтобы не загромождать диаграмму излишними подробностями, на рис. 1 все указанные выше исходные данные для оценки угроз БИ на объекте информатизации подписаны просто: «исходные данные», как входные воздействия для целевой функции А0. Процедура оценки угроз БИ в ИС (понимая ИС как непосредственно информационные системы, так и системы АСУ, информационно-телекоммуникационные сети, информационные инфраструктуры центров обработки данных, а также и облачные сервисы), как определено в «Методике оценки угроз безопасности информации», утвержденной ФСТЭК России 5 февраля 2021 г., может представляться этапами работы, которые в нашей модели обозначаются как следующие процессы:

- «Определение негативных последствий вследствие возникновения и (или) реализации угроз безопасности информации» А1.
- «Установление вероятных объектов, подвергаемых воздействию угроз безопасности информации» А2.
- «Оценка вероятности возникновения и (или) реализации угроз безопасности информации с определением актуальности таковых» А3.

На рис. 2 приведена диаграмма с декомпозицией целевой функции А0.

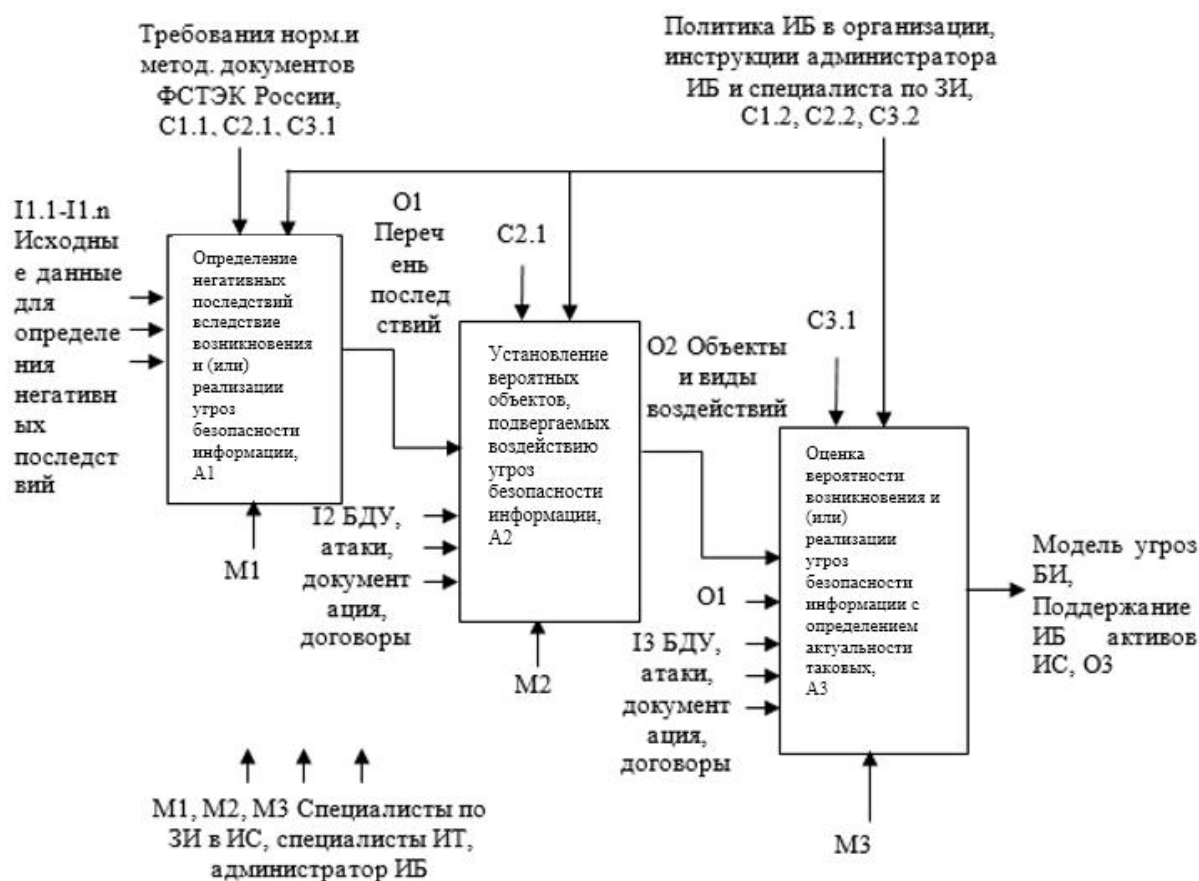


Рис. 2. Декомпозиция целевой функции «Оценка угроз безопасности информации», А0

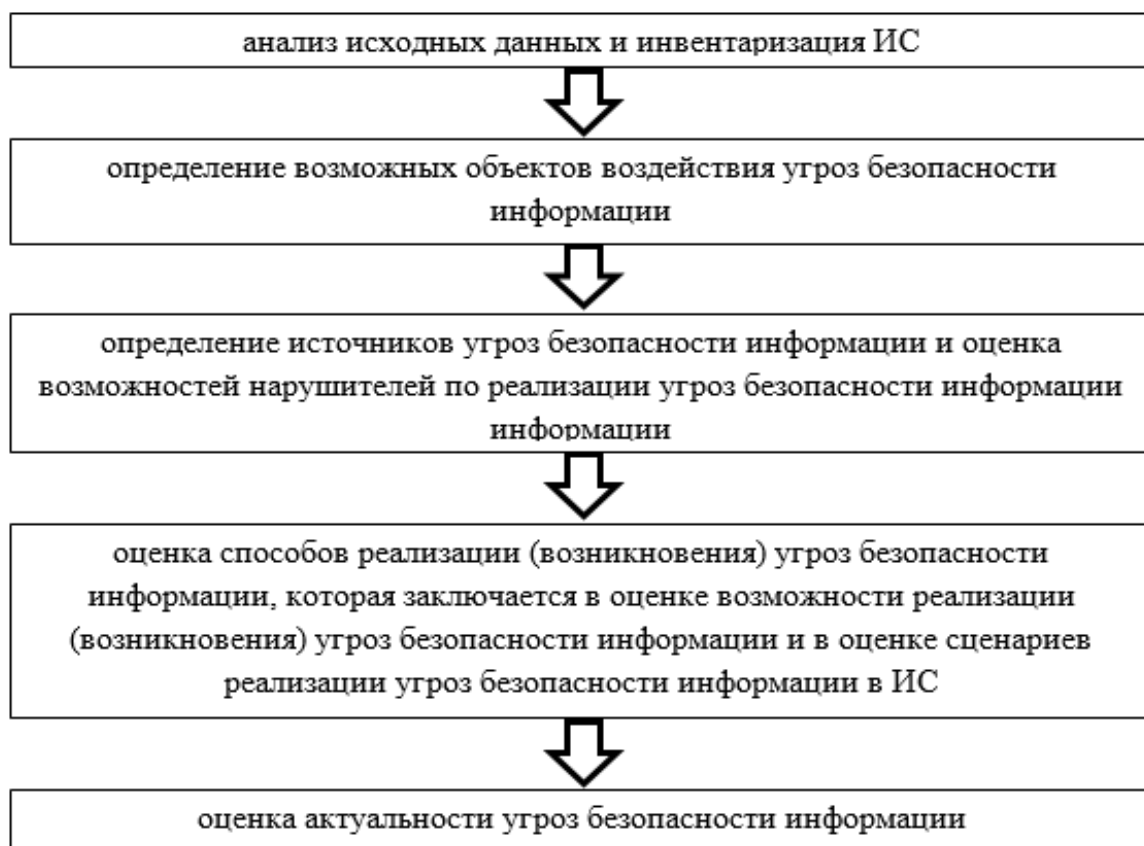
Fig. 2. Decomposition of «Information security threat assessment» target function, A0

Для процесса, обозначенного выше как А1, исходными данными будут:

- БДУ безопасности информации ФСТЭК России (bdu.fstec.ru);
- документы (нормативные, распорядительные и иные), на основании которых вводятся в эксплуатацию ИС, с указанными в них сведениями о назначении, задачах и функциях систем и сетей, о правовом режиме обрабатываемой информации;

- эксплуатационные документы со сведениями о назначении и функциях, о составе и архитектуре систем и сетей;
- технологические, производственные документы (карты) на информационные системы, сети, в которых представлены основные критические процессы для владельца информации или оператора ИС;
- результаты оценки возможного ущерба от реализованных угроз, проведенной владельцем информации или оператором ИС.

Если в конкретной ситуации для данной ИС существуют другие исходные данные, не указанные выше, специалисты, проводящие оценку угроз БИ, могут их использовать в данной модели. Цель процесса А1 «Определение негативных последствий вследствие возникновения и (или) реализации угроз безопасности информации» – установление критически значимых для данной ИС событий безопасности информации, которые могут привести к значительному ущербу владельцу ИС или государству и оценка ущерба от их последствий. Возможный ущерб может быть определен на основе оценки независимых экспертов или на основе сведений, предоставленных специалистами обладателя информации или владельца ИС, при этом он должен учитываться применительно к данной ИС. Кроме установления возможного ущерба, в процессе оценки угроз БИ на ОИ решаются следующие задачи, которые при моделировании выделены в отдельные процессы, получаемые при декомпозиции процессов А2, А3 (рис. 3).



**Рис. 3. Задачи, решаемые специалистом по защите информации в процесс оценки угроз БИ на ОИ**

**Fig. 3. Problems solved by an information security specialist in the process of information security threats assessment at an informatization facility**

Первые две задачи по сути – декомпозиция процесса А2; остальные – декомпозиция процесса А3. Таким образом, декомпозиции процессов А2 и А3 можно представить в виде диаграмм (рис. 4 и 6). Все работы, соответствующие указанным процессам, должны выполняться специалистами или подразделением по защите информации при обязательном содействии ИТ-специалистов и привлечении профильных подразделений данной организации. Иначе оценка угроз безопасности информации может получиться недостоверной, что обязательно нанесет ущерб защищаемым активам организации. Таким образом, задачи по оценке угроз БИ охватывают более широкий спектр действий специалистов, а не только заключаются в определении угроз, которые возможны в информационных системах и сетях, эксплуатируемых в данной организации. При необходимости по решению оператора ИС или владельца информации для оценки угроз безопасности информации в соответствии с действующим законодательством могут быть привлечены иные специалисты, в том числе, сторонних организаций. При этом рекомендуется привлекать специалистов, обладающих знаниями и умениями по оценке рисков и технической защите информации.

В результате выполнения процессов А2.1 «Анализ исходных данных и инвентаризация ИС организации и А2.2 «Определение возможных объектов и видов воздействия угроз безопасности информации» специалист по ЗИ и ИТ-специалисты выявляют объекты (элементы) ИС, на которые могут воздействовать угрозы БИ, при этом как исходные данные могут быть использованы:

- БДУ безопасности информации ФСТЭК России ([bdu.fstec.ru](http://bdu.fstec.ru));
- сигнатуры известных компьютерных атак из соответствующих ресурсов сети Интернет (например, STIX, CAPEC, ATT&CK, OWASP и т.д.);
- сведения из конструкторской и эксплуатационной документации об имеющихся способах и системах защиты информации в эксплуатируемой ИС;
- правила доступа к центру обработки данных или облачного хранилища информации, если они предусмотрены в защищаемой ИС.

Кроме того, в качестве исходных данных следует обязательно использовать результаты процесса А1, а именно перечень негативных последствий, возникающих вследствие воздействия угроз безопасности информации на рассматриваемую ИС и несущих значительный ущерб для активов данной организации (рис. 4).

Объектами воздействия, как правило, могут быть: сама защищаемая информация, а также программное обеспечение и программно-технические средства обработки и хранения информации, внешние носители информации, сетевое (телекоммуникационное) оборудование, сами средства защиты информации, независимо от исполнения: программные или программно-технические, а также пользователи системы.

В процессе А2.2 также должны быть определены актуальные для анализируемой ИС виды воздействия на выявленные «критичные» объекты ИС. Типовые виды воздействий, приводящих к реализации угроз БИ [1] представлены на рис. 5.

Исходными данными для процесса А3.1 «Установление источников угроз БИ и оценка возможности нарушителей реализовать данные угрозы» являются:

- БДУ безопасности информации ФСТЭК России ([bdu.fstec.ru](http://bdu.fstec.ru));
- сигнатуры известных компьютерных атак из соответствующих ресурсов сети Интернет (например, STIX, CAPEC, ATT&CK, OWASP и т.д.);
- сведения из конструкторской и эксплуатационной документации об имеющихся способах и системах защиты информации в эксплуатируемой ИС;
- правила доступа к центру обработки данных или облачного хранилища информации, если они предусмотрены в защищаемой ИС.

Результаты выполнения процессов А1 и А2 следующие:

- результаты оценки ущерба, проведенной владельцем информации;

- установленный размер ущерба, возникшего в результате воздействия угроз безопасности информации;
- установленный процессом А2.2 перечень объектов, которые могут подвергаться угрозам БИ, а также воздействия, которые на них могут быть оказаны.

В результате процесса А3.1 должно быть определено:

- кто и как может реализовать угрозы БИ в ИС (т.е. актуальный перечень и возможности нарушителей БИ);
- возможные способы, которыми вероятные нарушители могут нанести ущерб ИС.

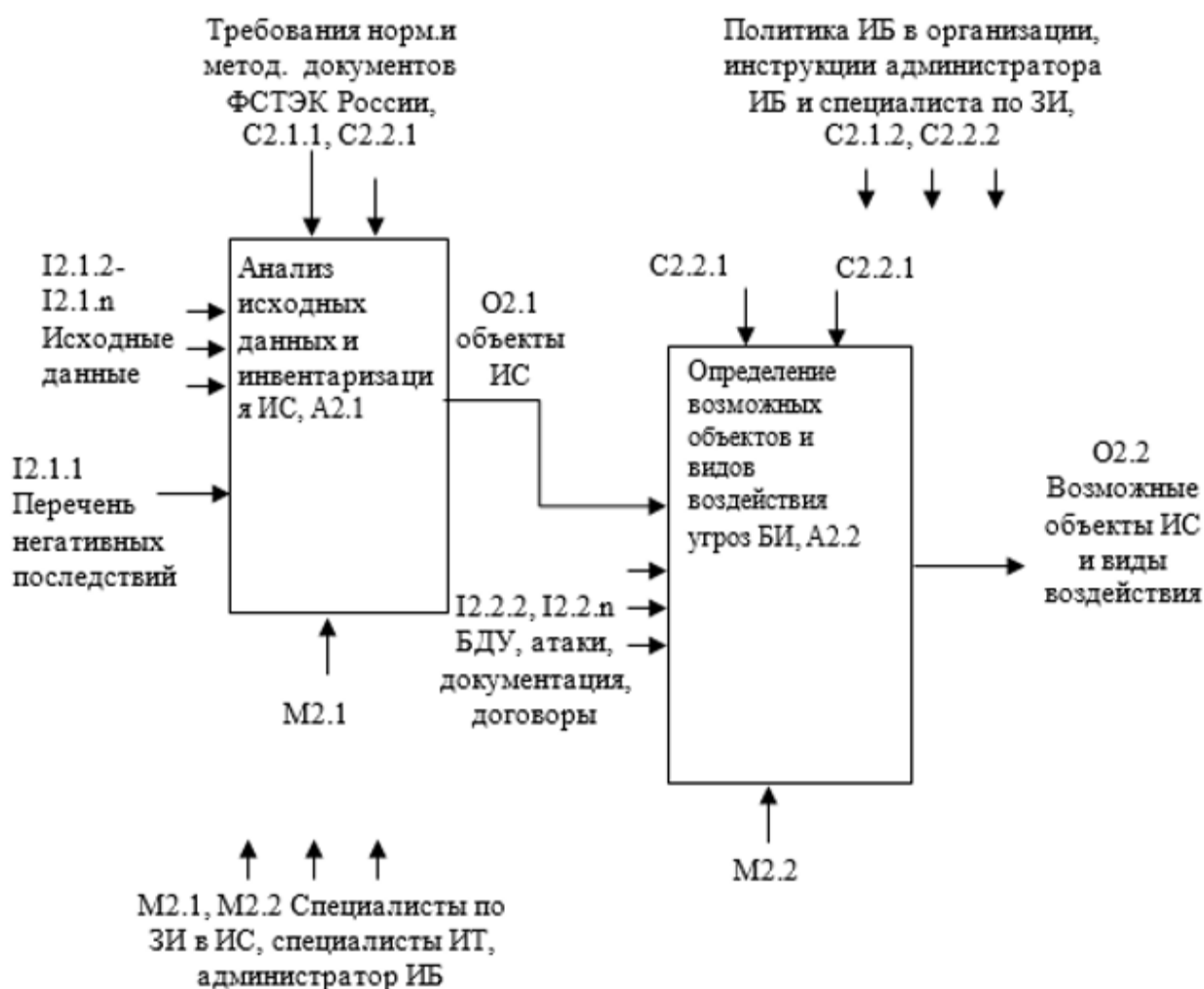


Рис. 4. Декомпозиция функции (процесса) А2 «Установление вероятных объектов, подвергаемых воздействию угроз безопасности информации»

Fig. 4. Decomposition of «Identification of probable facilities exposed to information security threats» A2 function (process)

Для процесса А3.2 «Определение порядка возникновения и (или) реализации угроз безопасности информации» исходными данными будут:

- БДУ безопасности информации ФСТЭК России (bdu.fstec.ru);
- сигнатуры известных компьютерных атак из соответствующих ресурсов сети Интернет (например, STIX, CAPEC, ATT&CK, OWASP и т.д.);
- сведения из конструкторской и эксплуатационной документации об имеющихся способах и системах защиты информации в эксплуатируемой ИС;

- правила доступа к центру обработки данных или облачному хранилищу информации, если они предусмотрены в защищаемой ИС;
- перечень возможных нарушителей и способов, которыми они могут реализовать угрозы БИ.

Далее, как определяет методика оценки угроз БИ, необходимо выбрать только те способы реализации угроз, которые возможны в анализируемой ИС. В нашей модели это процесс А3.3.

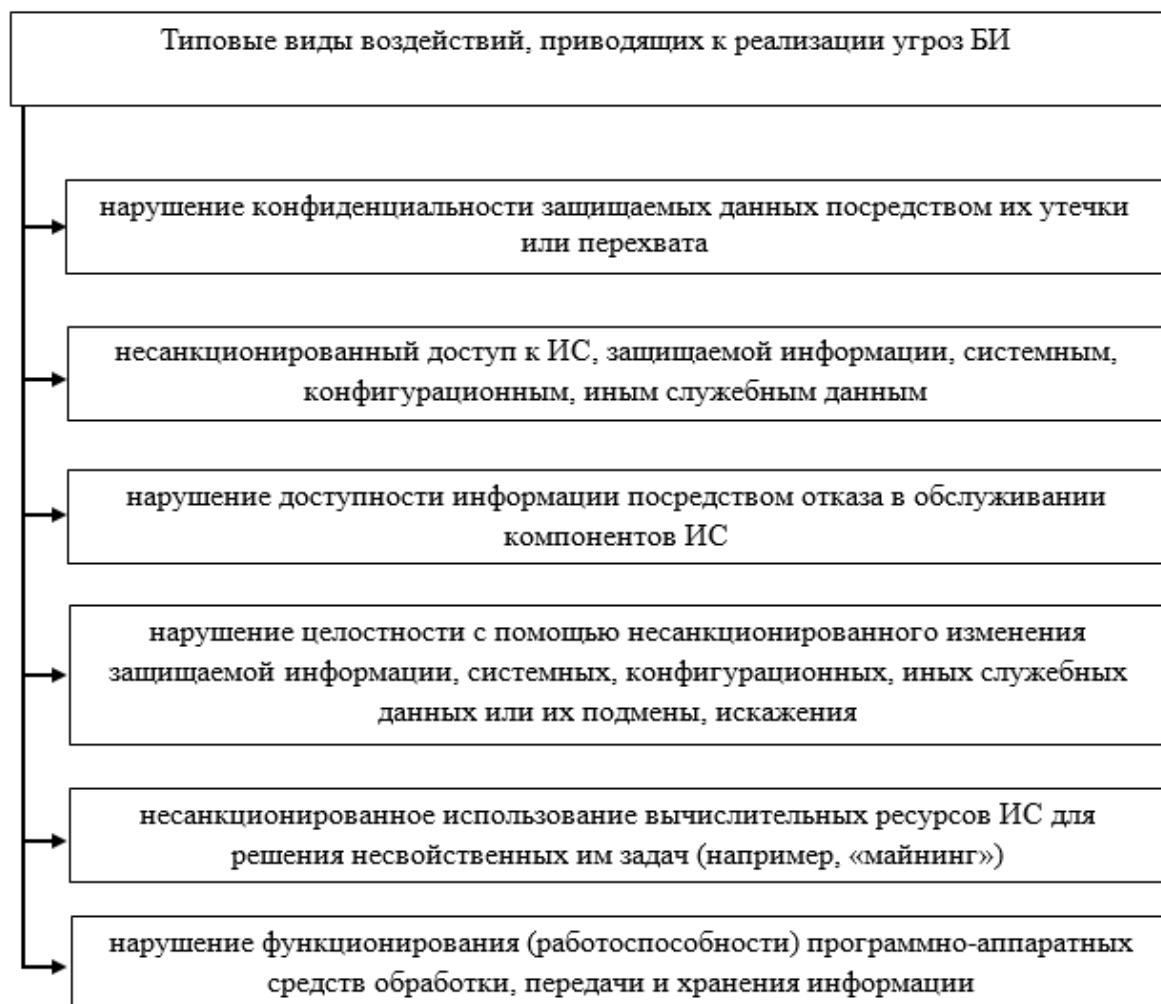


Рис. 5. Типовые виды воздействий, приводящих к реализации угроз БИ

Fig. 5. Typical types of impacts leading to the information security threats implementation

Исходные данные для процесса А3.3 «Оценка актуальности угроз БИ в ИС»:

- БДУ безопасности информации ФСТЭК России (bdu.fstec.ru);
- сигнатуры известных компьютерных атак из соответствующих ресурсов сети Интернет (например, STIX, CAPEC, ATT&CK, OWASP и т.д.);  
а также, результаты выполнения процессов А1, А2, А3.1 и А3.2;
- результаты оценки ущерба, проведенной владельцем информации;
- установленный размер ущерба, возникшего в результате воздействия угроз безопасности информации;
- установленный процессом А2.2 перечень объектов, которые могут подвергаться угрозам БИ, а также воздействия, которые на них могут быть оказаны;

- кто и как может реализовать угрозы БИ в ИС (т.е. актуальный перечень и возможности нарушителей БИ);
- возможные способы, которыми вероятные нарушители могут нанести ущерб ИС.

В результате процесса А3.3 должна быть проведена оценка актуальности угроз БИ и подготовлены все необходимые данные для разработки организационно-распорядительного документа локального уровня «Модель угроз безопасности информации».

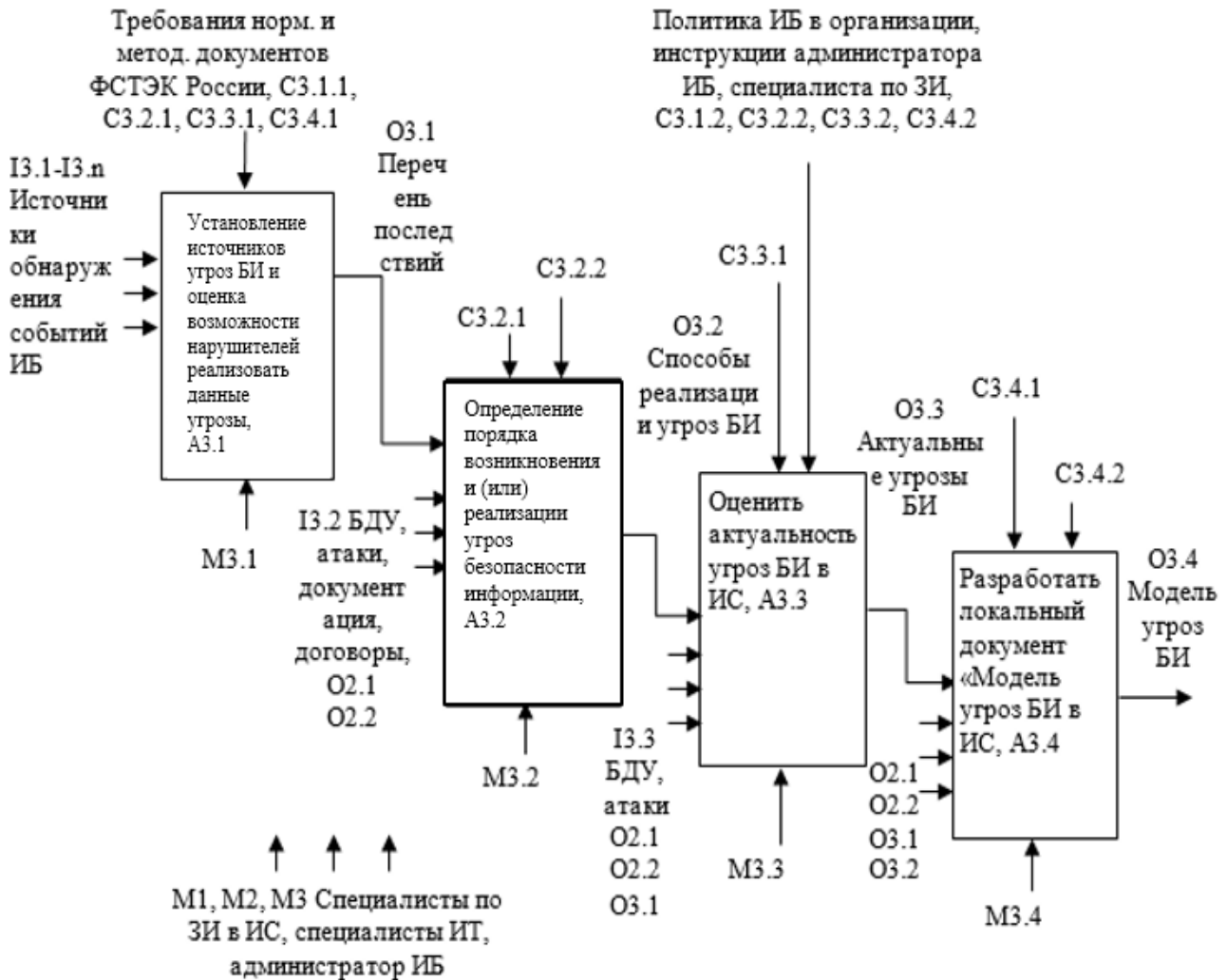


Рис. 6. Декомпозиция функции (процесса) А3 «Оценка вероятности возникновения и (или) реализации угроз безопасности информации с определением актуальности таковых»

Fig. 6. Decomposition of «Assessment of the probability of occurrence and (or) implementation of information security threats with determination of relevance thereof» A3 function (process)

### Заключение

Содержание работ, выполняемых специалистом по защите информации при оценке угроз БИ, зависит от конкретных условий эксплуатации информационных систем, особенностей функционирования ИС и других индивидуальных факторов. Вместе с тем, последовательность действий и методика их выполнения всегда одна. В настоящей статье предпринята попытка смоделировать эти действия с целью помощи специалистам по защите информации в проведении оценки угроз БИ в соответствии с требованиями регулятора.

**Библиографический список**

1. «Методика оценки угроз безопасности информации», утв. ФСТЭК России 5 февраля 2021 г.: официальный сайт ФСТЭК России [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/2170-metodicheskij-dokument-utverzhdenn-fstek-rossii-5-fevralya-2021>) (Дата обращения 19.02.2022)
2. Integration DEFinition for function modeling (IDEF0). Draft Federal Information Processing Standards Publication 183, 1993 December 21 [Электронный ресурс] // Режим доступа: URL: <http://idef.com/wp-content/uploads/2016/02/idef0.pdf>. (Дата обращения 19.02.2022)
3. **Карпычев, В.Ю.** Функциональное моделирование (IDEF0) как метод исследования блокчейн-технологии // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2018. № 4 (123). С. 22-32.
4. **Лабутин, Н.Г.** Моделирование процессов выявления инцидентов информационной безопасности и реагирования на них / Н.Г. Лабутин, П.В. Костин, Н.Ю. Шадрюнова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 4 (131). С. 16-25.

*Дата поступления  
в редакцию: 22.10.2021*

УДК 51-74

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_32

## ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЦИЗИОННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА ОСНОВЕ ПРАВИЛА СЛОЖЕНИЯ ДИСПЕРСИЙ

**А.А. Попов**ORCID: 0000-0002-0598-5203 e-mail: [popovanatol@inbox.ru](mailto:popovanatol@inbox.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
(Дзержинский политехнический институт)*Дзержинск, Россия***О.Н. Косырева**ORCID: 0000-0003-2126-3275 e-mail: [lelia7@list.ru](mailto:lelia7@list.ru)Дзержинский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы  
при Президенте Российской Федерации*Дзержинск, Россия***С.А. Добротин**ORCID: 0000-0001-6925-2693 e-mail: [zavkaf\\_sgp@dzr.ranepa.ru](mailto:zavkaf_sgp@dzr.ranepa.ru)Дзержинский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы  
при Президенте Российской Федерации*Дзержинск, Россия*

Проведено сопоставление ряда определений и формул расчета показателей прецизионности результатов измерений, прописанных в нормативных документах в области метрологии, с положениями теории статистики. В результате проведенного анализа выявлено, что описанная в нормативных документах по метрологии исходная статистическая модель носит частный характер, что обуславливает в некоторых случаях несоответствие прописанных и теоретических базовых формул. Предложена общая форма исходной статистической модели, а также новая формула для расчета числа степеней свободы внутригрупповой дисперсии, согласующаяся с теоретическим определением статистического термина «число степеней свободы». Показана специфика метрологической обработки результатов измерений в научных исследованиях по сравнению с рутинными стандартизованными методиками. Для случая научных исследований, когда проводимые измерения носят частный, иногда уникальный характер, разработаны рекомендации по интервальной оценке результата измерения на основе расширенной неопределенности, а также по оценке стандартного отклонения воспроизводимости на основе внутрилабораторного стандартного отклонения для случая промежуточной прецизионности. В качестве первого приближения на основе справочных данных дана оценка соотношения между дисперсиями повторяемости и воспроизводимости. Приведен пример расчета в соответствии с предлагаемой методикой. Использование данного подхода повышает достоверность экспериментальных результатов научных исследований.

**Ключевые слова:** научные исследования, результат измерения, воспроизводимость, правило сложения дисперсий, стандартное отклонение, расширенная неопределенность.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Попов, А.А. Оценка показателей прецизионности результатов измерений в научных исследованиях на основе правила сложения дисперсий / А.А. Попов, О.Н. Косырева, С.А. Добротин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 32-43. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_32

## ASSESSMENT OF PRECISION INDICATORS FOR MEASUREMENT RESULTS IN SCIENTIFIC RESEARCH BASED ON THE VARIANCES ADDITION RULE



**A.A. Popov**

ORCID: 0000-0002-0598-5203 e-mail: [popovanatol@inbox.ru](mailto:popovanatol@inbox.ru)

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

(Dzerzhinsk Polytechnic Institute)

*Dzerzhinsk, Russia*

**O.N. Kosyreva**

ORCID: 0000-0003-2126-3275 e-mail: [lelia7@list.ru](mailto:lelia7@list.ru)

The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration

(The Presidential Academy, RANEPА), Dzerzhinsky branch

*Dzerzhinsk, Russia*

**S.A. Dobrotin**

ORCID: 0000-0001-6925-2693 e-mail: [zavkaf\\_sgpд@dzr.ranepa.ru](mailto:zavkaf_sgpд@dzr.ranepa.ru)

The Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration

(The Presidential Academy, RANEPА), Dzerzhinsky branch

*Dzerzhinsk, Russia*

**Abstract.** Correlation of a number of definitions and formulas for measurement results of precision indicators calculation described in regulatory documents in the field of metrology, with provisions of the theory of statistics, is carried out. It is shown that the initial statistical model is of a particular nature, causing in some cases a discrepancy between the stated and theoretical basic formulas. A general form of the initial statistical model and a new formula for calculation of the number of degrees of freedom of intragroup variance consistent with theoretical definition of the «number of degrees of freedom» statistical term, are proposed. Specificity of metrological processing of measurement results in scientific research in comparison with routine standardized methods, is shown. For the case of scientific research, when the performed measurements are of a particular, sometimes unique nature, recommendations have been developed for interval estimate of the measurement result based on expanded uncertainty, as well as for the reproducibility standard deviation estimate based on the intra-laboratory standard deviation for the case of intermediate precision. As a first approximation based on reference data, an estimate of relationship between the variances of repeatability and reproducibility, is given. Example of calculation in accordance with the proposed methodology, is given. The use of this approach increases the reliability of scientific research experimental results.

**Key words:** scientific research, measurement result, reproducibility, variance addition rule, standard deviation, extended uncertainty.

**FOR CITATION:** A.A. Popov, O.N. Kosyreva, S.A. Dobrotin. Assessment of precision indicators for measurement results in scientific research based on the variances addition rule. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 3. Pp. 32-43. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_32

В научных исследованиях важным вопросом является возможность повторения экспериментальных результатов, полученных ранее в других лабораториях, что соответствует измерениям в условиях воспроизводимости [1]. Это возможно в случае сопровождения полученных экспериментальных данных показателями прецизионности. Вопросу их определения посвящен, в частности, ряд стандартов [1-3]. Однако при их внимательном изучении выявляется ряд положений, не вполне согласующихся с базовыми положениями теории статистики.

Целью данной статьи является анализ соответствия определений терминов показателей прецизионности результатов измерений и формул для их расчета с базовыми положениями теории статистики, а также формулировка рекомендаций по представлению экспериментальных результатов с указанием показателей прецизионности.

При оценке прецизионности результатов каких-либо измерений, т.е. их степени близости друг к другу, исходные данные формируются из отдельных групп, соответствующих условиям проведения измерений. Различают условия повторяемости, промежуточной прецизионности и воспроизводимости. В рамках вопроса о возможности получения повторных результатов экспериментальных исследований речь идет об условиях воспроизводимости, когда результаты измерений получают одним и тем же методом, на идентичных объектах ис-

пытаний, в разных лабораториях, разными операторами, с использованием различного оборудования [1].

Для классификации элементов выборочной совокупности в теории статистики общеизвестно правило сложения дисперсий, характеризующих рассеяние элементов выборки относительно средних величин [4]:

$$D_{\text{общ}} = D_{\text{внгр}} + D_{\text{межгр}}, \quad (1)$$

где  $D_{\text{общ}}$ ,  $D_{\text{внгр}}$  и  $D_{\text{межгр}}$  – соответственно общая, внутри- и межгрупповая дисперсии.

Для случая нахождения таких дисперсий по сгруппированным данным исходной выборки достаточно большого объема, они находятся как средневзвешенные величины:

$$D_{\text{общ}} = \frac{\sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^p n_{ij} (x_{ij} - \bar{x})^2}{\sum_{j=1}^p N_j}; \quad (2)$$

$$D_{\text{внгр}} = \frac{\sum_{j=1}^p N_j \cdot D_{j \text{ гр}}}{\sum_{j=1}^p N_j}; \quad (3)$$

$$D_{j \text{ гр}} = \frac{\sum_{i=1}^q n_{ij} \cdot (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{N_j}; \quad (4)$$

$$D_{\text{межгр}} = \frac{\sum_{j=1}^p N_j \cdot (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{\sum_{j=1}^p N_j}; \quad (5)$$

$$N_j = \sum_{i=1}^q n_{ij}, \quad (6)$$

где  $q$  – количество элементов в отдельной группе;  $p$  – количество групп;  $x_{ij}$  –  $i$ -ое значение в  $j$ -ой группе;  $n_{ij}$  – частота значения  $x_{ij}$ ;  $\bar{x}$  – общая средняя;  $N_j$  – объем  $j$ -ой группы;  $D_{j \text{ гр}}$  – групповая дисперсия в  $j$ -ой группе;  $\bar{x}_j$  – средняя в  $j$ -ой группе.

В случае малых выборок, характерных для большинства методик измерений и использования «исправленных» дисперсий, выполняться будет только правило сложения соответствующих квадратов отклонений:

$$SS_{\text{общ}} = SS_{\text{внгр}} + SS_{\text{межгр}}, \quad (7)$$

где  $SS_{\text{общ}}$ ,  $SS_{\text{внгр}}$  и  $SS_{\text{межгр}}$  – соответственно общая, внутри- и межгрупповая суммы квадратов отклонений.

Для случая одинаковых объемов выборок в группах эти суммы находятся следующим образом:

$$SS_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \bar{x})^2, \quad (8)$$

$$SS_{\text{внгр}} = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^q (x_{ij} - \bar{x}_j)^2, \quad (9)$$

$$SS_{\text{межгр}} = q \sum_{j=1}^p (\bar{x}_j - \bar{x})^2. \quad (10)$$

Оценки дисперсий получаются путем усреднения соответствующих квадратов отклонений на числа степеней свободы дисперсий

$$s^2 = \frac{SS}{f}, \quad (11)$$

где  $SS$  – сумма квадратов отклонений;  $f$  – число степеней свободы дисперсии.

Под термином «число степеней свободы» понимается [5, 6] число слагаемых в сумме за вычетом числа налагаемых на них ограничений, в качестве которых в данном случае выступают соответствующие средние величины. Тогда в рассматриваемом случае числа степеней свободы дисперсий будут определяться следующим образом:

$$f_{\text{общ}} = pq - 1; \quad (12)$$

$$f_{\text{внгр}} = p(q - 1); \quad (13)$$

$$f_{\text{межгр}} = (p - 1)q. \quad (14)$$

В результате каждое слагаемое в формуле (7) делится на свое значение, отличное от остальных, и переход от формулы (7) к формуле (1) нарушается. В то же время правило, выражаемое формулой (1), находит свое отражение в расчетах, связанных с оценкой прецизионности результатов измерений, например [2]:

$$s_R^2 = s_r^2 + s_L^2, \quad (15)$$

где  $s_R^2$ ,  $s_r^2$  и  $s_L^2$  – соответственно оценки дисперсий воспроизводимости, повторяемости и межлабораторной дисперсии.

В этом случае количество групп  $p$  – это количество лабораторий, задействованное в оценке дисперсии воспроизводимости, а  $q$  – количество проведенных единичных определений в одной лаборатории, используемых для получения одного результата измерения. При этом дисперсия повторяемости определяется как осредненное значение оценок внутрилабораторных дисперсий [2], получаемых в условиях повторяемости. Для случая одинакового количества единичных определений

$$s_r^2 = \frac{\sum_{j=1}^p s_j^2}{p}, \quad (16)$$

$$s_j^2 = \frac{1}{q-1} \sum_{i=1}^q (x_{ij} - \bar{x}_j)^2, \quad (17)$$

где  $x_{ij}$  – значение измеряемой величины, получаемое в результате единичного определения.

Стандартное отклонение повторяемости является мерой разброса результатов единичных определений относительно среднего в отдельной лаборатории и является показателем внутрилабораторной прецизионности в условиях повторяемости [3].

В [2] (формулы (21), (22)) и [3] (формула (10)) межлабораторная дисперсия представлена в виде разности, которая для случая одного уровня измерений и одинакового числа единичных определений во всех лабораториях будет иметь вид:

$$s_L^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{j=1}^p (\bar{x}_j - \bar{x})^2 - \frac{s_r^2}{q}. \quad (18)$$

Подстановка этих значений в формулу (15) дает следующее выражение:

$$s_R^2 = s_r^2 \left(1 - \frac{1}{q}\right) + \frac{1}{p-1} \sum_{j=1}^p (\bar{x}_j - \bar{x})^2 \quad (19)$$

Вид первого слагаемого в правой части уравнения означает, что в дисперсии повторяемости осуществлен переход к осреднению по числу параллельных определений, а второе слагаемое представляет собой оценку межгрупповой дисперсии, найденной осреднением по числу степеней свободы. Таким образом, правило, выражаемое формулой (1), снова не будет выполняться.

Вторая проблема, возникающая при рассмотрении формулы (15) для оценки дисперсии воспроизводимости, заключается в ответе на вопрос о том, мерой разброса чего является данная оценка. Если мы используем формулу (15), то, согласно [2], получаем оценку дисперсии воспроизводимости, а если формулу (1), то, согласно положениям статистики, получаем оценку общей дисперсии. Известно [4], что стандартное отклонение, получаемое из общей дисперсии, является мерой разброса отдельных значений в группах относительно общей средней. Согласно определению [1], «стандартное отклонение воспроизводимости – это среднеквадратическое отклонение результатов измерений, полученных в условиях воспроизводимости», т.е. именно результатов измерений, а не единичных определений. За очень редким исключением, при котором единичное определение и является результатом измерения, результат отдельного измерения представляет собой среднее арифметическое результатов единичных определений, получаемых, как правило, в условиях повторяемости.

Данное противоречие заложено в использовании исходной статистической модели [1], раздел 5, согласно которой каждый результат измерения  $y$  может быть представлен в виде:

$$x = m + B + e, \quad (20)$$

где  $m$  – общее среднее значение (математическое ожидание);  $B$  – лабораторная составляющая систематической погрешности в условиях повторяемости;  $e$  – случайная составляющая погрешности каждого результата измерений в условиях повторяемости.

Использование данной формулы тут же приводит к формуле (15), если находить дисперсии левой и правой частей этого равенства. Однако при этом не конкретизируется, что понимается под словами «каждый результат измерения». Если это результат единичного определения, то стандартное отклонение воспроизводимости, получаемое из дисперсии воспроизводимости по формуле (15), характеризует разброс единичных определений. Если под каждым результатом измерения понимается результат отдельного измерения, получаемый осреднением результатов единичных определений, то формула (20) неверна в последнем слагаемом, поскольку в этом случае каждый результат измерения:

$$\bar{x} = m + B + \frac{\sum_{i=1}^q e_i}{q}, \quad (21)$$

где  $e_i$  – случайная составляющая погрешности каждого результата единичного определения в условиях повторяемости.

Если находить дисперсию от левой и правой части уравнения (21), то легко приходим к формуле:

$$s_{(\bar{x})}^2 = s_L^2 + \frac{s_r^2}{q}, \quad (22)$$

что соответствует приведенному в [3, формула (2)].

Отличие экспериментальных результатов в научных исследованиях от результатов рутинных измерений, получаемых с помощью стандартизованных методик, заключается в том, что в стандартизованных методиках для оценки показателей воспроизводимости в рамках процедуры подтверждения компетентности аккредитованных лабораторий можно привлечь достаточно большую их группу, где данный метод измерения внедрен, в то время как в научных исследованиях проводимые измерения носят частный, иногда уникальный характер. В связи с этим возникает вопрос оценки соотношения между дисперсиями повторяемости и воспроизводимости.

Отношение

$$\gamma = \frac{s_R^2}{s_r^2} \quad (23)$$

зависит от применяемого метода и объекта измерения. Например, для случая контроля содержания химических веществ в воде  $\gamma = 1,4$  [7], приведенные справочные данные в [8, 9] показывают изменение этой величины в пределах от 1,2 до 2,2. Поэтому в отсутствии других данных на первом этапе можно оценочно взять значение  $\gamma$  как среднее от этих границ, т.е.  $\gamma = 1,7$ . Для уточнения этого значения необходимо найти внутрилабораторное стандартное отклонение  $s_{R_{\text{д}}}$  для случая промежуточной прецизионности, используя для этого, как минимум, фактор «время». Переход к стандартному отклонению воспроизводимости можно осуществить с использованием рекомендации [9], п. 4.5.3:

$$s_R = \frac{s_{R_{\text{д}}}}{0,84} \quad (24)$$

Полученное значение можно использовать для нахождения стандартного отклонения результата измерения  $s_{(\bar{x})}$  в условиях воспроизводимости по формуле (22). Интервальная оценка результата измерения, в пределах которой должно находиться значение, полученное в любой другой лаборатории, может записываться в виде [8]:

$$x = \bar{x} \pm U, \quad (25)$$

где  $U$  – расширенная неопределенность результата измерения.

В качестве коэффициента охвата, необходимого для расчета расширенной неопределенности, берется [5] квантиль  $t$ -распределения Стьюдента, соответствующего доверительной вероятности и числу эффективных степеней свободы рассчитываемой статистики. В данном случае это число степеней свободы дисперсии воспроизводимости, которая, являясь частным случаем общей дисперсии, имеет число степеней свободы:

$$f_{\text{вос}} = pq - 1. \quad (26)$$

В качестве примера, иллюстрирующего предложенную методику расчета, была проведена обработка экспериментальных данных, указанных в [2], раздел В.1. Поскольку приведенная в источнике информации проверка исходной выборки на совместимость и наличие выбросов показала их отсутствие, данный этап в приводимых ниже расчетах был опущен.

В соответствии с положениями стандарта [2], исходная выборка была уменьшена до объема, при котором количество единичных определений в каждой базовой ячейке равнялось трем (табл. 1).

Таблица 1.

Результаты единичных определений, % (масс.)

Table 1.

Results of single determinations, % (wt.)

Уровень измеряемой характеристики	Номер единичного определения	Номер лаборатории							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0,71	0,69	0,66	0,67	0,70	0,73	0,71	0,70
	2	0,71	0,67	0,65	0,65	0,69	0,74	0,71	0,65
	3	0,70	0,68	0,69	0,66	0,66	0,73	0,69	0,68
2	1	1,20	1,22	1,28	1,23	1,31	1,39	1,20	1,24
	2	1,18	1,21	1,31	1,18	1,22	1,36	1,26	1,22
	3	1,23	1,22	1,30	1,20	1,22	1,37	1,26	1,30
3	1	1,68	1,64	1,61	1,68	1,64	1,70	1,69	1,67
	2	1,70	1,64	1,61	1,66	1,67	1,73	1,70	1,68
	3	1,68	1,65	1,62	1,66	1,60	1,73	1,68	1,67
4	1	3,26	3,20	3,37	3,16	3,20	3,27	3,27	3,25
	2	3,26	3,20	3,36	3,22	3,19	3,31	3,24	3,25
	3	3,20	3,20	3,38	3,23	3,18	3,29	3,23	3,26

Поскольку количество единичных определений в каждой базовой ячейке было одинаковым, средние величины (табл. 2) определялись по правилу нахождения средней арифметической простой величины.

Таблица 2.

Осредненные величины, % (масс.)

Table 2.

Average values, % (wt.)

Уровень измеряемой характеристики	Групповые средние $\bar{x}_j$								Общая средняя $\bar{\bar{x}}$
	Номер лаборатории								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0,707	0,680	0,667	0,660	0,683	0,733	0,703	0,677	0,6888
2	1,203	1,217	1,297	1,203	1,250	1,373	1,240	1,253	1,2546
3	1,687	1,643	1,613	1,667	1,637	1,720	1,690	1,673	1,6663
4	3,240	3,200	3,370	3,203	3,190	3,290	3,247	3,253	3,2492

Суммы квадратов отклонений определялись по формулам (8) – (10), результаты представлены в табл. 3-5. Расчеты велись в MS Excel с использованием всех десятичных знаков – режим, установленный по умолчанию. Окончательно определяемые характеристики сведены в табл. 6.

Таблица 3.

Значения компонентов  $(\bar{x}_j - \bar{\bar{x}})^2$  в межгрупповой сумме квадратов отклонений

Table 3.

Values of components  $(\bar{x}_j - \bar{\bar{x}})^2$  in the intergroup sum of squared deviations

Уровень измеряемой характеристики	Номер лаборатории								$\sum_{j=1}^p (\bar{x}_j - \bar{\bar{x}})^2$	SS <sub>межгр</sub>
	1	2	3	4	5	6	7	8		
1	$3,210 \cdot 10^{-4}$	$7,656 \cdot 10^{-5}$	$4,876 \cdot 10^{-4}$	$8,265 \cdot 10^{-4}$	$2,934 \cdot 10^{-5}$	$1,987 \cdot 10^{-3}$	$2,126 \cdot 10^{-4}$	$1,460 \cdot 10^{-4}$	$4,087 \cdot 10^{-3}$	$1,226 \cdot 10^{-2}$
2	$2,626 \cdot 10^{-3}$	$1,437 \cdot 10^{-3}$	$1,771 \cdot 10^{-3}$	$2,626 \cdot 10^{-3}$	$2,100 \cdot 10^{-5}$	$1,410 \cdot 10^{-2}$	$2,126 \cdot 10^{-4}$	$1,562 \cdot 10^{-6}$	$2,279 \cdot 10^{-2}$	$6,840 \cdot 10^{-2}$
3	$4,168 \cdot 10^{-4}$	$5,251 \cdot 10^{-4}$	$2,800 \cdot 10^{-3}$	$1,736 \cdot 10^{-7}$	$8,751 \cdot 10^{-4}$	$2,889 \cdot 10^{-3}$	$5,640 \cdot 10^{-4}$	$5,017 \cdot 10^{-5}$	$8,120 \cdot 10^{-3}$	$2,436 \cdot 10^{-2}$
4	$8,402 \cdot 10^{-5}$	$2,417 \cdot 10^{-3}$	$1,460 \cdot 10^{-2}$	$2,100 \cdot 10^{-3}$	$3,500 \cdot 10^{-3}$	$1,667 \cdot 10^{-3}$	$6,250 \cdot 10^{-6}$	$1,736 \cdot 10^{-5}$	$2,439 \cdot 10^{-2}$	$7,318 \cdot 10^{-2}$

Таблица 4.

Значения компонентов  $(x_{ij} - \bar{x}_j)^2$  во внутригрупповой сумме квадратов отклонений

Table 4.

Values of components  $(x_{ij} - \bar{x}_j)^2$  in the intragroup sum of squared deviations

Уровень измеряемой характеристики	Номер единичного определения	Номер лаборатории								SS <sub>внгр</sub>
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	1	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$1,000 \cdot 10^{-4}$	$4,444 \cdot 10^{-5}$	$1,000 \cdot 10^{-4}$	$2,778 \cdot 10^{-4}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$4,444 \cdot 10^{-5}$	$5,444 \cdot 10^{-4}$	$3,800 \cdot 10^{-3}$
	2	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$1,000 \cdot 10^{-4}$	$2,778 \cdot 10^{-4}$	$1,000 \cdot 10^{-4}$	$4,444 \cdot 10^{-5}$	$4,444 \cdot 10^{-5}$	$4,444 \cdot 10^{-5}$	$7,111 \cdot 10^{-4}$	
	3	$4,444 \cdot 10^{-5}$	0,000	$5,444 \cdot 10^{-4}$	0,000	$5,444 \cdot 10^{-4}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$1,778 \cdot 10^{-4}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	
	$\sum_{i=1}^q (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$	$6,667 \cdot 10^{-5}$	$2,000 \cdot 10^{-4}$	$8,667 \cdot 10^{-4}$	$2,000 \cdot 10^{-4}$	$8,667 \cdot 10^{-4}$	$6,667 \cdot 10^{-5}$	$2,667 \cdot 10^{-4}$	$1,267 \cdot 10^{-3}$	
2	1	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$2,778 \cdot 10^{-4}$	$7,111 \cdot 10^{-4}$	$3,600 \cdot 10^{-3}$	$2,778 \cdot 10^{-4}$	$1,600 \cdot 10^{-3}$	$1,778 \cdot 10^{-4}$	$1,480 \cdot 10^{-2}$
	2	$5,444 \cdot 10^{-4}$	$4,444 \cdot 10^{-5}$	$1,778 \cdot 10^{-4}$	$5,444 \cdot 10^{-4}$	$9,000 \cdot 10^{-4}$	$1,778 \cdot 10^{-4}$	$4,000 \cdot 10^{-4}$	$1,111 \cdot 10^{-3}$	
	3	$7,111 \cdot 10^{-4}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$9,000 \cdot 10^{-4}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$4,000 \cdot 10^{-4}$	$2,178 \cdot 10^{-3}$	

Продолжение табл. 4.

Значения компонентов  $(x_{ij} - \bar{x}_j)^2$  во внутригрупповой сумме квадратов отклонений

Table 4 (continued).

Values of components  $(x_{ij} - \bar{x}_j)^2$  in the intragroup sum of squared deviations

Уровень измеряемой характеристики	Номер единичного определения	Номер лаборатории								SS <sub>внгр</sub>
		1	2	3	4	5	6	7	8	
3	1	$4,444 \cdot 10^{-5}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$1,778 \cdot 10^{-4}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$4,000 \cdot 10^{-4}$	0,000	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$4,000 \cdot 10^{-3}$
	2	$1,778 \cdot 10^{-4}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$4,444 \cdot 10^{-5}$	$1,111 \cdot 10^{-3}$	$1,000 \cdot 10^{-4}$	$1,000 \cdot 10^{-4}$	$4,444 \cdot 10^{-5}$	
	3	$4,444 \cdot 10^{-5}$	$4,444 \cdot 10^{-5}$	$4,444 \cdot 10^{-5}$	$4,444 \cdot 10^{-5}$	$1,344 \cdot 10^{-3}$	$1,000 \cdot 10^{-4}$	$1,000 \cdot 10^{-4}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	
	$\sum_{i=1}^q (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$	$2,667 \cdot 10^{-4}$	$6,667 \cdot 10^{-5}$	$6,667 \cdot 10^{-5}$	$2,667 \cdot 10^{-4}$	$2,467 \cdot 10^{-3}$	$6,000 \cdot 10^{-4}$	$2,000 \cdot 10^{-4}$	$6,667 \cdot 10^{-5}$	
4	1	$4,000 \cdot 10^{-4}$	0,000	0,000	$1,878 \cdot 10^{-3}$	$1,000 \cdot 10^{-4}$	$4,000 \cdot 10^{-4}$	$5,444 \cdot 10^{-4}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	$7,400 \cdot 10^{-3}$
	2	$4,000 \cdot 10^{-4}$	0,000	$1,000 \cdot 10^{-4}$	$2,778 \cdot 10^{-4}$	0,000	$4,000 \cdot 10^{-4}$	$4,444 \cdot 10^{-5}$	$1,111 \cdot 10^{-5}$	
	3	$1,600 \cdot 10^{-3}$	0,000	$1,000 \cdot 10^{-4}$	$7,111 \cdot 10^{-4}$	$1,000 \cdot 10^{-4}$	0,000	$2,778 \cdot 10^{-4}$	$4,444 \cdot 10^{-5}$	
	$\sum_{i=1}^q (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$	$2,400 \cdot 10^{-3}$	0,000	$2,000 \cdot 10^{-4}$	$2,867 \cdot 10^{-3}$	$2,000 \cdot 10^{-4}$	$8,000 \cdot 10^{-4}$	$8,667 \cdot 10^{-4}$	$6,667 \cdot 10^{-5}$	



Таблица 5.

Значения компонентов  $(x_{ij} - \bar{x})^2$  в общей сумме квадратов отклонений

Table 5.

Values of components  $(x_{ij} - \bar{x})^2$  in the total sum of squared deviations

Уровень измеряемой характеристики	Номер единичного определения	Номер лаборатории								SS <sub>общ</sub>
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	1	$4,516 \cdot 10^{-4}$	$1,562 \cdot 10^{-6}$	$8,266 \cdot 10^{-4}$	$3,516 \cdot 10^{-4}$	$1,266 \cdot 10^{-4}$	$1,702 \cdot 10^{-3}$	$4,516 \cdot 10^{-4}$	$1,266 \cdot 10^{-4}$	$1,606 \cdot 10^{-2}$
	2	$4,516 \cdot 10^{-4}$	$3,516 \cdot 10^{-4}$	$1,502 \cdot 10^{-3}$	$1,502 \cdot 10^{-3}$	$1,562 \cdot 10^{-6}$	$2,627 \cdot 10^{-3}$	$4,516 \cdot 10^{-4}$	$1,502 \cdot 10^{-3}$	
	3	$1,266 \cdot 10^{-4}$	$7,656 \cdot 10^{-5}$	$1,562 \cdot 10^{-6}$	$8,266 \cdot 10^{-4}$	$8,266 \cdot 10^{-4}$	$1,702 \cdot 10^{-3}$	$1,562 \cdot 10^{-6}$	$7,656 \cdot 10^{-5}$	
	$\sum_{i=1}^q (x_{ij} - \bar{x})^2$	$1,030 \cdot 10^{-3}$	$4,297 \cdot 10^{-4}$	$2,330 \cdot 10^{-3}$	$2,680 \cdot 10^{-3}$	$9,547 \cdot 10^{-4}$	$6,030 \cdot 10^{-3}$	$9,047 \cdot 10^{-4}$	$1,705 \cdot 10^{-3}$	
2	1	$2,979 \cdot 10^{-3}$	$1,196 \cdot 10^{-3}$	$6,460 \cdot 10^{-4}$	$6,043 \cdot 10^{-4}$	$3,071 \cdot 10^{-3}$	$1,834 \cdot 10^{-2}$	$2,979 \cdot 10^{-3}$	$2,127 \cdot 10^{-4}$	$8,320 \cdot 10^{-2}$
	2	$5,563 \cdot 10^{-3}$	$1,988 \cdot 10^{-3}$	$3,071 \cdot 10^{-3}$	$5,563 \cdot 10^{-3}$	$1,196 \cdot 10^{-3}$	$1,111 \cdot 10^{-2}$	$2,934 \cdot 10^{-5}$	$1,196 \cdot 10^{-3}$	
	3	$6,043 \cdot 10^{-4}$	$1,196 \cdot 10^{-3}$	$2,063 \cdot 10^{-3}$	$2,979 \cdot 10^{-3}$	$1,196 \cdot 10^{-3}$	$1,332 \cdot 10^{-2}$	$2,934 \cdot 10^{-5}$	$2,063 \cdot 10^{-3}$	
	$\sum_{i=1}^q (x_{ij} - \bar{x})^2$	$9,146 \cdot 10^{-3}$	$4,380 \cdot 10^{-3}$	$5,780 \cdot 10^{-3}$	$9,146 \cdot 10^{-3}$	$5,463 \cdot 10^{-3}$	$4,277 \cdot 10^{-2}$	$3,038 \cdot 10^{-3}$	$3,471 \cdot 10^{-3}$	
3	1	$1,891 \cdot 10^{-4}$	$6,891 \cdot 10^{-4}$	$3,164 \cdot 10^{-3}$	$1,891 \cdot 10^{-4}$	$6,891 \cdot 10^{-4}$	$1,139 \cdot 10^{-3}$	$5,641 \cdot 10^{-4}$	$1,406 \cdot 10^{-5}$	$2,836 \cdot 10^{-2}$
	2	$1,139 \cdot 10^{-3}$	$6,891 \cdot 10^{-4}$	$3,164 \cdot 10^{-3}$	$3,906 \cdot 10^{-5}$	$1,406 \cdot 10^{-5}$	$4,064 \cdot 10^{-3}$	$1,139 \cdot 10^{-3}$	$1,891 \cdot 10^{-4}$	
	3	$1,891 \cdot 10^{-4}$	$2,641 \cdot 10^{-4}$	$2,139 \cdot 10^{-3}$	$3,906 \cdot 10^{-5}$	$4,389 \cdot 10^{-3}$	$4,064 \cdot 10^{-3}$	$1,891 \cdot 10^{-4}$	$1,406 \cdot 10^{-5}$	
	$\sum_{i=1}^q (x_{ij} - \bar{x})^2$	$1,517 \cdot 10^{-3}$	$1,642 \cdot 10^{-3}$	$8,467 \cdot 10^{-3}$	$2,672 \cdot 10^{-4}$	$5,092 \cdot 10^{-3}$	$9,267 \cdot 10^{-3}$	$1,892 \cdot 10^{-3}$	$2,172 \cdot 10^{-4}$	
4	1	$1,174 \cdot 10^{-4}$	$2,417 \cdot 10^{-3}$	$1,460 \cdot 10^{-2}$	$7,951 \cdot 10^{-3}$	$2,417 \cdot 10^{-3}$	$4,340 \cdot 10^{-4}$	$4,340 \cdot 10^{-4}$	$6,944 \cdot 10^{-7}$	$8,058 \cdot 10^{-2}$
	2	$1,174 \cdot 10^{-4}$	$2,417 \cdot 10^{-3}$	$1,228 \cdot 10^{-2}$	$8,507 \cdot 10^{-4}$	$3,501 \cdot 10^{-3}$	$3,701 \cdot 10^{-3}$	$8,403 \cdot 10^{-5}$	$6,944 \cdot 10^{-7}$	
	3	$2,417 \cdot 10^{-3}$	$2,417 \cdot 10^{-3}$	$1,712 \cdot 10^{-2}$	$3,674 \cdot 10^{-4}$	$4,784 \cdot 10^{-3}$	$1,667 \cdot 10^{-3}$	$3,674 \cdot 10^{-4}$	$1,174 \cdot 10^{-4}$	
	$\sum_{i=1}^q (x_{ij} - \bar{x})^2$	$2,652 \cdot 10^{-3}$	$7,252 \cdot 10^{-3}$	$4,400 \cdot 10^{-2}$	$9,169 \cdot 10^{-3}$	$1,070 \cdot 10^{-2}$	$5,802 \cdot 10^{-3}$	$8,854 \cdot 10^{-4}$	$1,187 \cdot 10^{-4}$	

Таблица 6.

## Значения сумм квадратов отклонений

Table 6.

## Values of sums of squared deviations

Уровень измеряемой характеристики	$SS_{\text{внгр}}$	$SS_{\text{межгр}}$	$SS_{\text{общ}}$
1	$3,800 \cdot 10^{-3}$	$1,226 \cdot 10^{-2}$	$1,606 \cdot 10^{-2}$
2	$1,480 \cdot 10^{-2}$	$6,840 \cdot 10^{-2}$	$8,320 \cdot 10^{-2}$
3	$4,000 \cdot 10^{-3}$	$2,436 \cdot 10^{-2}$	$2,836 \cdot 10^{-2}$
4	$7,400 \cdot 10^{-3}$	$7,318 \cdot 10^{-2}$	$8,058 \cdot 10^{-2}$

Используя формулы (17) и (16), можно получить для каждого уровня измеряемой характеристики значения дисперсии повторяемости. Значения дисперсии воспроизводимости по методике ГОСТ [2] должны быть посчитаны по формуле (19), а по предлагаемой – по формулам (8), (11), (12). Полученные результаты представлены в табл. 7. Значения дисперсии воспроизводимости, полученные расчетом по методике [2], оказались завышенными на 6-8 % по сравнению с результатами расчетов на основании правила сложения сумм квадратов отклонений.

Таблица 7.

## Результаты расчетов дисперсий

Table 7.

## Results of variance calculations

Уровень измеряемой характеристики	Дисперсия повторяемости $s_r^2$	Расчеты по методике [2]		Расчеты по предлагаемой методике	
		Дисперсия воспроизводимости $s_R^2$	$\gamma = \frac{s_R^2}{s_r^2}$	Дисперсия воспроизводимости $s_R^2$	$\gamma = \frac{s_R^2}{s_r^2}$
1	$2,375 \cdot 10^{-4}$	$7,423 \cdot 10^{-4}$	3,125	$6,984 \cdot 10^{-4}$	2,940
2	$9,250 \cdot 10^{-4}$	$3,874 \cdot 10^{-3}$	4,188	$3,617 \cdot 10^{-3}$	3,910
3	$2,500 \cdot 10^{-4}$	$1,327 \cdot 10^{-3}$	5,307	$1,233 \cdot 10^{-3}$	4,932
4	$4,625 \cdot 10^{-4}$	$3,793 \cdot 10^{-3}$	8,202	$3,504 \cdot 10^{-3}$	7,575

## Выводы

Анализ положений нормативных документов в области метрологии, регламентирующих оценку показателей прецизионности результатов измерений и их сопоставление с положениями теории статистики, привели к трем основным выводам.

1. Для нахождения оценки дисперсии воспроизводимости необходимо использовать правило сложения квадратов отклонений, а не дисперсий. При дальнейшем переходе к дисперсии воспроизводимости в качестве числа степеней свободы можно использовать величину  $pq - 1$ .

2. Дисперсия воспроизводимости характеризует разброс результатов единичных определений, сделанных в условиях воспроизводимости, относительно общей средней.

3. Для характеристики воспроизводимости результатов экспериментальных исследований необходимо использовать расширенную неопределенность результата измерения, для чего необходимо определить дисперсии повторяемости и воспроизводимости.

**Библиографический список**

1. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200029975> (Дата обращения 12.01.2022)
2. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200029976> (дата обращения 12.01.2022)
3. ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200029980> (дата обращения 12.01.2022)
4. **Гмурман, В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.
5. ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200146871> (Дата обращения 12.01.2022).
6. ГОСТ Р ИСО 3534-1-2019. Статистические методы. Словарь и условные обозначения. Часть 1. Общие статистические термины и термины, используемые в теории вероятностей [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200167574> (Дата обращения 12.01.2022)
7. ГОСТ Р 51232-98 Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200003120> (Дата обращения 12.01.2022).
8. РМГ 61-2010. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200094703> (Дата обращения 12.01.2022).
9. РМГ 76-2014. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Внутренний контроль качества результатов химического анализа. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200123083> (Дата обращения 12.01.2022).

**Дата поступления  
в редакцию: 05.04.2022**

УДК 681.5.03:519.24

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_44

## МЕТОД И АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ В МНОГОУРОВНЕВЫХ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ НЕУСТРАНИМОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИРИХЛЕ

**А.А. Хлыбов**

ORCID: 0000-0002-6559-7819 e-mail: hlybov\_52@mail.ru

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

ORSID: 0000-0002-5760-9728 e-mail: vnbgtk@mail.ru

Тверской государственный технический университет  
*Тверь, Россия***В.И. Ерофеев**

ORCID: 0000-0002-6637-5564 e-mail: erof.vi@yandex.ru

Институт проблем машиностроения РАН  
*Нижний Новгород, Россия***А.В. Иляхинский**

ORCID: 0000-0002-7677-8455 e-mail: ilyahinsky-aleks@bk.ru

Институт проблем машиностроения РАН  
*Нижний Новгород, Россия*

Представлен новый подход управления в многоуровневых и распределенных системах, опирающийся на принципы неравновесной термодинамики. Предлагается статистическая модель в виде функции плотности вероятностей; исследуемый объект представлен в виде процессов, характеризующих однозначное состояние. Показано, что энтропия многомерного распределения Дирихле обладает совокупностью свойств, которые позволяют использовать его для количественной интегральной оценки состояний сложных многоуровневых иерархически организованных систем. В качестве меры оценки состояний сложных многоуровневых иерархически организованных систем предлагается использовать параметр самоорганизации состояния процесса. Множественные значения состояний объекта при таком подходе отображаются одномерной шкалой. Показано, что для управления состояниями объекта можно использовать оптимизирующий функционал – критерий качества.

**Ключевые слова:** временные ряды, статистическая модель, функция плотности вероятностей, распределение Дирихле, энтропия, самоорганизация.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Хлыбов, А.А. Метод и алгоритм анализа процессов управления в многоуровневых и распределенных системах в условиях неустрашимой неопределенности на основе статистической модели распределения Дирихле / А.А. Хлыбов, В.Н. Богатиков, В.И. Ерофеев, А.В. Иляхинский // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 44-53. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_44

## METHOD AND ALGORITHM FOR ANALYSIS OF PROCESSES OF CONTROL IN MULTILEVEL AND DISTRIBUTED SYSTEMS UNDER CONDITIONS OF UNRECOVERABLE UNCERTAINTY BASED ON DIRICHLET DISTRIBUTION STATISTICAL MODEL

**A.A. Khlybov**

ORCID: **0000-0002-6559-7819** e-mail: **hlybov\_52@mail.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**V.N. Bogatikov**

ORCID: **0000-0002-5760-9728** e-mail: **vnbgtk@mail.ru**  
Tver State Technical University  
*Tver, Russia*

**V.I. Erofeev**

ORCID: **0000-0002-6637-5564** e-mail: **erof.vi@yandex.ru**  
Institute of Mechanical Engineering Problems RAS  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A. V. Ilyakhinskii**

ORCID: **0000-0002-9137-6390** e-mail: **ilyahinsky-aleks@bk.ru**  
Institute of Mechanical Engineering Problems RAS  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** New approach of control in multilevel and distributed systems using the principles of nonequilibrium dynamics, is proposed. Statistical model is used in the form of a probability density function, the object under study is represented in the form of processes characterizing an unambiguous state. It is shown that the entropy of multidimensional Dirichlet distribution has a set of properties that allow to use the Dirichlet distribution for a quantitative integral assessment of the states of complex multilevel hierarchically organized systems. As a quantitative measure of assessing the states of complex multilevel hierarchically organized systems, it is proposed to use the parameter of self-organization of the process state. With this approach, multiple status values of an object are depicted into a one-dimensional scale. It is shown that an optimizing functional, a quality criterion, can be used to control the states of an object.

**Key words:** time series, statistical model, probability density function, Dirichlet distribution, entropy, self-organization.

**FOR CITATION:** A.A. Khlybov, V.N. Bogatikov, V.I. Erofeev, A.V. Ilyakhinskii. Method and algorithm for analysis of processes of control in multilevel and distributed systems under conditions of unrecoverable uncertainty based on Dirichlet distribution statistical model. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 3. Pp. 44-53.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_44

Современные сложные системы представляют собой комплексы подсистем, которые связаны между собой процессами обмена энергией, веществом и информацией; в них протекают сложные процессы и возникают критические хаотические режимы. Введение в их структуру автоматических регуляторов с соответствующими информационными компонентами приближает созданные человеком искусственные агрегаты к биологическим системам, в которых могут протекать процессы самоорганизации. Проблемы управления самоорганизующимися объектами привели к постановке вопроса создания агрегированных регуляторов [1-5]. Решение задачи о регуляторе можно найти в работах В.В. Солодовникова, Б.Н. Петрова, Т. Честната, А.А. Федьдбаума и др., оно опирается на выбор структуры регулирующих устройств, основанных на базе частотных и корневых методов. Теория аналитического конструирования оптимальных регуляторов нашла применение в работах А.М. Летова [6-9] и Р. Калмана [10]. В дальнейшем такой подход получил развитие в работах А.А. Красовского [11], М.М. Атанса и П. Фалба [12]. В них показана процедура управления состоянием объекта. В основу положено требование минимума некоторого оптимизирующего функционала (критерия качества). Разработки методов количественной оценки состояний на сегодняшний

день не завершены; задача получает возможность дальнейшего развития с использованием современных информационных технологий.

### Два подхода к анализу состояний

При экспериментальных исследованиях сложных систем часто реализуется подход, основанный на анализе временных рядов, в рамках которого изучается внутренняя динамика объектов и их взаимные связи. При этом учитываются связи во времени и их изменчивость [13]. Процедура анализа изменений закономерностей наблюдаемого временного ряда относится к обратным задачам. Решение обратных задач зависит от множества факторов. В частности, необходимо учитывать качество и количество полученной информации. Важную роль играет выбор параметров модели исследуемого объекта. С учетом погрешности получаемых результатов, предложенная модель может описывать поведение реально существующего объекта.

Решение дифференциальных уравнений, описывающих поведение изучаемого объекта, позволяет решить обратную задачу. В ряде случаев при моделировании процесса сложно написать полную систему дифференциальных уравнений. Значительные трудности возникают при решении предложенных уравнений. На практике для предложенной модели уменьшают количество параметров, влияющих на свойства изучаемого объекта, что приводит к значительным отклонениям реальных объектов от их модельного представления.

Для получения эмпирического распределения используется также статистический подход для решения обратных задач. Он предусматривает использование результатов экспериментальных измерений [14-20]. Статистические параметры (среднее, коэффициент вариации, центральные моменты и т. д.) обеспечивают единое количественное описание наиболее общих закономерностей и свойств. При таком подходе моделируемый объект может иметь различную физическую природу. Также следует отметить, что в статистических методах обработки информации, в частности, при обработке параметров временных рядов, достаточно редко используются модели, основанные на гипотезах о структуре и процессах моделируемой системы.

Для выбранной модели исследуемого объекта используемое статистическое распределение, должно быть информационно эквивалентно. Это выполняется при выборе ряда условий [21, 22]:

- статистическое распределение определено на ограниченном интервале;
- энтропия распределения должна состоять из производства и потока;
- распределения, заданные на одномерных симплексах, должны допускать переход к многомерному симплекс распределению.

Нормальное распределение физических свойств исследуемого объекта, рассматриваемое на неограниченном интервале, предполагает наличие параметров значения которых могут иметь как неограниченно большое, так и малое значение.

### Распределение Дирихле – статистическая модель состояния сложных многомерных и многосвязанных систем

Используем статистическую модель многомерного распределения Дирихле на ограниченном конечном интервале для анализа сигналов акустической эмиссии [23,24]. Акустическая эмиссия (АЭ) возникает при динамической перестройке структуры материалов. Сигналы АЭ носят случайный характер. Рассматривая акустическую эмиссию, считаем, что в материале протекает  $n-1$  независимых процессов  $x_j$ , с различными скоростями (интенсивностями)  $v_j$ . Для такого процесса можно использовать распределение Дирихле, которое задается соотношением:

$$D(x_1, \dots, x_k) = \frac{\Gamma(a_n)}{\prod_{i=1}^n \Gamma(v_i)} \prod_{i=1}^k x_i^{v_i-1} \times (1 - \sum_{i=1}^k x_i)^{v_n-1} \quad (1)$$

$$0 \leq \sum x_i \leq 1; v_i \geq 0, \dots, v_n \geq 0; \sum_{i=1}^n v_i = a_n; n = k + 1$$

Соответственно, энтропию запишем в виде:

$$H = - \int_x \varphi(x) \log_{\alpha} \varphi(x) dx \quad (2)$$

Энтропию распределения (1) запишем в виде ряда:

$$H(v_1, \dots, v_n) = \ln \prod_{i=1}^n \Gamma(v_i) - \ln \Gamma(a_n) + (a_n - n)\psi(a_n) - \sum_{i=1}^n (v_i - 1)\psi(v_i) \quad (3)$$

Энтропия в виде суммы запишется

$$H(D) = H_i(v_1, \dots, v_n) + H_e(a_n) \quad (4)$$

Считаем, что:

$$H_i(v_1, \dots, v_n) = \ln \prod_{i=1}^n \Gamma(v_i) - \sum_{i=1}^n (v_i - 1)\psi(v_i) \quad (5)$$

отвечает второму закону термодинамики.

Из (5) следует:

$$H_e(a_n) = - \ln \Gamma(a_n) + (a_n - n)\psi(a_n) \quad (6)$$

Уравнение (6) определяет поток энтропии, описывающий процессы взаимодействия с внешней средой. Выражения (1)–(6) – не что иное, как:  $\Gamma(x)$  – гамма-функция, а

$\psi(x) = \frac{d}{dx} \ln \Gamma(x)$  – логарифмическая производная гамма функции (пси-функция Эйлера).

При неограниченном росте числа процессов, протекающих с одинаковыми скоростями ( $v_1 = \dots = v_n = v_\gamma$ ), распределение Дирихле может быть приближенно заменено гамма-распределением с плотностью

$$\gamma(x) = \frac{x^{v_\gamma-1}}{\Gamma(v_\gamma)} \exp(-x), x \geq 0, v_\gamma \geq 0 \quad (7)$$

и энтропией

$$H_\gamma = v_\gamma + \ln \Gamma(v_\gamma) - (v_\gamma - 1)\psi(v_\gamma) \quad (8)$$

Для  $v_\gamma = 1$  уравнение (7) переходит в экспоненциальное распределение, не что иное, как модель радиоактивного распада. Для дискретного процесса в случае, когда число процессов велико, гамма-распределение может рассматриваться как распределение Пуассона.

$$f_p = \frac{v^x}{x!} \exp(-v); v > 0; x = 1, 2, \dots \quad (9)$$

с энтропией [24] принимает следующий вид:

$$H_p = v(1 - \ln v) + \ln \Gamma(1 + v) + \frac{v}{2} \psi'(1 + v) \quad (10)$$

Полученное выражение гамма-распределения для энтропии, (распределения Пуассона) не позволяет выделить какую-либо его часть. Такие модели характерны для изолированной системы. На основании вышесказанного утверждаем, что распределение Дирихле обладает гибкостью и реализмом. Это выгодно отличает его от статистических моделей процессов, построенных на основе определенного на неограниченном интервале нормального распределения, гамма-распределения, экспоненциального распределения и распределения Пуассона. Именно энтропия многомерного распределения Дирихле обладает совокупностью свойств (4-6), которые позволяют использовать ее в качестве количественной меры интегральной оценки статистической неопределенности в микросостояниях сложных систем. Так как распределение Дирихле (1) задается скоростями независимых процессов  $v_i$ , соответствующая статистическая модель инвариантна не только к виду состояния, но и типу процессов, определяющих это состояние. При  $n \geq 3$  поток энтропии (8) может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Изменение знака внешней энтропии позволяет рассматривать в терминах модели распределения Дирихле условие  $H_e(a_n) < 0$  как одно из условий самоорганизации и свидетельствовать о процессах возникновения упорядоченных пространственно-временных образования (*диссипативных структур* по терминологии И. Пригожина), описываемых в рамках неравновесной термодинамики [25-30].

#### Статистический критерий оценки состояния процесса полимеризации стирола

Известно, что процесс полимеризации стирола зависит от многих факторов, в частности от режима нагрев-выдержка во времени, частоты вращения мешалки. Сам процесс полимеризации характеризуется сложным поведением, а также нелинейной зависимостью скорости реакции от таких параметров, как температура, концентрация реагентов. Управляя этими процессами, удастся получить из исходного материала (мономера) полимер с требуемыми свойствами.

На рис. 1 показано изменение значения тока мешалки за период наблюдения 20.12.2012 и 21.12.2012. Соответственно, средние значения тока составляют 18.01 и 18.07 А. При этом данные средние значения могут принадлежать различным генеральным совокупностям.

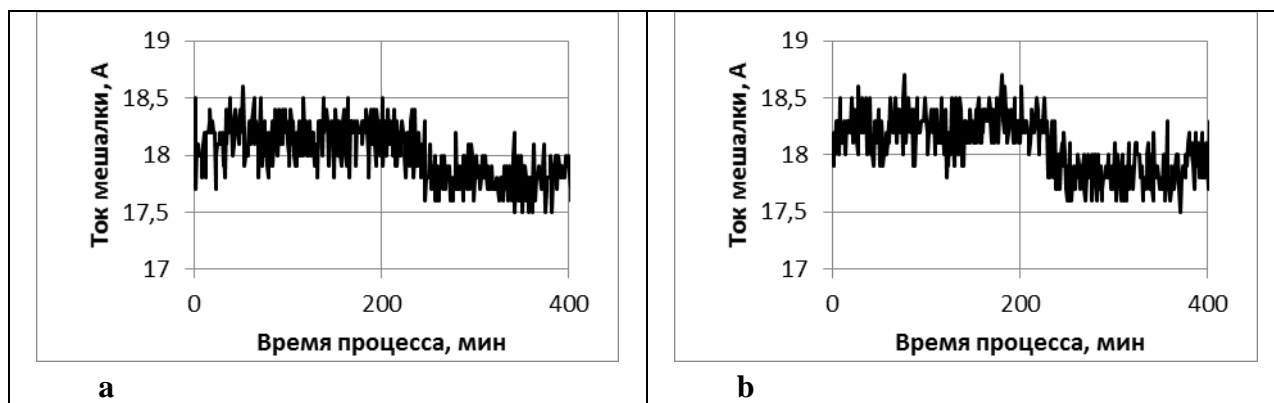


Рис. 1. Изменение во времени тока мешалки: а – 20.12.2010 и б – 21.12.2010

Fig. 1. Agitator current time variation: a – 20.12.2010 и б – 21.12.2010



Используем параметр самоорганизации в виде [31] для количественной меры оценки состояния процесса регуляции током мешалки:

$$P_c = \frac{\sum iQ_{D-}^i}{\sum iQ_{D-}^i + \sum iQ_{D+}^i} 100\% \quad (7)$$

В (7)  $\sum iQ_{D-}^i$  – суммарно взвешенное количество  $Q$  выявленных в анализируемом числовом ряде зарегистрированного сигнала моделей Дирихле  $i$ -ой размерности, имеющих отрицательное значение внешней (потока) энтропии, а  $\sum iQ_{D+}^i$  – суммарное взвешенное количество моделей Дирихле, имеющих положительное значение внешней энтропии.

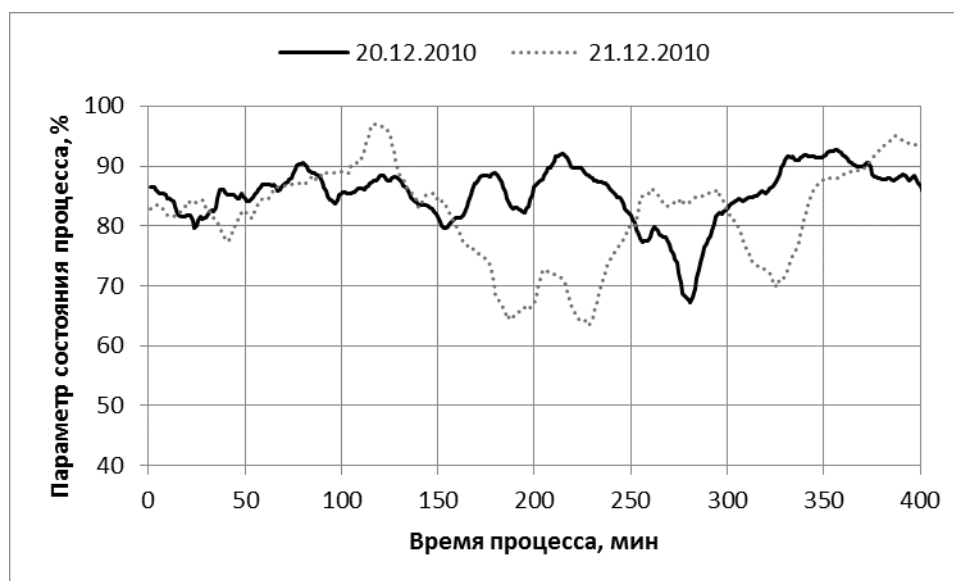


Рис. 2. Изменение во времени параметра состояния процесса регуляции тока мешалки

Fig. 2. Variation in time of the state parameter of agitator current regulation process

Средние значения параметра самоорганизации состояния процесса регуляции током мешалки (рис. 2) для периода наблюдения 20.12.2012 и 21.12.2012 составляют 85 и 82 % соответственно. Значения ТтестаExcel для указанных выборок равно 1.15326E-8. Последнее позволяет сделать вывод, что процесс управления током мешалки за период наблюдения 20.12.2012, обладая в среднем лучшей самоорганизацией, обладает лучшим качеством управления (регуляции).

### Статистический критерий оценки эффективности управления системами здравоохранения в условиях коронавирусной инфекции COVID-19

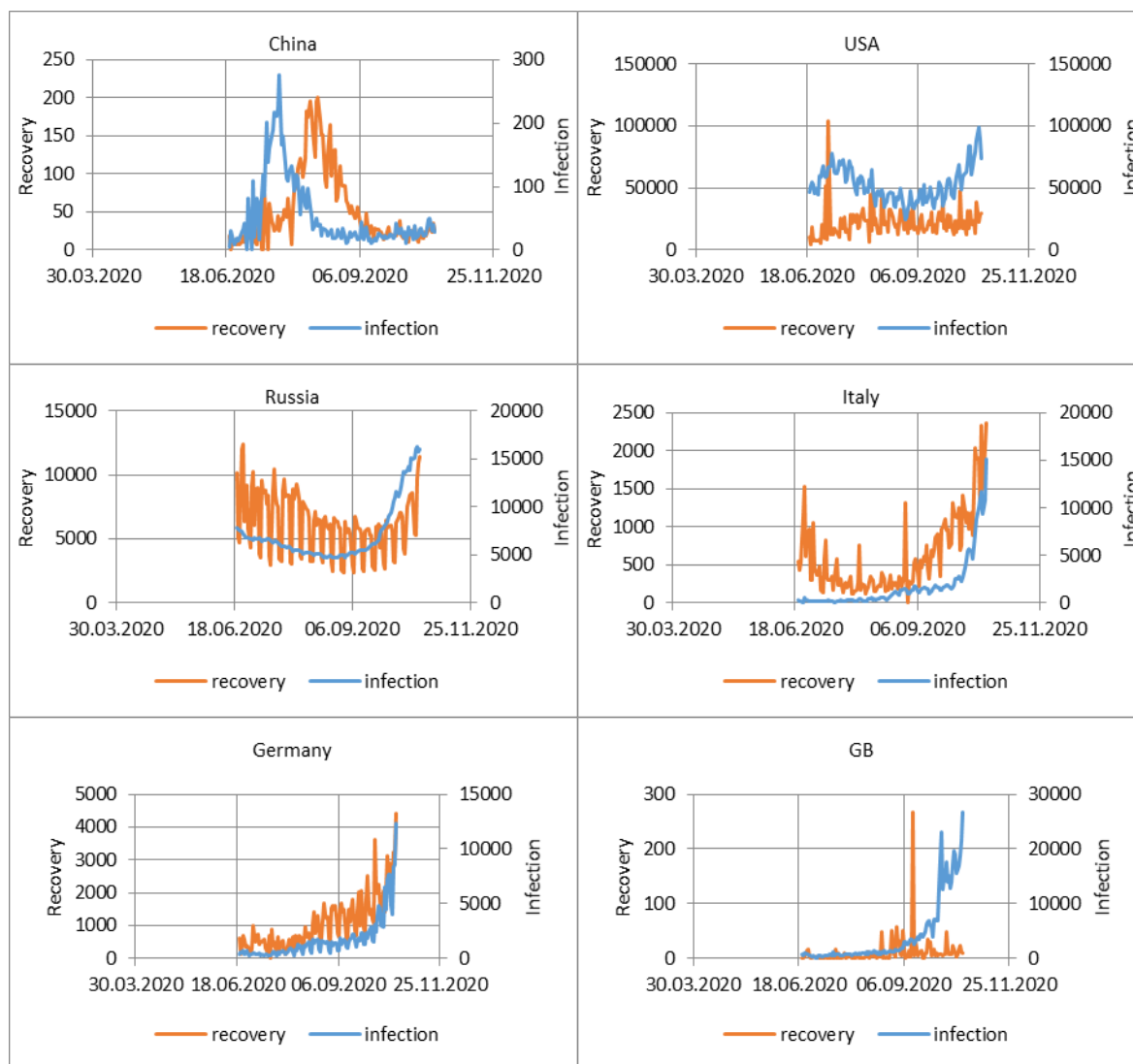
В качестве меры, характеризующей состояние анализируемых систем здравоохранения в условиях постоянно изменяющихся внешних и внутренних факторов в отличие от (7) был использован информационно-статистический показатель самоорганизации модифицированный для случая многопараметрических данных. Методически результат вычисления диагностического показателя самоорганизации состояния систем здравоохранения достигался тем, что временные ряды объема  $N$  значений, представленные совокупностью данных числа ежедневных выявленных заражений и числа выздоровлений, методом минимаксной нормализации приводились к одному диапазону изменения  $\{0-1\}$ . Полученные временные ряды  $N_{inf}$  и  $N_{rec}$  путем разбиения непрерывно скользящим методом на одно значение выборки объема  $m$  разбивались на последовательность выборок  $m_j$ , где  $j=1...N-m$ , каждая из которых

представлялась бета-распределением  $Be_j$ . В соответствии с правилами информационно-статистической теории в рамках методики [7,8] проводили свертку бета-распределений выборок одного индекса  $j$  рядов  $N_{inf}$  и  $N_{rec}$  к последовательности двумерных распределений Дирихле с вычислением значения внешней энтропии (6) при значении  $n = 3$ . Оценку значения показателя самоорганизации проводили по количеству  $Q$  распределений Дирихле в анализируемой выборке имеющих положительное  $Q_{D+}$  и отрицательное  $Q_{D-}$  значение внешней энтропии как

$$S_c = \frac{Q_{D-}}{Q_{D+} + Q_{D-}} * 100\% \quad (8)$$

Исследование динамики показателя самоорганизации проводили непрерывно-скользящим методом базовой выборки объема  $n = 100$  с анализом каждой из таких выборок как независимой при шаге смещения, равном единице.

Изменения исходных данных по числу ежедневных выявленных заражений (infection) и числу выздоровлений (recovery) за период с 20.06.2020 по 22.10.2020 представлен на рис. 3.



**Рис. 3. Характер изменения исходных данных по числу ежедневных выявленных заражений (infection) и числу выздоровлений (recovery) за период с 20.06.2020 по 22.10.2020**

**Fig. 3. Nature of change in the source data as per the number of daily detected infections (infection) and the number of recoveries (recovery) for the period from 20.06.2020 to 22.10.2020**

Характер изменения числа ежедневных выявленных заражений (infection) и числа выздоровлений (recovery) на периоде наблюдения имеет сложный вид. Этот факт является отражением различия в эффективности функционирования системы здравоохранения анализируемых стран что является следствием отличия в их организационных структурах. Результаты анализа временных рядов данных числа ежедневных выявленных заражений (infection) и числа выздоровлений (recovery) с 20.06.2020 по 22.10.2020 представлены на рис. 4-5, где в процентах по оси ординат показано значение показателя самоорганизации  $P_c$ .

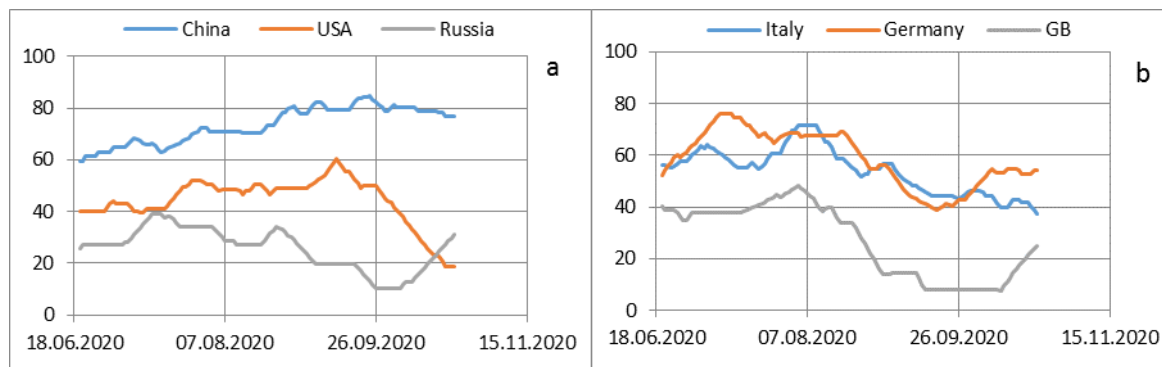


Рис. 4. Динамика показателя самоорганизации  $P_c$  а – Китая, Соединенных Штатов Америки и России; б - Италии, Германии и Великобритании в период с 20.06.2020 по 22.10.2020

Fig. 4. Dynamics of self-organization indicator  $P_c$  а – China, the United States of America and Russia; б - Italy, Germany and the United Kingdom, for the period from 20.06.2020 to 22.10.2020

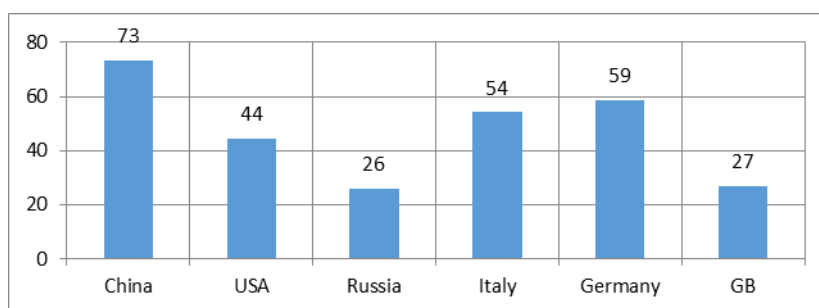


Рис. 5. Средние значения показателей самоорганизации  $P_c$  Китая, Соединенных Штатов Америки, России, Италии, Германии и Великобритании за период с 20.06.2020 по 22.10.2020

Fig. 5. Average values of self-organization indicators of  $P_c$  China, the United States of America, Russia, Italy, Germany and the United Kingdom for the period from 20.06.2020 to 22.10.2020

Графическое представление в виде временных рядов (рис. 4, 5) числа ежедневных выявленных заражений (infection) и числа выздоровлений (recovery) может служить интегральным показателем самоорганизации  $P_c$ . Такой подход в одномерной шкале позволяет сравнивать между собой системы здравоохранения Китая, США, России, Германии, Италии и Великобритании.

### Заключение

1. Распределение Дирихле может быть использовано для изучения процессов управления в многоуровневых и распределенных системах, основанных на критериях неравновесной термодинамики.
2. Предложенные интегральные критерии и алгоритмы оценки состояния процессов отображают эти значения в одномерную шкалу, тем самым обеспечивается единство оценочного алгоритма для различных систем и целевых состояний.
3. Значения интегральных параметров самоорганизации могут быть использованы в качестве оптимизирующих функционалов – критериев качества управления состояниями процесса  $P_c$  или системы  $S_c$ .

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021-2023 гг. по теме № 0030-2021-0025 и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-07-00914).*

### Библиографический список

1. **Колесников, А.А.** Синергетическая теория управления [Текст] / А.А. Колесников. – Таганрог: ТРПК, М.: Энергоатомиздат, 1994. – 334 с.
2. **Колесников, А.А.** Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза [Текст] / А.А. Колесников. – М.: Едиторал УРСС, 2005. – 228 с.
3. **Сахаров, Д.Е.** Принцип самоорганизации как основа построения «идеальной» системы управления [Текст] / Д.Е. Сахаров // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2011. № 8. С. 60-62.
4. **Куприянов, М.С.** Принципы построения технических самоорганизующихся систем [Текст] / М.С. Куприянов, А.В. Кочетков // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 8. С. 28-32.
5. **Летов, А.М.** Аналитическое конструирование регуляторов I [Текст] / А.М. Летов // Автоматика и телемеханика. 1960. Т. 21. № 4. С. 436-441.
6. **Летов, А.М.** Аналитическое конструирование регуляторов II [Текст] / А.М. Летов // Автоматика и телемеханика. 1960. Т. 21. № 5. С. 561-568.
7. **Летов, А.М.** Аналитическое конструирование регуляторов III [Текст] / А.М. Летов // Автоматика и телемеханика. 1960. Т. 21. № 6. С. 661-665.
8. **Летов, А.М.** Аналитическое конструирование регуляторов IV [Текст] / А.М. Летов // Автоматика и телемеханика. 1961. Т. 22. № 4. С. 425-435.
9. **Летов, А.М.** Аналитическое конструирование регуляторов. Дальнейшее развитие проблемы. V / Автоматика и телемеханика. 1962. Т. 23. № 11. С. 1405-1413.
10. **Kalman, R. E.** Contributions to the theory of optimal control [Text] / R. E. Kalman // Boletin de la Sociedad Matematica Mexicana. 1960. № 5. P. 102-119.
11. **Красовский, Н.Н.** Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование [Текст] / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1973. – 560 с.
12. **Атанс, М.М.** Оптимальное управление [Текст] / М.М. Атанс, П. Фабл. – М.: Машиностроение, 1968. – 764 с.
13. **Соколова, Э.С.** Анализ временных рядов технических параметров промышленных объектов / Э.С. Соколова, Д.А. Ляхманов // Труды НГТУ им Р.Е. Алексеева 2013 №2 (99), с.88-95
14. **Воронов, И. В.** Применение универсального семейства распределений Пирсона для аппроксимации распределения значений вектора псевдоградиента при совмещении изображений [Текст] / И.В. Воронов // Радиоэлектронная техника. 2015. № 2(8). С. 123-127.
15. **Карпов, И. Г.** Модернизация распределений Пирсона для аппроксимации экспериментальных распределений радиолокационных сигналов [Текст] / И. Г. Карпов, Е. А. Галкин // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2004. Т. 47, № 11. С. 5261.
16. **Лебедев, С. А.** Оценка рыночных рисков ценных бумаг на основе универсальных семейств распределений [Текст] / С.А. Лебедев // Сибирская финансовая школа. 2008. № 2 (67). С. 87-90.
17. **Игнатенко, В.И.** Применение распределений Джонсона и Пирсона в задачах технической экс-

- плуатации автомобилей [Текст] / В.И. Игнатенко // Сборник научных трудов конференции «Проблемы современной науки». – Липецк: Издательство ЛГТУ, 2016. С. 63-66.
18. **Mateus, A.** Fitting Johnson's SB Distribution to Forest Tree Diameter / A. Mateus, M. Tome // *Advances in Regression, Survival Analysis, Extreme Values, Markov Processes and Other Statistical Applications. Studies in Theoretical and Applied Statistics.* – Berlin: Springer-Verlag, 2013. Pp. 289-296.
  19. **Заикин, П.В.** Аппроксимация эмпирических функций полиномами высших порядков [Текст] / П.В. Заикин, М.А. Погореловский, В.С. Микшина // *Вестник кибернетики.* 2015. № 4. С. 129-134.
  20. **Губарев, В.В.** Идентификация эмпирических распределений [Текст] / В.В. Губарев // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета.* 2011. № 6(30). С. 205-215.
  21. **Серета, Ю. С.** Проблемы информационно-статистической теории [Текст] / Ю. С. Серета. – Н. Новгород: ООО Типография «Поволжье», 2007. – 356 с.
  22. **Шеннон, Р.** Имитационное моделирование – искусство и наука [Текст] / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 424 с.
  23. **Иляхинский, А.В.** Статистические модели в задачах зондирования [Текст] / А.В. Иляхинский, Ю.С. Серета // *Известия ВУЗов. Радиофизика.* 1989, Т. 32. № 12. С. 1502-1505.
  24. **Иляхинский, А.В.** О статистических моделях процессов, сопровождаемых сигналами акустической эмиссии [Текст] / А.В. Иляхинский, Ю.С. Серета // *Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций.* – Киев: Наукова думка, 1987. Вып. 5. С. 36-39.
  25. **Панин, В.Е.** Деформируемое твердое тело как нелинейная иерархически организованная система [Текст] / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин // *Физическая мезомеханика.* 2011. Т. 14. № 3. С. 7-26.
  26. **Пригожин, И.** Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур [Текст] / И. Пригожин, Д. Кондепуди. Пер. с англ. – М.: Мир, 2002. – 461 с.
  27. **Еу, В.С.** Generalized Thermodynamics: The Thermodynamics of Irreversible Processes and Generalized Hydrodynamics. // *Fundamental Theories of Physics.* Vol. 124. N. Y. e. a.: Kluwer Academic Publishers, 2004.
  28. **Николис Г.** Самоорганизация в неравновесных системах [Текст] / Г. Никорлис, И. Пригожин. – М.: Мир, 1979. 512 с.
  29. **Полак, Л.С.** Самоорганизация в неравновесных физико-химических процессах [Текст] / Л.С. Полак, А.С. Михайлов. – М.: Наука, 1975. – 351 с.
  30. **Пригожин, И.** Время, структура и флуктуации [Текст] / И. Пригожин // *Успехи физических наук.* 1980. Т. 131. Вып. 2. С. 185-207.
  31. **Ерофеев, В.И.** Распределение Дирихле как статистическая модель трибосистемы [Текст] / В.И. Ерофеев, А.В. Иляхинский, А.А. Хлыбов // *Труды НГТУ им Р.Е. Алексеева.* 2018. № 2 (99). С. 26-29.

*Дата поступления  
в редакцию: 21.01.2022*

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_54

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИКЛОННОГО ФИЛЬТРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ СИСТЕМ СПЕЦВОДООЧИСТКИ ЯЭУ

**С.М. Дмитриев**ORCID: 0000-0003-0637-7004 e-mail: [dmitriev@nntu.ru](mailto:dmitriev@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***А.Е. Соборнов**ORCID: 0000-0002-1146-3081 e-mail: [wisestjedi@mail.ru](mailto:wisestjedi@mail.ru)Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***Р.Р. Рязанов**ORCID: 0000-0002-8777-4337 e-mail: [ryazapov.renat@gmail.com](mailto:ryazapov.renat@gmail.com)Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***А.В. Мамаев**ORCID: 0000-0001-5951-0492 e-mail: [alks\\_may@mail.ru](mailto:alks_may@mail.ru)Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***А.В. Котин**ORCID: 0000-0001-8539-8158 e-mail: [an.kotin@yandex.ru](mailto:an.kotin@yandex.ru)Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***М.А. Легчанов**ORCID: 0000-0002-6195-3804 e-mail: [legchanov@nntu.ru](mailto:legchanov@nntu.ru)Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***М.В. Треушников**ORCID: 0000-0003-4791-3395 e-mail: [www.mor.ry@mail.ru](mailto:www.mor.ry@mail.ru)Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Представлены результаты численного моделирования гидродинамики фильтрующего аппарата, предназначенного для нужд энергетической отрасли. Конструкция фильтра предусматривает использование магнитного поля стационарных магнитов для осаждения железосодержащих примесей. Тангенциальный боковой вход

обеспечивает закрутку потока, что приводит к увеличению времени нахождения примесей в области фильтрации. Анализ сил, действующих на железосодержащие частицы размером 20 мкм, а также результаты численных расчетов позволили оценить эффективность влияния закрутки потока на время нахождения примесей в зоне фильтрации.

Установлено, что массовые и гидродинамические силы утрачивают преобладающее действие над магнитными при уменьшении размера ферромагнитных частиц. В результате превалирование магнитной силы позволяет повысить степень фильтрации рабочей среды. По итогам экспериментов установлено, что на эффективность фильтрации в основном влияет ее продолжительность, в меньшей степени – масса инжектируемой примеси.

**Ключевые слова:** закрутка потока, закрученное течение, фильтрующий аппарат, компьютерное моделирование, магнитное поле, постоянный магнит, ферромагнитная частица, магнитная сила, гидродинамические силы.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Дмитриев, С.М. Результаты экспериментального исследования и численного моделирования циклонного фильтра с постоянными магнитами для систем спецводоочистки ЯЭУ / С.М. Дмитриев, П.Е. Соборнов, Р.Р. Рязанов, А.В. Мамаев, А.В. Котин, М.А. Легчанов, М.В. Треушников // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 54-65. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_54

## **RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH AND NUMERICAL SIMULATION OF CYCLONE FILTER WITH PERMANENT MAGNETS FOR NPP SPECIAL WATER TREATMENT SYSTEMS**

**S.M. Dmitriev**

ORCID: **0000-0003-0637-7004** e-mail: **dmitriev@nntu.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.E. Sobornov**

ORCID: **0000-0002-1146-3081** e-mail: **wisestjedi@mail.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**R.R. Ryazapov**

ORCID: **0000-0002-8777-4337** e-mail: **ryazapov.renat@gmail.com**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.V. Mamayev**

ORCID: **0000-0001-5951-0492** e-mail: **alks\_may@mail.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.V. Kotin**

ORCID: **0000-0001-8539-8158** e-mail: **an.kotin@yandex.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**M.A. Legchanov**

ORCID: **0000-0002-6195-3804** e-mail: **legchanov@nntu.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**M.V. Treushnikov**

ORCID: **0000-0003-4791-3395** e-mail: **www.mor.ry@mail.ru**

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

**Abstract.** Results of numerical simulation of hydrodynamics of filter apparatus designed for the energy industry needs, are presented. Filter design provides for the use of magnetic field of stationary magnets for deposition of iron-containing impurities. Tangential side input provides a twist of flow, which leads to an increase in time of impurities being in the filtration area. Analysis of forces acting on iron-containing particles with a size of 20 microns, as well as the results of numerical calculations, allowed to evaluate the effectiveness of flow twist influence on time of impurities being in the filtration area.

It is found that mass and hydrodynamic forces lose their predominant effect over magnetic ones when the size of ferromagnetic particles decreases. As a result, predominance of the magnetic force makes it possible to increase the degree of filtration of the working medium. According to the results of experiments, it was found that the filtration efficiency is mainly affected by its duration, and to a lesser extent by the mass of the injected impurity.

**Key words:** twist of flow, swirling flow, filtering apparatus, computer simulation, magnetic field, permanent magnet, ferromagnetic particle, magnetic force, hydrodynamic forces.

**FOR CITATION:** S.M. Dmitriev, P.E. Sobornov, R.R. Ryazapov, A.V. Mamaev, A.V. Kotin, M.A. Legchanov, M.V. Treushnikov. Results of experimental research and numerical simulation of cyclone filter with permanent magnets for NPP special water treatment systems. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 3. Pp. 54-65.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_54

## Введение

Рабочие жидкости, обеспечивающие выполнение технологических процессов на объектах ядерной энергетики, содержат различного рода примеси, значительную часть которых составляют ферромагнитные соединения. Причиной их появления являются, в основном, коррозионные и эрозионные процессы в материале элементов теплообменного оборудования. Присутствие соединений железа в теплоносителе оказывает негативное влияние на надежность и долговечность работы энергетической установки [1-3]. Таким образом, важной задачей современной ядерной отрасли является контроль и поддержание чистоты теплоносителя для обеспечения длительной безаварийной работы ЯЭУ.

Железосодержащие примеси подвержены воздействию магнитного поля, что проявляется в изменении траектории частиц и их дальнейшему осаждению. Поэтому для фильтрации целесообразно использовать аппараты с магнитной системой. Она может быть выполнена на базе постоянных магнитов либо электромагнитов. Однако аппараты с постоянными магнитами имеют ряд преимуществ, обуславливающих их широкое использование в атомной промышленности: лучшие массогабаритные характеристики, возможность использования в агрессивных и потенциально взрывоопасных средах [4-11]. Однако недостаточная напряженность поля постоянных магнитов в области фильтрации требует проработки проточной части аппарата. Устранение данного недостатка может быть достигнуто за счет тангенциального входа потока фильтруемой жидкости. Такая конструкция аппарата позволит образовать застойные области в результате закрутки потока среды, тем самым обеспечив длительное удержание соединений железа в магнитном поле.

## Описание конструкции и принципа действия фильтра

Разработка фильтрующего аппарата, основанного на действии магнитного поля и закрутке фильтруемой среды, проводилась в лаборатории «Парогенерирующие системы» кафедры «Атомные и тепловые станции» НГТУ им. Р.Е. Алексеева [13-14]. Общий вид фильтра представлен на рис. 1.



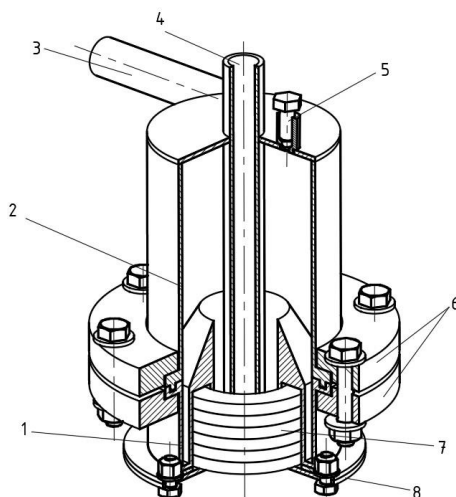


Рис. 1. Магнитогидродинамический фильтр (ФМГ)

Fig. 1. Magneto-hydrodynamic filter (MHF)

Конструкция фильтра включает: нижнюю часть корпуса (1), верхнюю часть корпуса (2), трубки для подвода (3) и отвода (4) фильтруемой среды. Закрутка потока создается за счет тангенциального подвода жидкости. В составе фильтра предусмотрен воздухоотводчик (5) в верхней части корпуса; главное разъемное соединение – типа «шип-паз», с накладными фланцами (6); материал прокладок – фторопласт. В данной конструкции стало возможным существенно увеличить срок службы постоянных магнитов (7) за счет исключения их прямого контакта с рабочей средой. Используются высококоэрцитивные магниты NdBFe с аксиальной намагниченностью. Магнитная система фиксируется в нижней части фильтра с помощью специальной крышки (8). Для очистки и промывки фильтра необходимо извлечь магнитную систему из корпуса с его последующей разгерметизацией.

Во время работы фильтра за счет закрутки потока основной объем примесей направляется в нижнюю часть фильтра, где в специально сформированной застойной области, ферромагнитные частицы подвергаются воздействию магнитного поля. Также за счет закрутки потока увеличивается время нахождения примесей в магнитном поле, что повышает эффективность магнитного воздействия на легкие частицы. Описанные физические процессы во многом определяются соотношением сил, действующих на частицы примеси. Центробежная сила преобладает над силами лобового сопротивления и тяжести. В застойной области скорость потока стремится к нулю и гидродинамические силы, которые перемещают частицы, становятся не существенными. В результате поток поступает в зону, соответствующую размещению магнитной системы. Магнитные силы здесь в несколько раз превышают силу тяжести и становятся непреодолимы для ферромагнитных частиц.

На стадии проектирования проточной части производилась оценка эффективности описанных процессов посредством расчета величин сил, действующих на частицу со стороны потока и магнитного поля. В общем случае второй закон Ньютона, записанный для частицы в потоке фильтруемой среды, выглядит следующим образом:

$$m_p \frac{\partial V_p}{\partial t} = F_{вн} + F_{лс} + F_{пр} + F_d + F_b + F_{mag} + F_M, \quad (1)$$

где  $m_p$  – масса частицы;  $V_p$  – скорость взвешенной твердой частицы;  $F_{вн}$  – внешние массовые силы;  $F_{лс}$  – сила лобового сопротивления;  $F_{пр}$  – эффект присоединенной массы шара на половину массы вытесненной им среды;  $F_d$  – сила, связанная с градиентом давления в жидкости, окружающей частицу;  $F_b$  – сила Бассе, которая характеризует мгновенное гидродина-

мическое сопротивление, возникающее при большом ускорении;  $F_{\text{Маг}}$  – сила Магнуса;  $F_M$  – магнитная сила.

Из приведенных сил лишь некоторые оказывают ощутимое влияние на траекторию движения частицы в расчетной области. Силой Бассе можно пренебречь в следствие отсутствия скольжения фаз, а сила Магнуса в сравнении с силой лобового сопротивления пренебрежительно мала. В результате имеет смысл учитывать лишь три силы, количественное значение которых сравнимо с магнитной. На следующем этапе определялись модули сил, действующих на частицу. Во всех экспериментах использовалась фракция примеси ПЖВ 2.160.26 по ГОСТ 9849-86. Для большей точности расчетов была проведена оценка диапазона размеров частиц, встречающихся в примеси. Контроль размеров частиц был выполнен с помощью электронного микроскопа 107 Xsz-107bn Microscope. Установлено, что размер частиц находился в диапазоне от 10 до 150 мкм. Расчет сил проведен для частиц 10, 50, 100, 150 мкм. Результаты расчета сил лобового сопротивления, массовых сил и силы, возникающей за счет градиента давления, приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты расчета гидродинамических сил, действующих на частицу

Table 1.

Results of calculation of hydrodynamic forces acting on a particle

Расчетная величина	Размеры частиц			
	$d_p = 10$ мкм	$d_p = 50$ мкм	$d_p = 100$ мкм	$d_p = 150$ мкм
$F_{\text{лс}}, \text{Н}$	$2,96 \cdot 10^{-8}$	$2,13 \cdot 10^{-7}$	$5,43 \cdot 10^{-7}$	$9,61 \cdot 10^{-7}$
$F_{\text{вн}}, \text{Н}$	$3,49 \cdot 10^{-11}$	$4,37 \cdot 10^{-9}$	$3,49 \cdot 10^{-8}$	$1,18 \cdot 10^{-7}$
$F_{\text{д}}, \text{Н}$	$6,02 \cdot 10^{-10}$	$7,52 \cdot 10^{-8}$	$6,02 \cdot 10^{-7}$	$2,03 \cdot 10^{-6}$

Сила, с которой магнитное поле постоянного магнита притягивает к себе ферромагнитные частицы, описывается следующим уравнением:

$$\vec{F}_M = \frac{1}{2} \oint (\vec{H} (\vec{n} \cdot \vec{B}) + \vec{B} (\vec{n} \cdot \vec{H}) - \vec{n} (\vec{H} \cdot \vec{B})) \partial s, \quad (2)$$

где  $\vec{B}$  – индукция магнитного поля;  $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля;  $\vec{n}$  – единичный вектор внешней нормали к поверхности.

Данное уравнение рационально решать с помощью численным методов. Для этого с помощью современных программ твердотельного моделирования была создана трехмерная модель исследуемой области (рис. 2). На ее основе создана конечно-элементная модель.

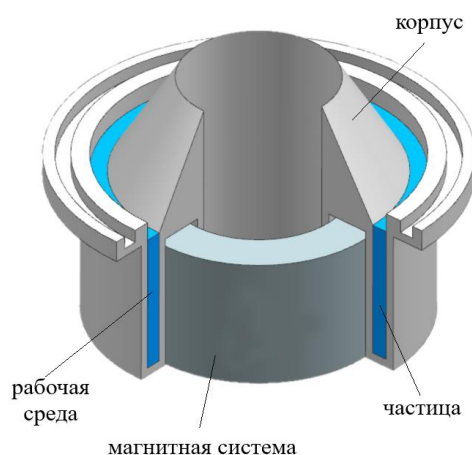


Рис. 2. Расчетная область

Fig. 2. Computational region

В области, где расположена частица, произведено сгущение сетки с целью повышения качества разрешения протекающих физических процессов. Размер сеточного элемента в этой области не превышает 0,15 мм. В результате проведен расчет силы действующей на частицу примеси на заданном расстоянии от внешней поверхности магнита. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Расчетная величина магнитной силы, действующей на частицу

Table 2.

Calculated value of magnetic force acting on a particle

Расчетная величина	Размеры частиц			
	$d_p = 10$ мкм	$d_p = 50$ мкм	$d_p = 100$ мкм	$d_p = 150$ мкм
$F_M, Н$	$3,56 \cdot 10^{-6}$	$2,65 \cdot 10^{-5}$	$8,32 \cdot 10^{-5}$	$2,0186 \cdot 10^{-4}$

Упростив уравнение (1) за счет исключения сил, величина которых значительно меньше магнитной, запишем условие удержания частиц магнитным полем:

$$\vec{F}_M \gg \vec{F}_{вн} + \vec{F}_{лс} + \vec{F}_g \quad (3)$$

Для всего диапазона размеров частиц величина магнитной силы превосходит на несколько порядков суммарную гидродинамическую силу. Данный факт подтверждает эффективность применения данного фильтра для очистки сред, содержащих ферромагнитные примеси. Использование современных *Computational Fluid Dynamics (CFD)* программ позволяет численно определить величину гидравлического сопротивления фильтра и получить траектории движения частиц. CFD-программы и комплексы позволяют в значительной степени ускорить проектирование нового оборудования, а в комплексе с экспериментальными исследованиями позволяет оптимизировать проточную часть фильтра. В качестве инструмента CFD-анализа был выбран *Ansys Fluent*. Для моделирования движения среды в данном случае применима модель напряжений Рейнольдса: *Reynolds stress model (RSM)*. При данном подходе турбулентные напряжения в потоке имеют нелинейную связь с компонентами скорости, что позволяет получить более точное распределение скорости в пограничном слое жидкости. Класс RSM моделей турбулентности является одним из самых прецизионных среди RANS моделей. Конечно-элементная модель состоит из гексаэдрических элементов с призматическими слоями, общее число элементов размером менее 0,8 мм – 5,2 млн, число расчетных узлов – 2,45 млн (рис. 3а). На рис. 3б представлены линии тока среды во внутренней части фильтра.

Анализ поля скорости позволил подтвердить, что скорость в застойной области стремится к 0, что, в свою очередь, повышает вероятность осаждения примесей. При низкой скорости действие гидродинамических сил невелико, и постоянно действующая магнитная сила задерживает частицы в данной области. Однако часть потока среды избегает попадания в застойную область, проходя вдоль центральной трубы в нижнюю центральную часть фильтра. Вместе с этим потоком стремятся покинуть фильтр и частицы примеси. Проходя через нижнюю часть, поток среды разворачивается на 180°, что способствует осаждению частиц на дне фильтра. Здесь также велико действие магнитного поля, так как данная область незначительно удалена от магнитной системы. Наличие областей с пониженным давлением приводит к росту величины гидравлического сопротивления фильтра. Поэтому в ходе расчета определен перепад давления на чистом и «грязном» фильтре. При объемном расходе 0,33 л/с разность величины перепадов составила 25 кПа. Малое отличие величин требуемого давления на прокачку теплоносителя через полный и пустой фильтр является еще одним преимуществом предложенной конструкции.

Расчет траектории частиц в проточной части фильтра стало одной из задач использования CFD-подхода в данной работе. Визуализация движения частиц с учетом действия гидродинамических сил позволяет качественно и количественно оценить процесс фильтрации

примесей различной фракции. Численное решение выполнено в *Ansys Fluent* с применением специальной расчетной модели – DPM. При этом подходе осуществляется решение уравнения движения в Лагранжевых координатах при уже известном поле скорости среды. В рамках подхода могут быть рассмотрены частицы различной формы (сферы, пузырька, капли или твердой частицы). Закон распределения частиц внутри потока среды также может быть задан уравнением. В ходе исследований произведен расчет траекторий сферических частиц размером 10, 50, 100 и 150 мкм. Результаты представлены на рис. 4.

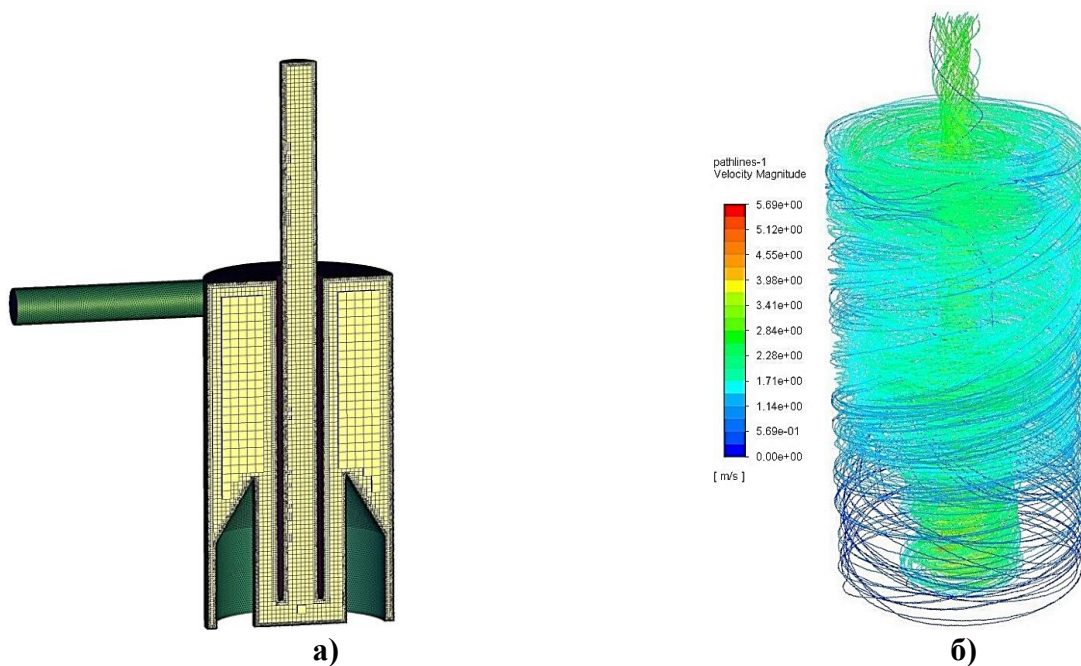
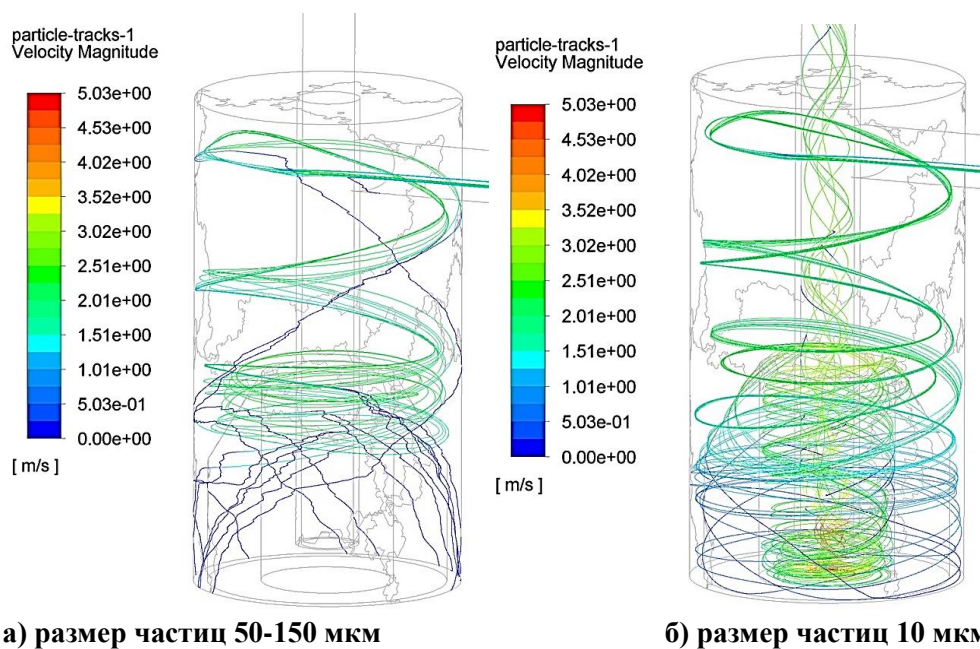


Рис. 3. Расчетная сетка

Fig. 3. Computational grid



а) размер частиц 50-150 мкм

б) размер частиц 10 мкм

Рис. 4. Траектории движения частиц

Fig. 4. Particle trajectories

Для частиц размерами 50-150 мкм характерным является практически моментальное смещение к стенкам фильтра после входа во внутренне пространство. Далее подавляющая часть таких частиц осаждается в застойной области. В дальнейшем гидродинамические силы уже не могут «поднять» эти частицы и поэтому эффективность удержания таких частиц стремится к 100 %. Из рис. 4б становится очевидно, что при значительно меньших размерах частиц, они увлекаются потоком и покидают застойную область проточной части. Количественный анализ показал, что в среднем 20 % инжестрированных частиц покидают фильтр. Такой эффект объясняется низкой инерционностью частиц малого размера. Массовые силы в таком случае значительно меньше гидродинамических и не способны удержать такую частицу в застойной области, или в областях с поворотом потока. Линии тока на рис. 4б подтверждают, что значительная часть потока частиц минует зону осаждения. Несмотря на то, что в застойной области под выходной трубкой происходит поворот потока, легкие частицы все же увлекаются потоком среды наверх, на выход из фильтра.

### Описание экспериментальной установки

Исследовательский стенд для оценки эффективности фильтрации представляет собой замкнутый гидравлический контур, включающий центробежный насос, запорно-регулирующую арматуру, контрольно-измерительную аппаратуру (рис. 5).

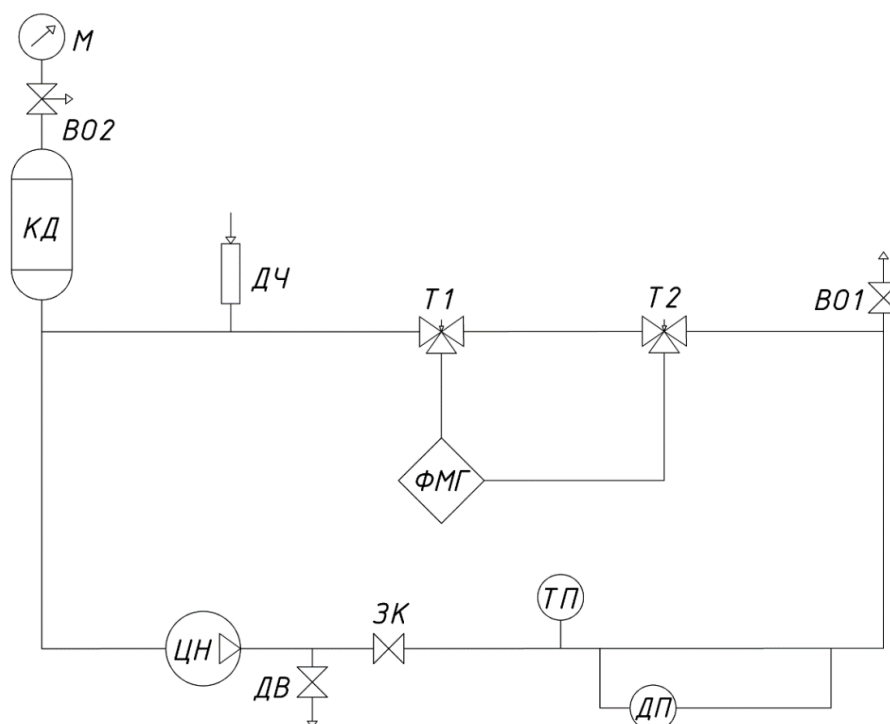


Рис. 5. Гидравлическая схема экспериментального стенда:

ФМГ – магнито-гидродинамический фильтр; ЦН – центробежный насос;  
ЗК – запорно-регулирующий клапан; Т1, Т2 – трехходовой шаровый кран; ДВ – вентиль дренажа;  
КД – компенсатор давления; ВО1, ВО2 – воздухоотводчики; ТП – термоэлектрический преобразователь; ДП – дифференциальный преобразователь давления;  
М – манометр; ДЧ – дозатор частиц

Fig. 5. Hydraulic scheme of the experimental stand:

MHF – magneto-hydrodynamic filter; CP – centrifugal pump;  
SCV – shut-off and control valve; T1, T2 – three-way ball valve; DV – drainage valve;  
PC – pressure compensator; VO1, VO2 – air vents; TC – thermoelectric converter;  
DP – differential pressure converter; PG – pressure gauge; PD – particle dispenser

Для предотвращения нежелательных процессов коррозии, способных негативно повлиять на результаты испытаний, контур был изготовлен из нержавеющей стали аустенитного класса 12X18H10T, а в качестве фильтруемой среды использовалась дистиллированная вода ГОСТ 6709-72. Стенд предусматривает установку внешних кольцевых электронагревателей и имеет в составе компенсатор давления для компенсации температурных расширений жидкости. Фильтр включен в состав стенда с помощью трехходовых шаровых кранов, позволяющих организовывать циркуляцию фильтруемой жидкости как через фильтр, так и по обводному участку. Дозатор частиц предназначен для ввода в контур контрольной массы ферромагнитных примесей.

### Метрологическое обеспечение испытаний

Измерение расхода осуществляется по перепаду давления на прямом участке трубы посредством датчика EJX110A. Длина участка между отборами давления составила 1700 мм. Выбор данного подхода обусловлен ограничениями, накладываемыми условиями эксперимента. Применение сужающих устройств неприемлемо ввиду создания механического препятствия свободному прохождению примесей, а использование турбинных преобразователей – ввиду наличия в их конструкции элементов, использующих магнитное поле. Измерение температуры осуществлялось термоэлектрическим преобразователем КТХА 02.01-064-К1-И-С321-1-500\2000. Измерение контрольной массы вводимых в контур ферромагнитных примесей проводилось по аналогии с [14]. Погрешность измеряемых величин не превысила 2 %.

### Методика проведения экспериментальных исследований

К основным этапам эксперимента следует отнести: определение чистоты фильтра после регенерации; испытания фильтрующей способности без установленной магнитной системы; испытания фильтрующей способности с установленной магнитной системой; определение массы примесей, оставшихся в результате промывки контура, после экспериментов с фильтром, и массы частиц оставшейся в фильтре после регенерации. Время прохождения фильтруемой среды по контуру определяется следующим образом:

$$\tau = \frac{V_{\text{осн.к}}}{G} \quad (4)$$

где  $G$  – расход жидкости;  $V_{\text{осн.к}}$  – объем трубопроводов основного контура, исключаяющего петлю с подключенным фильтром.

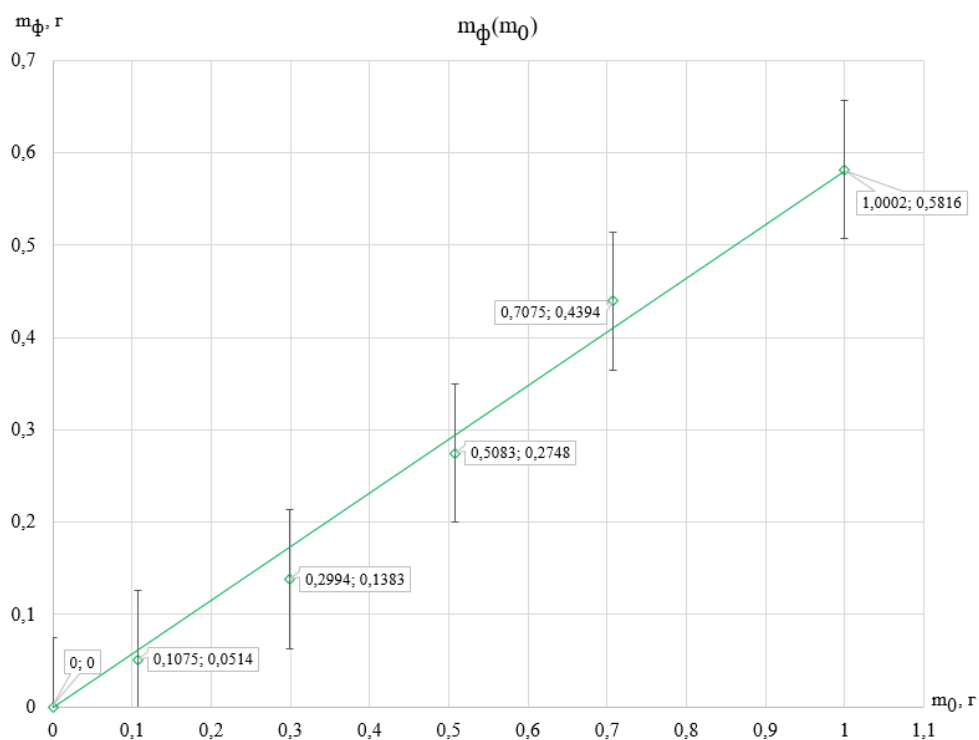
Время одного прохода рабочей среды по контуру на режиме, характеризующемся максимальной скоростью, составляет 3,36 с. Диапазон регулирования расхода составил от 0 до 38 л/мин с шагом 6,5 л/мин. Время фильтрации различно и определяется кратностью прохода жидкости по замкнутому контуру:

$$t = \tau \cdot N \quad (5)$$

где  $N$  – количество прохождений жидкости по контуру. Величина  $N$  различна для разных экспериментов и принимает значения в диапазоне 20-1000. Масса вводимых в контур примесей в ходе эксперимента варьируется от 0,1 до 1 г. Таким образом, зная объем всего контура и массу вводимых частиц, нетрудно рассчитать их концентрацию, которая составила от 45 до 456 г/м<sup>3</sup>. Степень фильтрации  $\epsilon$  разработанного фильтра оценена по методике [14].

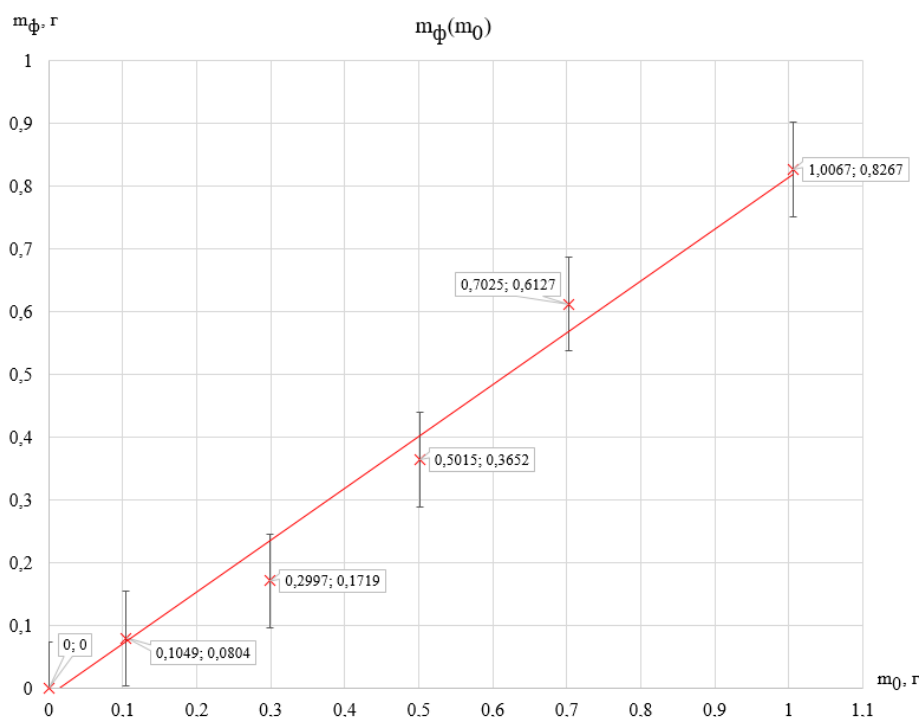
### Результаты экспериментальных исследований

В ходе обработки результатов исследования рассмотрим зависимость отфильтрованной массы примеси ( $m_f$ ) от исходной ( $m_0$ ), инжектируемой в контур. Для рассматриваемого фильтра без магнитной системы имеем результат, приведенный на рис. 6.



**Рис. 6. Зависимость отфильтрованной массы от инжектируемой для фильтра без магнитной системы**

**Fig. 6. Dependence of the filtered mass on the mass injected for the filter without a magnetic system**



**Рис. 7. Зависимость отфильтрованной массы от инжектируемой для фильтра с установленной магнитной системой**

**Fig. 7. Dependence of the filtered mass on the mass injected for the filter with a magnetic system installed**

Аппроксимирующая значения кривая имеет вид линейной функции:

$$m_{\phi} = 0,5801 \cdot m_0 \quad (6)$$

Фильтрующая способность фильтра без магнитной системы не изменяется в зависимости от увеличения массы инжектируемой примеси. Степень фильтрации в среднем составляет 53,7 %. При рассмотрении той же зависимости, полученной на фильтре с установленной магнитной системой, имеем данные, аппроксимируемые кривой (рис. 7):

$$m_{\phi} = 0,8239 \cdot m_0 - 0,01 \quad (7)$$

Фильтрующая способность фильтра с установленной магнитной системой также не меняется в зависимости от увеличения массы инжектируемой примеси, однако степень фильтрации существенно выше и составляет в среднем 75,22 %.

Из рассмотрения зависимости массы отфильтрованной примеси от времени и числа проходов (рис. 8), следует, что зависимость фильтрующей способности от времени выражается логарифмическим законом, а именно: для фильтра без магнитной системы:

$$m_{\phi} = 0,0565 \cdot \ln(m_0) + 0,3756 \quad (8)$$

для фильтра с установленной магнитной системой:

$$m_{\phi} = 0,0759 \cdot \ln(m_0) + 0,4342 \quad (9)$$

В результате анализа полученных экспериментальных данных нетрудно видеть, что эффективность фильтрации с установленной магнитной системой выше, чем без нее. Величина  $\epsilon$  достигает 94 %, тогда как степень фильтрации без магнитной системы не превышает 80 %.

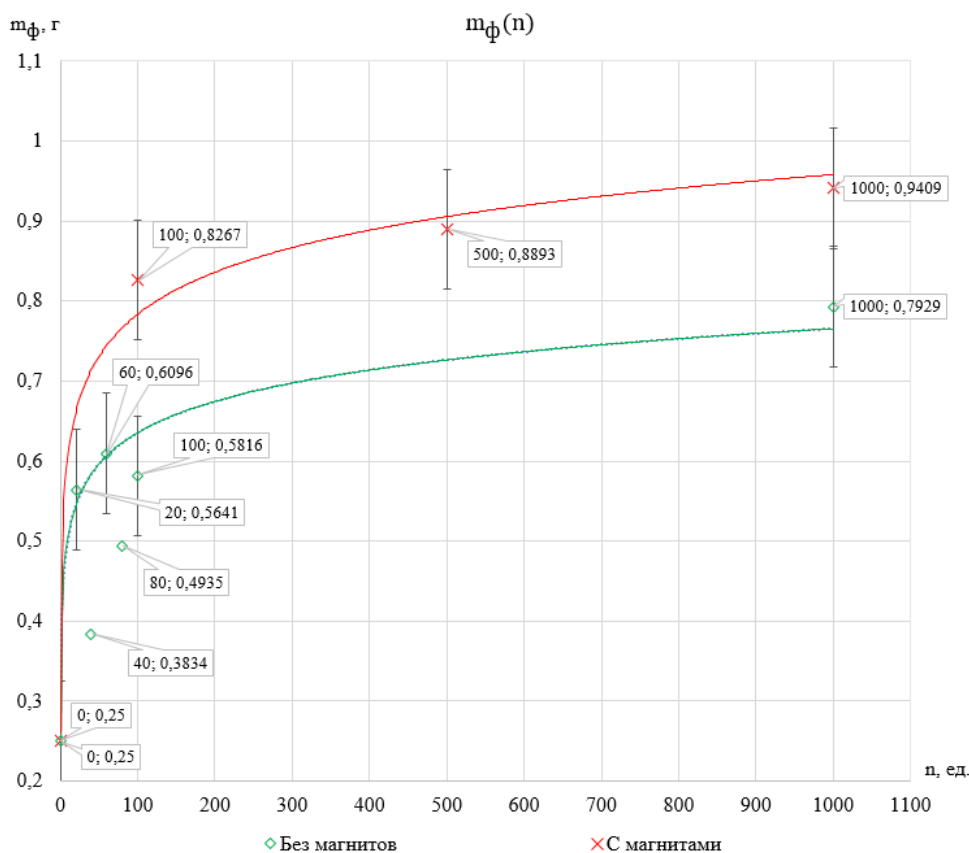


Рис. 8. Зависимость отфильтрованной массы от времени/количества проходов

Fig. 8. Dependence of the filtered mass on time /number of passes



### Заключение

Проведенные исследования подтверждают не только работоспособность фильтра представленной конструкции, но и предположение о том, что степень фильтрации данного фильтра не зависит массы примеси, а является функцией времени фильтрации (числа полных проходов среды через фильтр). Необходимо отметить способность фильтра улавливать фракцию ферромагнитной примеси величиной 15 мкм и менее, которая либо трудно-, либо вовсе неуловима циклонами и прочими гидродинамическими фильтрами. Эффективность циклонного фильтра с магнитной системой до 20 % выше, чем без установленной магнитной системы. Таким образом, магнитная система необходима в фильтрующих устройствах, которые применяются в контурах высокой чистоты, где недопустимо содержание ферромагнитных примесей с фракцией менее 40 мкм в рабочей среде, что весьма актуально для контуров и систем энергоустановок.

### Библиографический список

1. **Сандуляк, А.А.** Совершенствование режимов и систем магнитной очистки технологических сред для предупреждения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации энергетического оборудования: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.02. – Москва, 2005 – 127 с.
2. **Гусев, Б.А.** Разработка и совершенствование технологий очистки контуров ЯЭУ с водяным теплоносителем от продуктов коррозии: дис. ... д. техн. наук: 05.14.03. – Научно-исследовательский технологический институт имени А.П. Александрова, СПб., 2014 – 193 с.
3. **Сандуляк, А.В.** Магнитофильтрационная очистка жидкостей и газов / А.В. Сандуляк – М.: Химия, 1988. – 136 с.
4. **Антонов, С.Н.** Аппараты магнитной обработки воды. Проектирование, моделирование и исследование / С.Н. Антонов, А.И. Адошев, И.К. Шарипов, В.Н. Шемякин. – Ставрополь: АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2014. – 220 с.
5. Пат. RU2429045C1. Электромагнитный фильтр / А.А. Цынаева, Д.А. Генералов, А.В. Прохоров, А.С. Долгов, 2011.
6. Пат. RU2206371C2. Электромагнитный фильтр осадитель / А.И. Елшин, Н.Е. Киреев, 2003.
7. Пат. RU2160148C1. Магнитный фильтр / Ю.В. Данченко, 2000.
8. Пат. RU2203124C1. Высокоградиентный магнитный фильтр / Б.А. Гусев, Л.Л. Чилипенко, Е.П. Козлов и др., 2003.
9. Пат. RU2360740C1. Высокоградиентный магнитный фильтр / Б.А. Гусев, Д.А. Кирпиков, 2009.
10. **Федорова, Н.Н.** Основы работы в ANSYS 17 / Н.Н. Федорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. – М.: ДМК Пресс 2017. – 210 с.
11. **Гусев, Б.А.** Численное моделирование процесса высокоградиентной фильтрации / Б.А. Гусев, В.Г. Семенов, В.В. Панчук // Журнал технической физики. 2016. Том 86. Вып. 9. С. 13-19.
12. **Соборнов, А.Е.** Определение гидравлических характеристики элементов теплообменного оборудования ЯЭУ с помощью ANSYS CFD 14.0: методические указания / А.Е. Соборнов, Р.Р. Рязанов, А.В. Мамаев, А.Е. Хробостов, М.А. Легчанов. – Н. Новгород: НГТУ, 2017. – 46 с.
13. Патент RU197879U1. Магнито-гидродинамический фильтр / Дмитриев С.М., Треушников М.В., Соборнов А.Е. и др., 2020.
14. **Треушников, М.В.** Расчетно-экспериментальное исследование магнитных фильтров на постоянных магнитах применительно к контурам водо-водяных РУ / М.В. Треушников, Р.Р. Рязанов, А.Е. Соборнов, А.В. Мамаев, А.В. Котин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 1(128). С. 86-95.

*Дата поступления  
в редакцию: 30.11.2021*

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_66

## О ВЛИЯНИИ МЕТЕОУСЛОВИЙ НА ПОДВИЖНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА И РАСПОЛОЖЕНИЯ ДОРОЖНЫХ МЕТЕОСТАНЦИЙ

**М.Е. Елисеев**ORCID: 0000-0002-8522-899X e-mail: [eliseevmic@mail.ru](mailto:eliseevmic@mail.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***М.Г. Корчажкин**ORCID: 0000-0003-0989-9000 e-mail: [kormg@list.ru](mailto:kormg@list.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия***И.Н. Елисеева**ORCID: 0000-0002-7141-0707 e-mail: [eliseevair@mail.ru](mailto:eliseevair@mail.ru)Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Рассмотрено влияние метеоусловий на подвижность транспортных средств. Важным фактором, существенно влияющим на подвижность транспортных средств и безопасность дорожного движения, является количество осадков в виде снега, выпавших в зимний период. Предлагается подход к вычислению необходимого количества дорожных метеостанций для крупного города и анализируются принципы их расположения. В качестве основных факторов предлагаются: рельеф местности, величины транспортных потоков, места концентрации аварий с сопутствующими погодными факторами, равномерность покрытия метеостанциями территории города. Дается пример применения теории для г. Нижний Новгород. Его важной географической особенностью является расположение его территории на разных берегах р. Ока, при этом рельефы правобережной и левобережной частей значительно отличаются. Итоговый вариант расположения метеостанций планируется использовать при проектировании интеллектуальной транспортной системы Нижнего Новгорода.

**Ключевые слова:** подвижность транспортных средств, дорожная метеостанция, снег, безопасность дорожного движения, ИТС.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Елисеев, М.Е. О влиянии на подвижность транспортных средств метеоусловий и определении оптимального количества и расположения дорожных метеостанций / М.Е. Елисеев, М.Г. Корчажкин, И.Н. Елисеева // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 66-74.  
DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_66

## ABOUT THE IMPACT OF WEATHER CONDITIONS ON MOBILITY OF VEHICLES, AND DETERMINATION OF THE OPTIMAL NUMBER AND LOCATION OF ROAD WEATHER STATIONS

**M.E. Eliseev**ORCID: 0000-0002-8522-899X e-mail: [eliseevmic@mail.ru](mailto:eliseevmic@mail.ru)Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**M.G. Korchazhkin**

ORCID: **0000-0002-8522-899X** e-mail: **kormg@list.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**I.N. Eliseeva**

ORCID: **0000-0002-7141-0707** e-mail: **eliseevair@mail.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Impact of weather conditions on mobility of vehicles is considered. Approach to calculation of the required number of road weather stations for a big city is proposed, and principles of their location are analyzed. Terrain, ratings of traffic streams, accidents concentration spots with accompanying weather factors, uniformity of coverage of the city territory by weather stations, are proposed as the main factors affecting the location of road weather stations. Example of the theory application for the city of Nizhny Novgorod is given.

**Key words:** mobility of vehicles, road weather station, snow, road safety, ETS.

**FOR CITATION:** M.E. Eliseev, M.G. Korchazhkin, I.N. Eliseeva. About the impact of weather conditions on mobility of vehicles, and determination of the optimal number and location of road weather stations. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 2. Pp. 66-74. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_66

## Введение

В соответствии с [1], подвижность – это интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин, определяющее их способность выполнять поставленные задачи с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины. Это подразумевает адаптивность машины к внешним условиям, в числе которых, безусловно, рассматриваются состояние дорожного полотна, условия видимости и т.д. Для повышения подвижности одной из важных задач является выбор оптимального режима движения. В работах [2-5] рассматривается влияние снежного покрова на подвижность транспортных средств (ТС). В частности, в [2] даются формулы расчета проходимости и эффективности машин в зависимости от глубины и плотности снега.

При передвижении по дорогам крупного города метеоусловия также существенным образом влияют на подвижность и безопасность: так, в [6] устанавливается связь между метеоусловиями и количеством дорожно-транспортных происшествий (ДТП).

Во многих городах России в настоящее время внедряются интеллектуальные транспортные системы (ИТС), основной задачей которых является управление транспортным процессом. Для выбора управляющего воздействия, с целью повышения подвижности ТС, необходимо иметь достоверную информацию о состоянии дорожного полотна, условиях видимости и т.п. С целью сбора такой информации в архитектуру ИТС включена подсистема метеомониторинга. Ключевой задачей, возникающей при проектировании данной подсистемы, является определение необходимого количества автоматических дорожных метеостанций (АДМС) и их расположения. В ГОСТ 56829-2015 «Интеллектуальные транспортные системы» [7] эти характеристики не определяются.

## Определение количества метеостанций

Имеется несколько подходов к определению количества метеостанций. В работе [8] рассматривается экономическое обоснование количества АДМС. Ввиду того, что одна из главных задач введения подсистемы метеомониторинга – снижение аварийности путем определения безопасных режимов движения и мер воздействия на транспортную систему представляется целесообразным, рассмотреть меру влияния аварийноопасных факторов. К

таким факторам можно отнести погодные факторы, более точно – сочетание погодных факторов [6], в частности, к ним можно отнести выпадение осадков в виде снега. Снежный покров влияет не только на безопасность дорожного движения, но и на подвижность транспортных средств [2, 5].

В качестве параметров для расчета, необходимого количества метеостанций предлагается использовать следующие:

- количество жителей города (области);
- количество осадков в виде снега, количество дней с выпадением осадков в зимний период;
- количество аварий, доля аварий в зимний период;
- величины транспортных потоков;
- тип рельефа в городе (области).

Рассматривались 8 городов России, с количеством жителей более 1 млн чел.: Нижний Новгород, Новосибирск, Екатеринбург, Челябинск, Самара, Омск, Уфа, Воронеж. Определялся уровень осадков в виде снега за три зимних месяца, за последние шесть лет по данным метеостанций [9]. На рис. 1 показана гистограмма количества осадков, на рис. 2 – количество дней с осадками в зимний период за шесть лет.

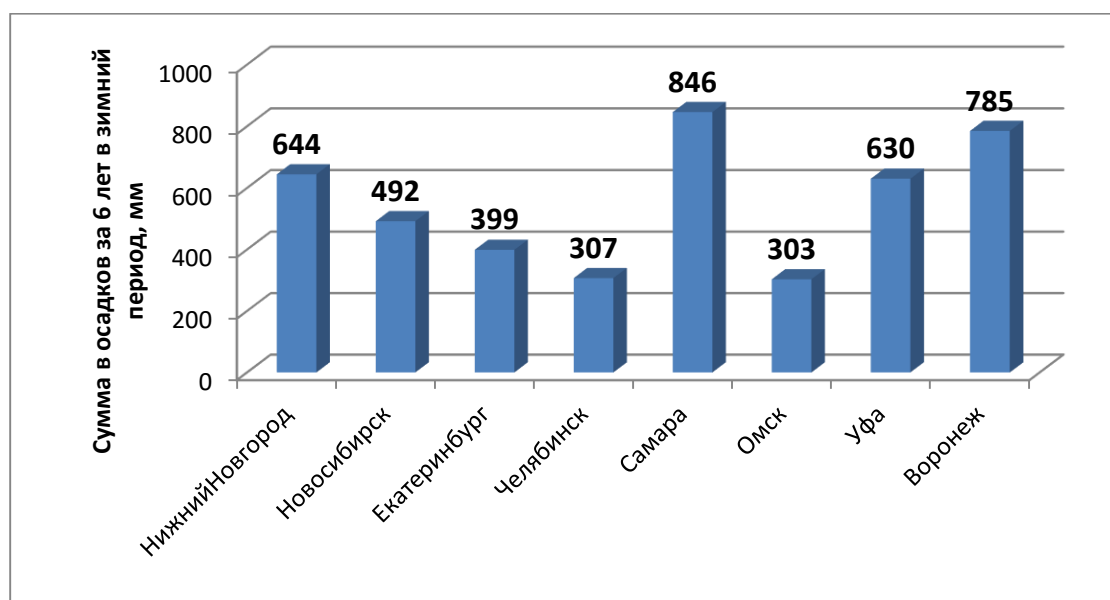


Рис. 1. Суммарное количество осадков (в виде снега) в зимний период (2017-2022 гг.)

Fig. 1. Total snow precipitation in winter (2017-2022)

Полные вычисления по формулам из [8] весьма громоздки, поэтому приводятся фрагменты анализа для Нижнего Новгорода. В качестве основных параметров расчета используются: площадь Нижегородской области – 76 624 км<sup>2</sup>, численность населения Нижегородской области – 3 144 254 чел. (2022 г.), численность населения Нижнего Новгорода – 1 244 254 чел. (2022 г.), площадь Нижнего Новгорода – 410,68 км<sup>2</sup>, уровень автомобилизации – 0,286 (машин на тыс. чел.), средняя стоимость комплекса АДМС, его прогнозная стоимость, срок эксплуатации, техническое обслуживание и т.п. На данный момент расчет ряда параметров, например, прогнозной стоимости и стоимости эксплуатации на достаточно длительный период значительно затруднено, т.к. экстраполяция может давать большую ошибку ввиду значительного колебания данных параметров.

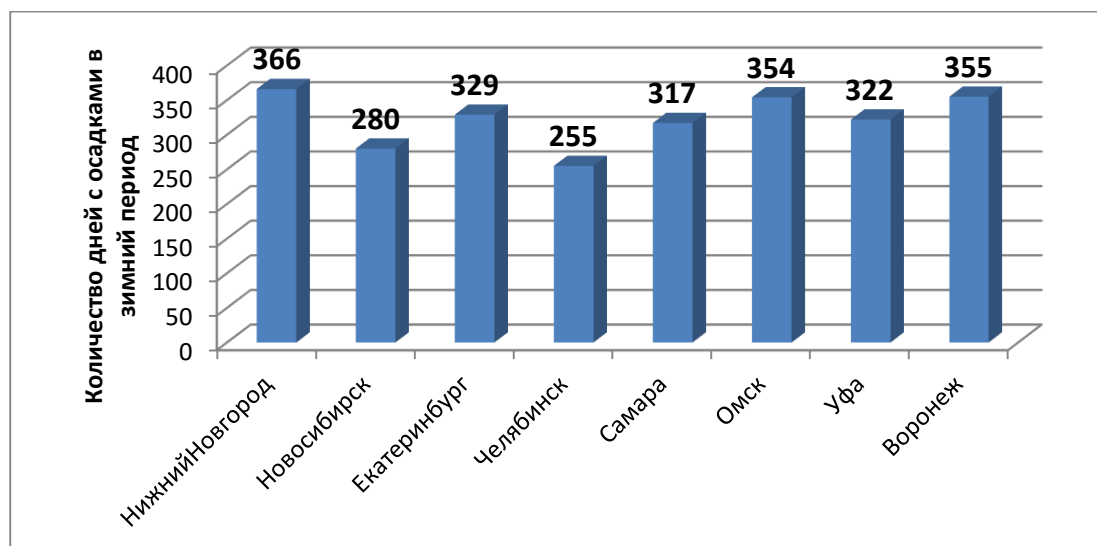


Рис. 2. Суммарное количество дней с осадками (в виде снега) в зимний период за 2017-2022 гг.

Fig. 2. Total number of days with snow precipitation in the winter period for 2017-2022

На первом шаге определяются:

- а) стоимость материалов – средняя цена метеостанции, стоимость ее установки и обслуживания, а также расходных материалов (периодически некоторые из блоков требуют замены);
- б) эффект по повышению безопасности дорожного движения, достигающийся за счет установки АДМС;
- в) суммарный пробег ТС.

На втором шаге территория разделяется на зоны и разрабатываются модели для оценки общей выгоды, которые могут быть получены в результате установки АДМС в заданном участке автомагистрали по сравнению со сценарием без станции.

На третьем шаге анализируются особенности расположения АДМС и выбирается оптимальное расположение.

Учет перечисленных выше параметров и рассмотренного подхода из [8], дополненного данными о количестве осадков в зимний период, позволяет оценить экономически обоснованное количество АДМС для Нижегородской области – 15, из которых 5 приходится на Нижний Новгород.

### Принципы расположения метеостанций на примере Нижнего Новгорода

После того, как количество метеостанций определено, необходимо выбрать конкретные точки для их расположения. В работе [10] указывается, что одним из ключевых факторов расположения является рельеф местности.

Предлагается следующий набор факторов, влияющих на выбор расположения метеостанций в крупном городе:

- 1) рельеф местности;
- 2) величины транспортных потоков;
- 3) места концентрации ДТП с дополнительными факторами снег, снежный накат, гололеда и другие погодные (или связанные с погодой) факторы;
- 4) равномерность покрытия АДМС территории крупного города.

Величины транспортных потоков необходимо учитывать ввиду того, что с расположением АДМС в интеллектуальной транспортной системе непосредственно связаны инфор-

мационные дисплеи (ДИТ) и знаки переменной информации (ЗПИ). Если рельеф местности не имеет значительных перепадов по высоте, показатели АДМС достаточно равномерны даже на значительном (500 м и более) от метеостанции, если же перепад высот значителен, то на участке дороги, удаленном от АДМС даже на 100 м состояние дорожного полотна и другие характеристики могут значительно отличаться [10]. Известно, что местами повышенной аварийности в зимний период, как правило, являются участки улично-дорожной сети (УДС) со значительным перепадом высот, а также мостовые сооружения и виадуки. Тем не менее, без детального исследования мест концентрации ДТП с сопутствующими факторами: снег, снежный накат, гололедица и т.п., нельзя голословно утверждать, что данный участок УДС является аварийноопасным. С методами анализа аварийности в зимний период можно ознакомиться в [6, 11, 12]. От равномерности покрытия АДМС территории города, как уже указывалось выше, зависит точность показаний в конкретной точке города. Тем не менее, равномерность покрытия нужно также рассматривать в привязке к транспортным магистралям города и учитывать рельеф. Таким образом, задача об оптимальном расположении АДМС имеет большое число факторов, которые нередко противоречат друг другу, поэтому достаточно сложно дать общий подход расчета географического расположения АДМС. Представляется целесообразным на основании возможно более полного учета описанных выше четырех групп факторов сформировать несколько вариантов (сценариев) расположения АДМС и затем, проведя сравнительный анализ, выбрать оптимальный вариант расположения.

Рассмотрим применение описанного подхода на примере Нижнего Новгорода. Город разделен на две части рекой Ока; меньшая часть, расположенная на правом берегу, находится значительно выше большей части, расположенной на левом берегу (рис. 3). Разница высот левобережной и правобережной частей составляет около 100 м.

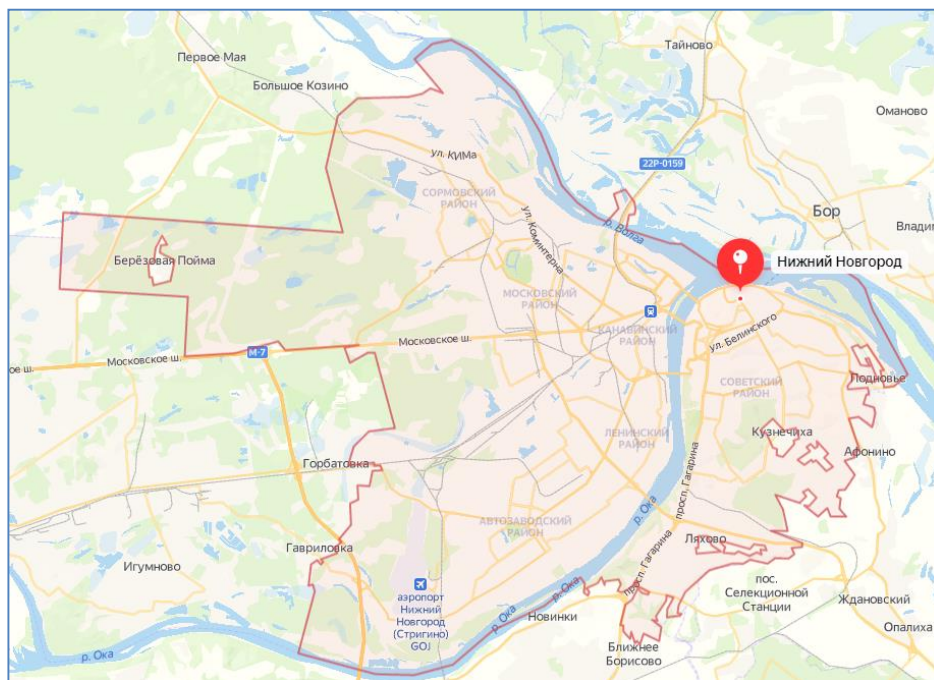


Рис. 3. Границы г. Нижний Новгород на карте

Fig. 3. Borders of Nizhny Novgorod city on the map

Кроме того, рельеф левобережной части Нижнего Новгорода имеет более «сглаженный» характер. Перепад высот в этой части составляет не более 10 м. Правобережная часть характеризуется гораздо большим перепадом высот. У точек, отстоящих на 3 км, разница высот может достигать 100 м, на удалении 500 м – до 50 м (рис. 4).

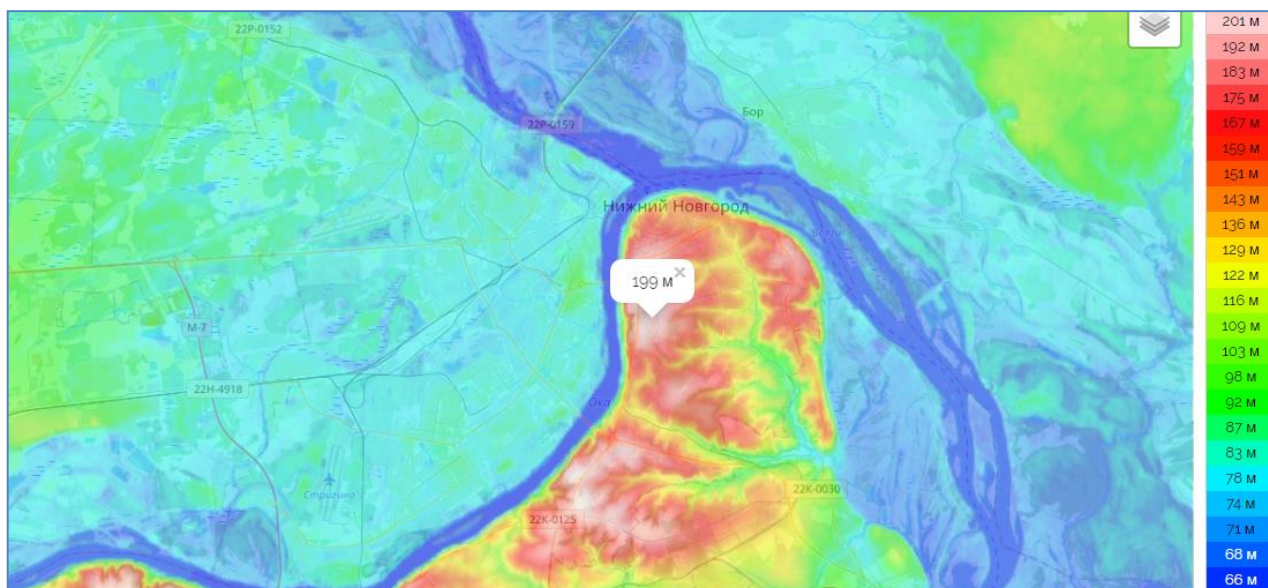


Рис. 4. Карта рельефа г. Нижний Новгород

Fig. 4. Nizhny Novgorod city relief map

Таким образом, в левобережной части, несмотря на ее большую протяженность (площадь), изменения температуры, давления и других погодных данных менее значительны, и целесообразно расположить две в левобережной части города и три в правобережной.

Две указанные части города связаны 4-мя мостами. Администрация города, многие офисы, объекты культуры и ряд крупных предприятий расположены в правобережной части, наиболее крупные заводы (ГАЗ, «Красное Сормово», «Сокол») расположены в левобережной части. Ввиду этого между двумя частями города происходит интенсивный транспортный обмен.

Магистрали с наибольшей загрузкой (приведены характерные сечения):

- пр. Гагарина 4500 авт./час;
- Московское шоссе 3800 авт./час;
- пр. Ленина 2500 авт./час;
- Канавинский мост 3700 авт./час;
- Метромост 2400 авт./час;
- Молитовский мост 2800 авт./час;
- Мызинский мост 5400 авт./час.

Величины транспортных потоков указаны по данным обследования 2020 года, приводится часовая нагрузка в утренний час пик (наибольшая нагрузка).

Места концентрации аварий с дополнительными погодными факторами гололедица, снежный накат, снегопад с наибольшей аварийностью могут быть выделены двумя способами: по абсолютной величине, что авторы полагают не совсем правильным, и по формуле (1) из [13]:

$$K_i = \frac{n_{io} \times N}{N_o \times n_i} \quad (1)$$

где  $N$  – общее число ДТП,  $n_i$  – количество ДТП, при совершении которых присутствовал  $i$ -ый фактор,  $N_o$  – число ДТП в очаге,  $n_{io}$  – количество ДТП в очаге, при совершении которых присутствовал  $i$ -ый фактор.

Анализ обоих списков дает следующие результаты:

а) по фактору «гололедица»:

- пр. Ленина в районе м. Пролетарская (д. 75, д. 73, д. 70);

- участок ул. Новикова-Прибоя перед Мызинским мостом (д. 2, д. 4, д. 12) и Мызинский мост;
- Комсомольская пл. (д. 1, д. 2);
- перекресток Комсомольское шоссе - пр. Ленина;
- перекресток пр. Ленина – Заречный бульвар;
- пл. Сенная;
  - б) по фактору «заснеженная дорога»:
    - пр. Ленина в районе м. Пролетарская (д. 75);
    - Мызинский мост;
    - пересечение Московского шоссе и ул. Кузбасская;
    - перекресток Гагарина – Ларина;
  - в) по фактору «снежный накат»:
    - пл. Лядова;
    - пл. Советская;
    - Молитовский мост;
    - Окский съезд.

Рассматривались несколько перспективных вариантов расположения АДМС, учитывающих четыре указанных фактора. Итоговый вариант приводится на рис. 5.

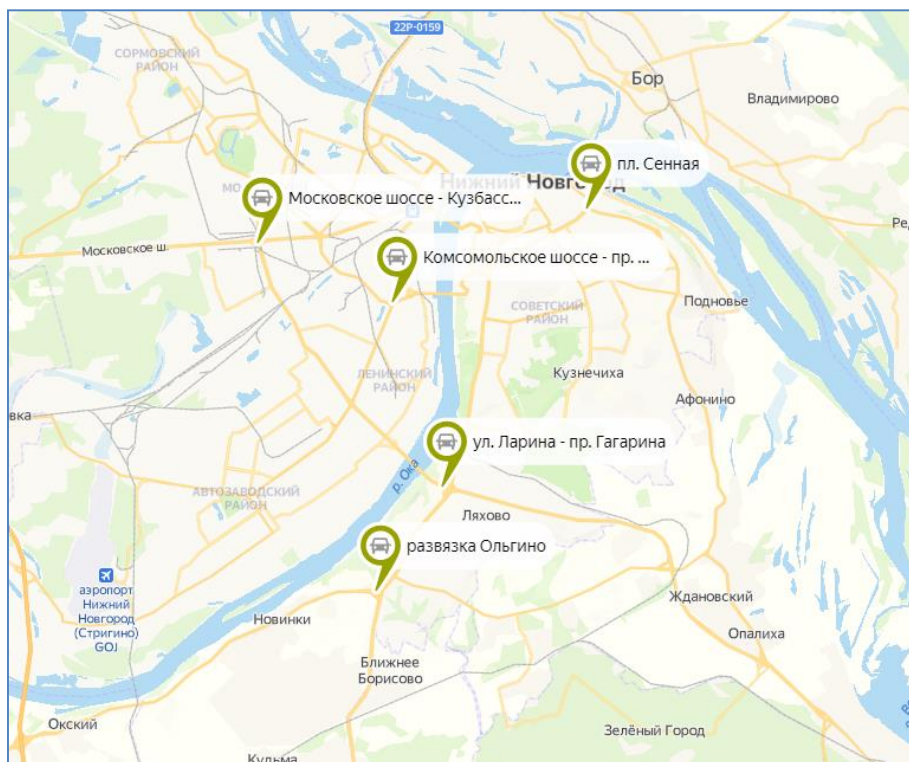


Рис. 5. Вариант расположения АДМС г. Нижний Новгород

Fig. 5. Version of ARWS location, Nizhny Novgorod city

Поясним кратко факторы, ввиду которых выбрано итоговое расположение АДМС.

1. Пл. Сенная – большая доля (и количество) ДТП с сопутствующим фактором «Гололедица», большие величины транспортных потоков, вблизи располагается канатная дорога, планируется в непосредственной близости строительство станции метрополитена.

2. Многоуровневая развязка ул. Гагарина – ул. Ларина – одна из наиболее нагруженных в Нижнем Новгороде, большое количество аварий с фактором «Заснеженная дорога»,



вблизи (1 км) располагается Мызинский мост, данные АДМС будут достаточно точными и для него.

3. Многоуровневая развязка сложной конфигурации «Ольгино» (56.214611, 43.927800), большие величины транспортных потоков, особенно пиковых значений в пятницу вечером, в направлении из Нижнего Новгорода. Ввиду реконструкции, законченной в 2021 г. уровень аварийности нельзя оценить объективно ввиду малого периода в эксплуатации. Данные АДМС могут также использоваться для трасс Р-158, 22К-031, 22К-0125.

4. Многоуровневая развязка Комсомольское шоссе – проспект Ленина – большие величины транспортных потоков, большая доля (и количество) ДТП с сопутствующим фактором «Гололедица», в небольшом отдалении располагаются очаги ДТП – пл. Комсомольская и перекресток пр. Ленина – Заречный бульвар.

5. Многоуровневая развязка Московское шоссе – ул. Кузбасская – большие величины транспортных потоков, большая доля (и количество) ДТП с сопутствующим фактором «Заснеженная дорога».

### Заключение

Рассмотрение дополнительного фактора – уровня осадков в зимний период и количества аварий, связанных с данным фактором, позволяет более точно рассчитать необходимое для данного населенного пункта или транспортной агломерации количество АДМС.

В работе рассмотрен подход, позволяющий оптимальным образом расположить АДМС, также разобрано применение данной теории для г. Нижний Новгород. Оптимальное расположение метеостанций позволит собирать наиболее полную информацию о погодных факторах, на основании которой возможно эффективное управление подвижностью ТС при помощи подсистемы косвенного управления транспортными потоками ИТС.

Итоговый вариант расположения АДМС планируется использовать при разработке ИТС в Нижнем Новгороде.

### Библиографический список

1. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4 (101). С. 72-77.
2. **Макаров, В.С.** Оценка эффективности движения колесных машин на основании статистических характеристик снежного покрова / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, К.О. Гончаров, А.В. Феджоренко, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 1. С. 150-157.
3. **Макаров, В.С.** Формирование снежного покрова в зависимости от ландшафта местности и оценка подвижности транспортно-технологических машин в течение зимнего периода / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, А.М. Беляев, А.В. Папунин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 1. С. 155-160.
4. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс... канд. техн. наук: 05.05.03 / Макаров В.С. – Н. Новгород, 2009. – 161 с.
5. **Макаров, В.С.** Статистический анализ характеристик снежного покрова // Современные проблемы науки и образования, 2013. № 1. С. 147.
6. **Елисеев, М.Е.** Статистический и корреляционный анализ погодных факторов в интерактивной информационной системе повышения безопасности дорожного движения / М.Е. Елисеев, Л.Н. Мазунова, И.Н. Елисеева // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 2 (129). С. 28-41.
7. Интеллектуальные транспортные системы гост 56829-2015 [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200128315>.

8. **Kwon T.J.**, Fu L. and Chaozhe J. Road weather information system stations – where and how many to install: a cost benefit analysis approach // Canadian Journal of Civil Engineering. 2014.
9. Расписание погоды .Офиц. сайт. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://rp5.ru>. (дата обращения 25.04.2022).
10. **Eriksson, M.**, and Norrman, J. 2001. Analysis of station locations in a road weather information system. Meteorological Applications, 448(8): 437-448.
11. **Andrey, J.** Weather as a chronic hazard for road transportation in Canadian cities / J. Andrey, B. Mills, M. Leahy, J. Suggett // Nat. Hazards. 2003. Vol. 28. P. 319-343.
12. **Asano, M.** Characteristics of traffic accidents in cold, snowy Hokkaido, Japan / M. Asano, M. Hirasawa // Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. 2003. Vol. 4. Pp. 1426-1434.
13. **Eliseev, M.E.** Algorithm of automated annotation of areas of roads with increased accidents / M.E. Eliseev, A.S. Blinov, A.V. Lipenkov // MATEC Web of Conferences. 2021. № 334. C. 01007.

***Дата поступления  
в редакцию: 22.05.2022***

УДК 629.113.001-585

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_75

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЧИСЕЛ ТРАНСМИССИИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ТЯГОВО-СКОРОСТНЫХ И ТОПЛИВНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АВТОБУСА

**А.А. Колин**

ORCID: 0000-0001-5151-0260 e-mail: kolinaa@nntu.ru

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

ORCID: 0000-0001-6429-2928 e-mail: vnkravets@yandex.ru

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

ORCID: 0000-0003-0828-7758 e-mail: musarsky@list.ru

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

ORCID: 0000-0002-3766-4615 e-mail: anton.tumasov@nntu.ru

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

ORCID: 0000-0001-5172-0364 e-mail: vn.naumov1941@yandex.ru

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

ORCID: 0000-0002-8319-3973 e-mail: kulepov@dpingtu.ru

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

ORCID: 0000-0003-4852-1174 e-mail: lev.n.orlov@mail.ru

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

Исследуются зависимости показателей тягово-скоростных свойств и единичных показателей топливной экономичности от передаточных чисел агрегатов трансмиссии. Актуальность работы обусловлена необходимостью изучения влияния параметров двигателя и трансмиссии на показатели тягово-скоростных свойств автобусов *ГАЗ Вектор Next 10*. Данное семейство было разработано объединенным инженерным центром Группы ГАЗ на базе модернизированной модели грузового автомобиля *ГАЗон Next 10* для Павловского автобусного завода. На новых автобусах установлен более мощный дизельный двигатель и два варианта агрегатов трансмиссии: пяти- и шестиступенчатая коробки передач, главные передачи с передаточными числами 3,9 и 4,55.

Оценка тягово-скоростных свойств автобуса выполнена с использованием единичных показателей: наибольшей скорости, времени движения на пути 400 и 1000 м, времени достижения скорости 60 км/ч, наибольшего преодолеваемого уклона дороги, наибольшего ускорения разгона на низшей и высшей ступенях коробки передач, удельной мощности. Оценка топливно-экономических свойств выполнена с использованием

единичных показателей: расхода топлива на постоянных скоростях (60-80 км/ч), расхода топлива в городском цикле. Показано, что при снижении передаточного числа главной передачи увеличивается наибольшая скорость автобуса с обоими вариантами коробок передач и уменьшается преодолеваемый автобусом наибольший угол подъема, а также наибольшее ускорение при разгоне на низшей и высшей ступенях трансмиссии. Предложенная оптимизированная шестиступенчатая коробка переключения передач позволяет снизить расход топлива на 3,4 % в городском цикле.

**Ключевые слова:** автобус, трансмиссия автобуса, механическая ступенчатая коробка передач, главная передача, тягово-скоростные свойства автобуса, единичные показатели тягово-скоростных свойств, единичные показатели топливно-экономических свойств.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Колин, А.А. Исследование влияния передаточных чисел трансмиссии на показатели тягово-скоростных и топливно-экономических свойств автобуса / А.А. Колин, В.Н. Кравец, Р.А. Мусарский, А.В. Тумасов, В.Н. Наумов, В.Ф. Кулепов, Л.Н. Орлов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 75-83. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_75

## **STUDY OF EFFECT OF TRANSMISSION GEAR RATIOS ON INDICATORS OF TRACTION-SPEED AND FUEL-ECONOMY PROPERTIES OF A BUS**

**A.A. Kolin**

ORCID: **0000-0001-5151-0260** e-mail: **kolinaa@nntu.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**V.N. Kravets**

ORCID: **0000-0001-6429-2928** e-mail: **vnkravets@yandex.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**R.A. Musarskiy**

ORCID: **0000-0003-0828-7758** e-mail: **musarsky@list.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.V. Tumasov**

ORCID: **0000-0002-3766-4615** e-mail: **anton.tumasov@nntu.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**V.N. Naumov**

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

**V.F. Kulepov**

ORCID: **0000-0002-8319-3973** e-mail: **kulepov@dpingtu.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**L.N. Orlov**

ORCID: **0000-0003-4852-1174** e-mail: **lev.n.orlov@mail.ru**  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Dependences of indicators of traction-speed properties and fuel efficiency single indicators on gear ratios of transmission units are studied. Relevance of the work is due to the effect of engine and transmission parameters on the traction and speed properties indicators of GAZ Vector Next 10 buses. This family of buses was developed by the GAZ Group joint engineering center on the basis of the upgraded version of GAZon Next 10 truck for Pavlovo Bus Plant. Buses of the new family have a more powerful diesel engine and two options of transmission units: five- and six-speed gearboxes, main gears with gear ratios of 3.9 and 4.55.

Assessment of the traction and speed properties of the bus was carried out using single indicators: the highest speed, travel time on the path of 400 and 1000 m, time to reach a speed of 60 km/h, greatest overcome road slope, greatest acceleration with speedup at lowest and highest gearbox steps, specific power. Assessment of fuel and economy properties was carried out using single indicators: fuel consumptions at constant speeds (60-80 km/h), fuel consumption in urban cycle. It is shown that, when the gear ratio of main gear is decreased, the highest speed of the bus with both options of gearbox increases, and the greatest ascent angle overcome by the bus decreases, as well as the greatest acceleration with speedup at lowest and highest transmission steps. Proposed optimized six-speed gearbox allows to reduce fuel consumption by 3.4 % in the urban cycle.

**Key words:** bus, bus transmission, manual step-by-step gearbox, main gear, traction and speed properties of a bus, single indicators of traction and speed properties, single indicators of fuel and economy properties.

**FOR CITATION:** A.A. Kolin, V.N. Kravets, R.A. Musarskiy, A.V. Tumasov, V.N. Naumov, V.F. Kulepov, L.N. Orlov. Study of effect of transmission gear ratios on indicators of traction-speed and fuel-economy properties of a bus. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 3. Pp. 75-83. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_75

## Введение

В 2014 г. на Горьковском автомобильном заводе начался выпуск модельного ряда автомобилей *ГАЗон Next* категории  $N_2$ , с различным исполнением, полной массой 8,7 т. Используя шасси и агрегаты базовой модели, конструкторы ОИЦ Группы ГАЗ разработали автобус малого класса *ГАЗ Вектор Next*, предназначенный для выпуска на Павловском автобусном заводе; в начале осени 2015 г. он был представлен на автомобильной выставке в Москве. В середине 2016 г. Павловский автобусный завод начал выпуск семейства автобусов данного класса габаритной длиной от 7,1 м до 8,8 м. В 2018 г. ОИЦ Группы ГАЗ осуществил модернизацию грузового автомобиля путем увеличения грузоподъемности до 6,2 т. Таким образом была получена модернизированная модель с увеличенной полной массой до 10 т. Разработка получила наименование *ГАЗон Next 10* и была оснащена дизельным двигателем ЯМЗ-53445, в сочетании с двумя вариантами КПП и главных передач:

На шасси модернизированной модели грузового автомобиля создана базовая модель автобуса *ГАЗ Вектор Next 10*, которая послужила основой нового семейства автобусов, предназначенных для городских, пригородных и междугородных пассажирских перевозок. Городские автобусы выпускаются в трех комплектациях – стандартной, школьной и люкс. Изменение мощности двигателя и параметров агрегатов трансмиссии оказало влияние на показатели тягово-скоростных свойств нового семейства автобусов малого класса. С учетом изложенных обстоятельств была сформулирована цель исследования: изучение зависимости показателей тягово-скоростных свойств и единичных показателей топливной экономичности от передаточных чисел агрегатов трансмиссии. Данная работа актуальна и своевременна, о чем свидетельствуют ранее выполненные исследования [1, 2].

В качестве исходных данных табл. 1 были выбраны параметры и характеристики стандартной комплектации городского автобуса *ГАЗ Вектор Next 10*. Оценка тягово-скоростных свойств автобуса выполнена с использованием единичных (частных) показателей, приведенных в международных и национальных нормативных документах [3, 4]:

- 1) наибольшей скорости  $V_{max}$ ;
- 2) времени движения на пути 400 м и 1000 м  $t_{400}$  и  $t_{1000}$ ;
- 3) времени достижения скорости 60 км / ч  $t_{60}$ ;
- 4) наибольшего преодолеваемого автобусом подъема дороги  $i$  %;

- 5) наибольшего ускорения разгона на низшей и высшей ступенях коробки передач  $a_{a1max}$ ,  $a_{aVmax}$ ,  $a_{aVI max}$ ;
- б) удельной мощности  $P_{уд}$ .

Таблица 1.

## Исходные данные исследуемого автобуса ГАЗ Вектор Next 10

Table 1.

## Initial data of the studied GAZ Vector Next 10 bus

Название	Значение	
Технически допустимая максимальная масса	$m_a = 10000$ кг	
Силовая установка-двигатель с воспламенителем от сжатия с номинальной стендовой мощностью =125 кВт (170 л.с.) и наибольшим вращающим моментом 650 Н·м		
Коэффициент отбора мощности на привод вспомогательного оборудования	$k_c = 0,95$	
Коробка передач механическая, ступенчатая с различным числом ступеней: пяти- и шестиступенчатая: с передаточными числами	$u_{кI} = 6,555;$ $u_{кII} = 3,933;$ $u_{кIII} = 2,376;$ $u_{кIV} = 1,442;$ $u_{кV} = 1,000;$	$u_{кI} = 6,555;$ $u_{кII} = 3,933;$ $u_{кIII} = 2,376;$ $u_{кIV} = 1,442;$ $u_{кV} = 1,000;$ $u_{кVI} = 0,782$
Главная передача коническая с различными передаточными числами:	$u_0 = 3,9;$	$u_0 = 4,55;$
Коэффициент, учитывающий потери мощности трансмиссии	$\eta_{TP} = 0,87$	
Шины по ГОСТ Р 52899 – 2007	245/70R19,5	
Коэффициент сопротивления качению	$f_0 = 0,01$	
Параметры обтекаемости		
Коэффициент обтекаемости	$c_x = 0,46$	
Плотность воздуха	$\rho_B = 1,225$ кг/м <sup>3</sup>	
Площадь миделя	$A_B = 3,8$ м <sup>2</sup>	
Фактор обтекаемости	$W_B = 1,07$ (Н/с <sup>2</sup> )/м <sup>2</sup>	
Моменты инерции вращающихся частей		
Моменты инерции двигателя	$J_e = 2,15$ кг·м <sup>2</sup>	
Моменты инерции колеса	$J_k = 9,36$ кг·м <sup>2</sup>	
Число шин на колесах	$n_{ш} = 6$	

Единичные показатели исследуемого автобуса определены с использованием уравнения его прямолинейного движения в типичных дорожных условиях. С помощью программного пакета Matlab построены графики: 1) тягового баланса; 2) баланса мощности; 3) динамического баланса; 4) ускорений при разгоне; 5) времени разгона; 6) пути разгона автобуса. Были рассчитаны и построены 24 графика для автобуса, оснащенного пяти- и шестиступенчатой коробками передач, главными передачами с передаточными числами 3,9 и 4,55. Расчет

и построение графиков выполнены по методикам, изложенным в учебной и научной литературе по теории автомобиля [5-7]. Данное исследование проводилось одновременно с установлением зависимостей между показателями топливной экономичности и передаточными числами агрегатов трансмиссии автобуса [8]. Для иллюстрации результатов расчета на рис. 1 показан динамический баланс автобуса, оборудованного шестиступенчатой коробкой передач и главной передачей с передаточным числом 3,9. Рис. 2 и 3 необходимы для иллюстрации времени и пути разгона автобуса, оборудованного различными вариантами трансмиссии. Выполненные расчеты и наличие достаточного количества исходных данных позволили достигнуть цели исследования. Наибольшая скорость автобуса найдена по графикам тягового, мощностного и динамического балансов и ускорений разгона.

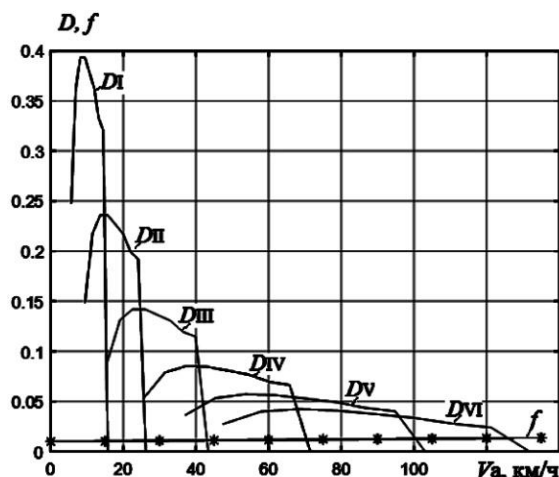


Рис. 1. Динамический баланс автобуса, оборудованного шестиступенчатой коробкой передач и главной передачей с передаточным числом 3,9

Fig. 1. Dynamic balance of a bus equipped with a six-speed gearbox and a main gear with a gear ratio of 3.9

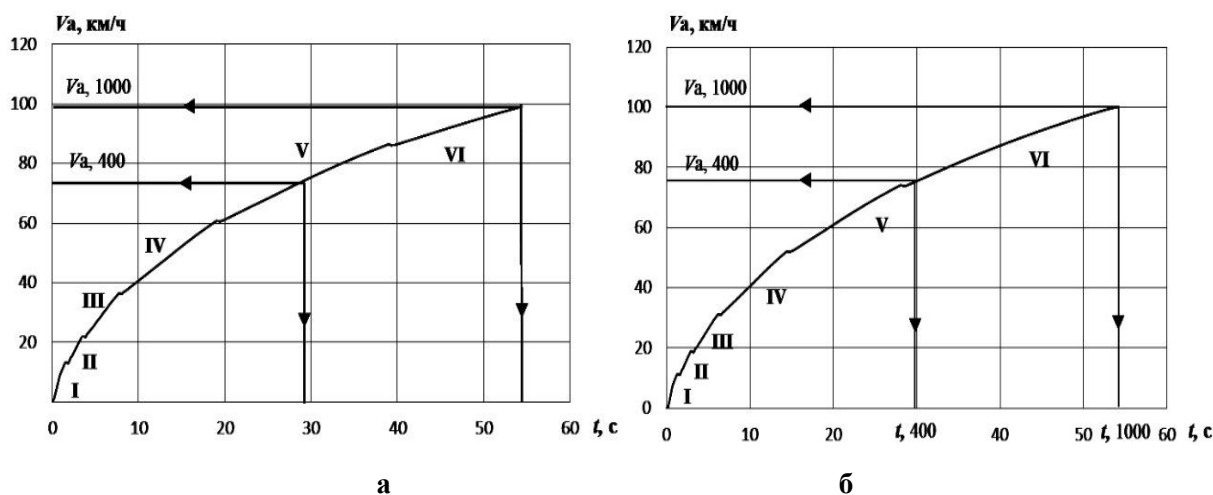


Рис. 2. Время разгона автобуса, оборудованного шестиступенчатой коробкой передач при передаточных числах главной передачи: а – 3,9; б – 4,55

Fig. 2. Acceleration time of a bus equipped with a six-speed gearbox with gear ratios of the main gear: а – 3.9; б – 4.55

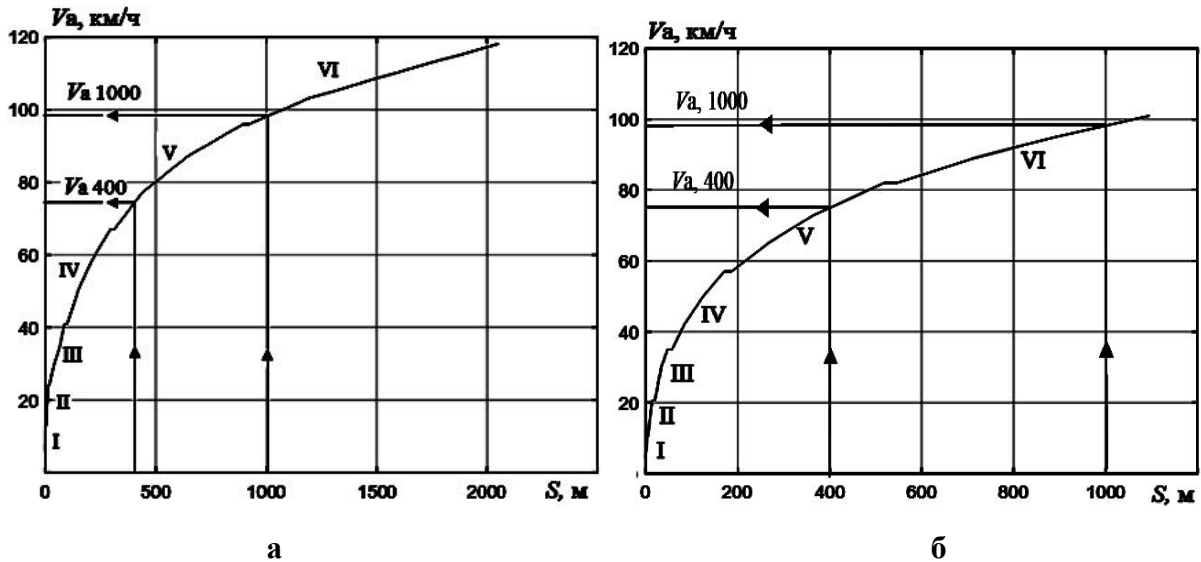


Рис. 3. Путь разгона автобуса, оборудованного шестиступенчатой коробкой передач при передаточных числах главной передачи: а – 3,9; б – 4,55

Fig. 3. Starting distance of a bus equipped with a six-speed gearbox with gear ratios of the main gear: a – 3.9; b – 4.55

Наибольшая скорость определена по графику динамического баланса (рис. 1) в точке пересечения кривых динамического фактора и коэффициента сопротивления качению  $f$ . Время движения на заданном пути следует определять на горизонтальном участке испытательной трассы длиной 400 м ( $t_{400}$ ) и 1000 м ( $t_{1000}$ ). Для этого по графику пути разгона (рис. 3) находят скорости  $V_{a400}$  и  $V_{a1000}$ , до которых автобус разгоняется на данных участках пути, после чего с использованием графика времени разгона (рис. 2) при этих скоростях находят значения времени разгона  $t_{400}$  и  $t_{1000}$ .

Для городских автобусов время разгона необходимо определять до скорости 60 км/ч ( $t_{60}$ ) по графику времени разгона (рис. 2). Наибольший угол подъема (град), преодолеваемого автобусом, вычисляют по формуле (1), [7]:

$$\alpha_{max} = \arcsin \left[ \frac{D_{max} - f \sqrt{1 - D_{max}^2 + f^2}}{1 + f^2} \right], \quad (1)$$

где  $D_{max}$  – максимальный динамический фактор на низшей ступени коробки передач (рис. 1);  $f = 0,01$  – коэффициент сопротивления качению.

Наибольший преодолеваемый автобусом уклон дороги (%) рассчитывают по формуле:

$$i_{max} = 100 \operatorname{tg} \alpha_{max}. \quad (2)$$

Наибольшие величины ускорений разгона на низшей и высшей ступенях коробки передач находят по графику ускорений разгона  $a_a = f(V_a)$ .

Определение удельной мощности производится согласно (3) (кВт/т):

$$P_{уд} = \frac{P_{e_{max}}^c}{m_a}, \quad (3)$$

где  $P_{e_{max}}^c$  – номинальная стендовая мощность двигателя, кВт;  $m_a$  – полная масса автобуса, т.

Зависимость наибольшего преодолеваемого автобусом уклона дороги (%) от передаточного числа главной передачи с пяти- и шестиступенчатой коробками передач может быть описана линейной зависимостью (4) [7]:



$$i = 41,7 + 13,54(u_0 - 3,9). \tag{4}$$

В табл. 2 показаны численные значения тягово-скоростных свойств автобуса при различных значениях параметров трансмиссии.

Таблица 2.

Тягово-скоростные свойства автобуса в зависимости от передаточных чисел трансмиссии

Table 2.

Traction and speed properties of the bus depending on transmission gear ratios

Вариант КПП	Пятиступенчатая КПП		Шестиступенчатая КПП	
Передаточные числа главной передачи	3,9	4,55	3,9	4,55
Исследуемый параметр				
Наибольшая скорость, км/ч	99	86	124	108
Время движения на пути 400 м, с	29,8	29,7	29,9	29,8
Время движения на пути 1000 м, с	–	–	54,3	54,1
Время достижения скорости 60 км/ч, с	18,7	19,48	18,7	19,48
Наибольший уклон дороги, %	41,7	50,5	41,7	50,5
Наибольшее ускорение на I передаче, м/с <sup>2</sup>	1,86	1,90	1,86	1,90
Наибольшее ускорение на V передаче, м/с <sup>2</sup>	0,43	0,52	–	–
Наибольшее ускорение на VI передаче, м/с <sup>2</sup>	–	–	0,28	0,36
Удельная мощность, кВт/т:	12,5			

Оценка топливной экономичности исследуемого автобуса, а именно – единичных показателей топливной экономичности производилась согласно [9]. Для этого требуется определить расходы топлива на постоянных скоростях (60-80 км/ч), расход топлива в городском цикле. Для нахождения искомых величин и для общей оценки топливной экономичности автобуса необходимо определить удельный расход двигателя  $g_d$  [г/(кВт·ч)], определен согласно [7, 10]. В табл. 3 приведен расход топлива автобуса при различных режимах движения и различных передаточных числах агрегатов трансмиссии. Городской цикл разработан в соответствии с [9].

Таблица 3.

Расход топлива автобуса в зависимости от передаточных чисел трансмиссии и режима движения

Table 3.

Bus fuel consumption depending on transmission ratios and driving mode

Выбранный режим движения	Путевой расход топлива, л/100 км.			
	$u_{кV}=1$ $u_0=3,9$	$u_{кV}=1$ $u_0=4,55$	$u_{кVI}=0,782$ $u_0=3,9$	$u_{кVI}=0,782$ $u_0=4,55$
Постоянная скорость 60км/ч	12,1	15,2	11,1	11,8
Постоянная скорость 80км/ч	13,8	16,9	13,5	14,2
Городской цикл	24,9	24,7	24,8	23,8
Разгон 0-60 км/ч	-	-	70,8	66,9

Наиболее экономичным вариантом на режиме установившегося движения является шестиступенчатая коробка передач с передаточным числом главной пары 3,9. Экономия между шести- и пятиступенчатой коробками передач с передаточным числом главной парой 3,9 составляет 1 л/100 км (-8,3 %) и 0,3 л/100 км (-2,2 %) на 60 и 80 км/ч соответственно. Наиболее экономичным вариантом для движения в городском цикле является шестиступенчатая коробка передач с передаточным числом главной парой 4,55. Экономия между шести-

ступенчатой и пятиступенчатой коробками передач с передаточным числом главной парой 4,55 составляет 0,9 л / 100 км (-3,6 %).

Учитывая полученные результаты в качестве приоритетного сочетания трансмиссии, была принята шестиступенчатая коробка передач с передаточным числом главной пары 4,55. Далее было предложено оптимизировать передаточные числа шестиступенчатой коробки передач, а именно изменить 2-ю, 3-ю и 4-ю передачи. Предложенные передаточные числа: для 2-й передачи – 3,74(-4,9 %), для 3-й передачи – 2,50(+5,2 %); для 4-й передачи – 1,35(-5,1 %). В табл. 4 предоставлены результаты расхода топлива оптимизированной шестиступенчатой коробки передач.

Таблица 4.

**Расход топлива в городском цикле для оптимизированной коробки передач**

Table 4.

**Fuel consumption in the urban cycle for an optimized gearbox**

Режим	Путевой расход топлива, л/100 км			
	Оригинальная шестиступенчатая КПП с ГП 4,55	Оптимизированная шестиступенчатая КПП с ГП 4,55	Изменение, л/100 км	Изменение, %
Городской цикл	23,8	23	-0,8	-3,4

### Выводы

Для исследуемого автобуса снижение передаточного числа главной передачи с 4,55 до 3,9 (на 14,3 %), оснащенного обоими вариантами коробок передач, приводит:

- к увеличению наибольшей скорости на 15 %;
- к увеличению времени разгона: 0-60 км/ч, на пути 400 м и 1000 м не более чем на 5 %;
- к уменьшению наибольшего преодолеваемого уклона дороги на 17,4 %;
- к уменьшению ускорений разгона на всех ступенях коробки передач, в том числе, на 1-й передаче на 2,1 %, на 5-й – на 17,3 %, на 6-й – на 22,2 %.

Использование оптимизированной шестиступенчатой коробки передач позволит экономить топливо в городском цикле 0,8 л / 100 км (-3,4 %) по сравнению с оригинальной шестиступенчатой коробкой передач.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель Next с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года № 218).*

### Библиографический список

1. **Naunheimer Н.** Automotive transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application: Second Edition / Н. Naunheimer. В. Bertsche, J. Ryborz, W. Novak, Heidelberg, Dordrecht, London, New York. Springer, 2011.
2. **Blokhin А.** The study of the automatic manual truck transmission clutch performance / А. Blokhin, А. Kropp, L. Barakhtanov, А. Taratorkin, А. Koshurina // Proceedings of the 2015 International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering (EAME 2015). AER – Advances in Engineering Research, 2015. Vol. 13, Pp. 421-424, <https://doi.org/10.2991/icamia-15.2015>. – 16 p.
3. Правила ЕЭК ООН № 68. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения автотранспортных средств в отношении измерения максимальной скорости. Введ. 01.09.96. Швейцария. Женева: ЕЭК ООН. 1996. – 16 с.
4. ГОСТ 22576 – 90 (СТ СЭВ 6893 – 89). Автотранспортные средства. Скоростные свойства. Методы испытаний. М.: Стандартинформ. 2012. – 16 с.

5. **Тарасик, В.П.** Теория движения автомобиля: учебное пособие / В.П. Тарасик. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 487 с.
6. **Ларин, В.В.** Теория движения полноприводных колесных машин / В.В. Ларин. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 391 с.
7. **Кравец, В.Н.** Теория автомобиля: учебное пособие / В.Н. Кравец, В.В. Селифонов. – М.: ООО «Гринлайт+». 2011. – 884 с.
8. **Кравец, В.Н.** Установление зависимостей между показателями топливной экономичности и передаточными числами агрегатов трансмиссии автобуса / В.Н. Кравец, Р.А. Мусарский, А.В. Тумасов // Известия МГТУ МАМИ. 2020. № 2. С. 18-23.
9. ГОСТ Р 54810 – 2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. М.: Стандартиформ. 2012. – 26 с.
10. **Кравец, В.Н.** Измерители эксплуатационных свойств автотранспортных средств / В.Н. Кравец – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. – 157 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 22.05.2022*

УДК 629.113.001-585

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_84

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ В АВТОМОБИЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МОДЕЛИ ЕГО СВОЙСТВ

**Лю И**

ORCID: 0000-0002-2615-6826 e-mail: liuyi941003@gmail.com

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

ORCID: 0000-0003-1512-9299 e-mail: valeryzuz@yandex.ru

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

Разработан метод усовершенствования конечно-элементных моделей клеевого соединения в автомобильных конструкциях при квазистатической нагрузке за счет целенаправленной коррекции свойств модели клеевого материала с использованием программного комплекса LS-DYNA. Моделирование осуществлялось для наиболее тяжелого квазистатического нагружения для клеевых соединений «встык» и «внахлест». Описаны механические характеристики клеевого материала DOW1482, полученные из эксперимента при использовании гидропресса со скоростью раздвижки 0,125 мм/мин. Применение разработанного метода позволило существенно снизить погрешность моделирования по сравнению с результатами экспериментов, а также использовать рациональные конечно-элементные модели относительно небольшой размерности, что важно на этапе проектирования автомобиля, когда требуются многовариантные расчеты с целью получения конструкции с оптимальными параметрами.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, модель клеевого соединения, LS-DYNA, напряжено-деформированное состояние.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Лю, И. Численное моделирование клеевого соединения в автомобильных конструкциях при квазистатическом нагружении с использованием усовершенствованной модели его свойств / Лю И, В.Н. Зузов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 84-97. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_84

## NUMERICAL SIMULATION OF ADHESIVE JOINT IN AUTOMOBILE DESIGNS UNDER QUASISTATIC LOADING USING AN IMPROVED MODEL OF ITS PROPERTIES

**Liu Yi**

ORCID: 0000-0002-2615-6826 e-mail: liuyi941003@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russia**V.N. Zuzov**

ORCID: 0000-0003-1512-9299 e-mail: valeryzuz@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University  
Moscow, Russia

**Abstract.** Method for improvement of finite element models of adhesive joint in automotive designs under quasi-static load due to object-oriented correction of the adhesive material model properties has been developed using the LS-DYNA software system. Simulation was carried out for the heaviest quasi-static loading for butt and lap adhesive joints. Mechanical characteristics of DOW1482 adhesive material obtained from experiment using a hydraulic

press with opening speed of 0.125 mm/min, are described. Application of the developed method made it possible to significantly reduce the modeling error in comparison with the experimental results, as well as to use rational finite element models of relatively small dimension which is important at the vehicle design stage when multivariate calculations are required in order to obtain a design with optimal parameters.

**Key words:** finite element method, adhesive joint model, LS-DYNA, stress-strain state.

**FOR CITATION:** Liu Yi., V.N. Zuzov. Numerical simulation of adhesive joint in automobile designs under quasi-static loading using an improved model of its properties. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 3. Pp. 84-97. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_84

## Введение

Для снижения массы автомобилей при изготовлении деталей кузова внедряется все больше новых материалов, однако проблематичной является сама технология соединения изготавливаемых из них деталей. Применение клеевого соединения широко распространено, поскольку склеенная структура обладает высокой прочностью, она устойчива к трещинам, снижает вибрации, а также улучшает теплоизоляцию и звукоизоляцию. Использование клеевых соединений вместо клепаных может снизить вес на 25 %, повысить прочность на 30 % и снизить стоимость примерно на 10 %. Клеевой шов представляет собой зональное соединение, которое позволяет избегать концентрации напряжений в конструкции, и ее усталостные характеристики могут быть существенно увеличены (в некоторых случаях – более чем в 10 раз [1]), а также повышена коррозионная стойкость [1]. Толщина клеевого слоя зависит от многих факторов: (технологии соединения, формы деталей) и обычно находится в диапазоне 0,25-3 мм [1].

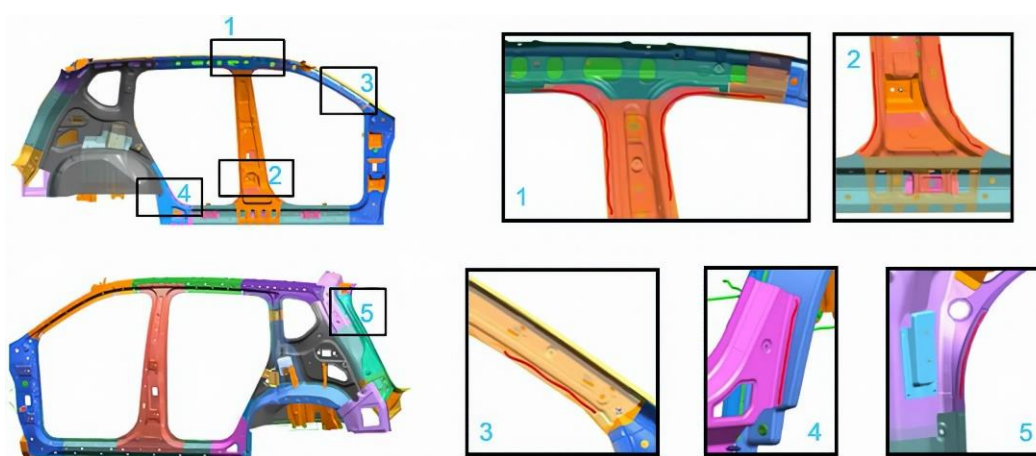


Рис. 1. Распределение конструкционного клея на боковой панели автомобиля

Fig. 1. Spread of structural adhesive on a vehicle side panel

Существует несколько моделей клеевого соединения, позволяющих получить аналитическое решение для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) [2-8].

В некоторых работах [6,7] для моделирования клеевого слоя используются балочные конечные элементы (КЭ), но они не позволяют смоделировать разрушение клеевого слоя. Используются также модели клеевых соединений на базе оболочечных КЭ [5,6], но с их помощью невозможно точно выразить анизотропию клея, поэтому предпочтение отдается применению объемных КЭ. В работе [8] для моделирования средней плоскости основного материала использовались оболочечные КЭ, а для представления связующего клеевого слоя – объемные КЭ (рис. 2). Для представления реакции упругопластического процесса клеевого материала применялся материал *Gurson*, однако он не моделирует повреждения материала.

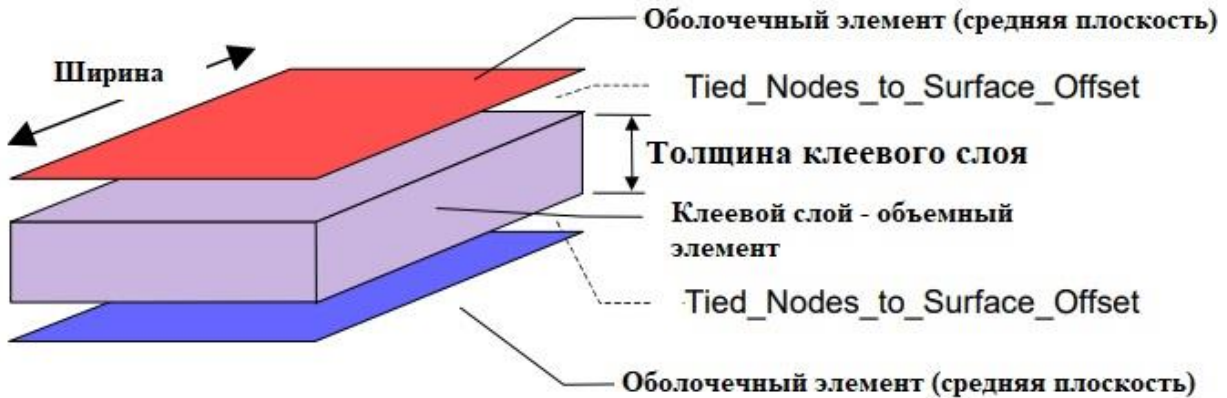


Рис. 2. Схема моделирования клеевого соединения с применением материала Gurson

Fig. 2. Simulation scheme of adhesive joint using Gurson material

В работах [6,7] кривые свойств клеевого материала были ближе к реальным значениям путем поправки модуля Юнга клея с учетом влияния толщины модели клеевого слоя.

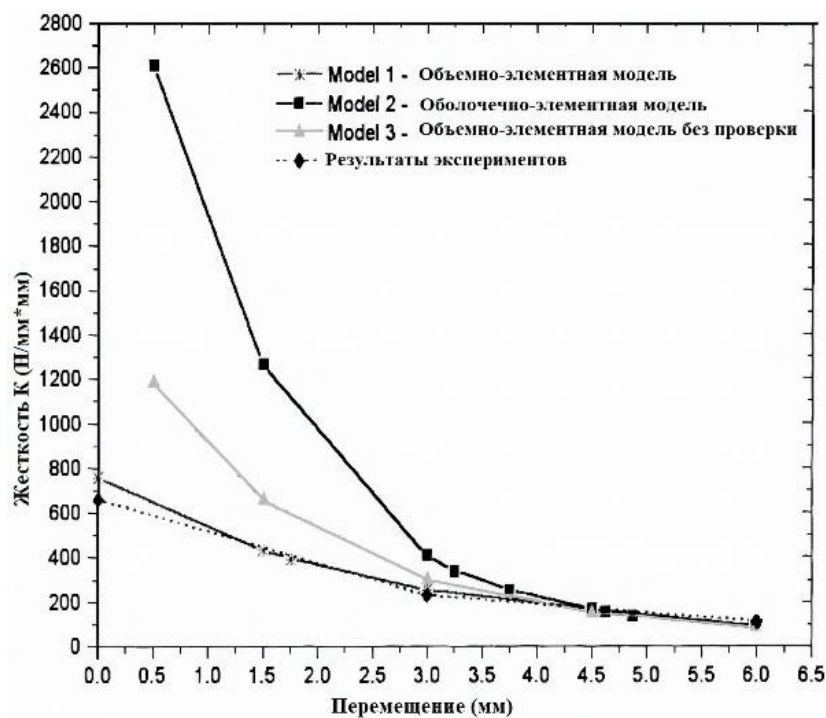


Рис. 3. Кривые «жесткость-перемещение» после коррекции модуля Юнга

Fig. 3. «Stiffness-displacement» curves after Young's modulus correction

В исследованиях [9,10] было установлено, что толщина листа и толщина клеевого слоя оказывают значительное влияние на механические свойства клеевого слоя. Чем больше толщина клеевого слоя и больше ширина листа, тем меньше напряжение сдвига в клеевом слое и тем меньше напряжение на краю зоны перекрытия при одинаковых условиях растяжения. Поэтому требуется более полное изучение влияния толщины клеевого слоя на свойства клеевого соединения.

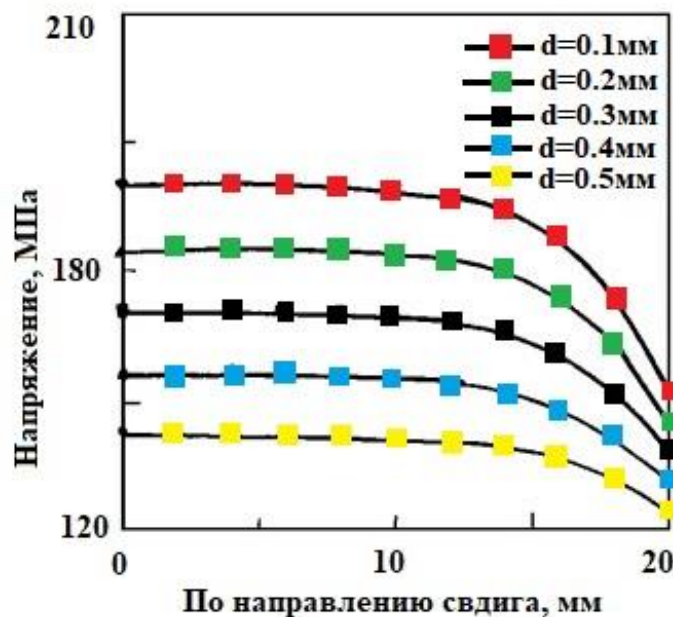


Рис. 4. Распределения напряжения по направлению сдвига с различными толщинами клея

Fig. 4. Stress distributions in the shear direction with different adhesive thicknesses

#### Цель и задачи работы

Целью работы является разработка модели клеевого соединения, которую можно применить в кузовах автомобилей. Модель разработана на базе метода конечных элементов; использована также оценка полученных результатов моделирования с позиций погрешности и эффективности с помощью программного комплекса LS-DYNA.

Задачи:

- разработка конечно-элементной модели (КЭМ) клеевого соединения и ее оценка с позиций погрешности расчета при различных квазистатических нагрузках;
- разработка метода моделирования клеевого соединения применительно к моделированию конструкций автомобиля с целью оценки основных параметров (прочность, жесткость и др.);
- экспериментальное определение механических характеристик и математического конститутивного уравнения клеевого соединения с учетом разрушения клеевого слоя;
- верификация КЭМ путем сравнения результатов численных и экспериментальных исследований.

#### Конститутивное уравнение восьмиузлового объемного конечного элемента клеевого материала

Для описания элементов клеевого соединения рассматриваем КЭ клеевого материала в виде объемного с восемью узлами. Распределение внутренних усилий в КЭ показано на рис. 5.

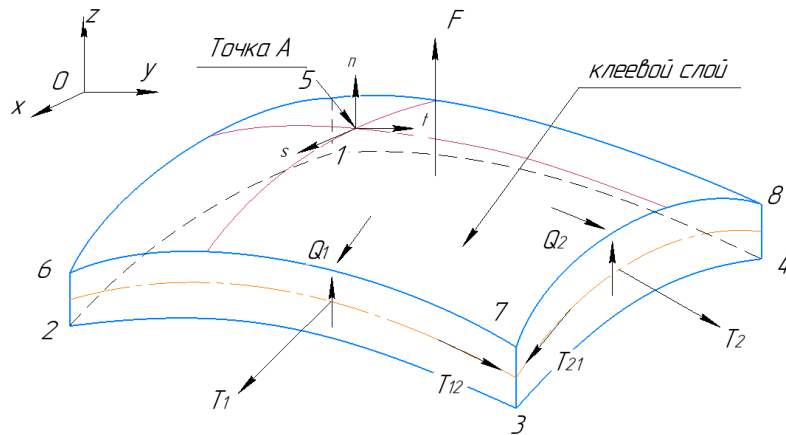


Рис. 5. Распределение внутренних усилий в КЭ клеевого материала

Fig. 5. Distribution of internal forces in the FE of adhesive material

Взаимосвязь между элементным относительным смещением и силой сцепления элементов клеевых материала показана ниже [11].

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta_n}{t_n}, \varepsilon_s = \frac{\Delta_s}{t_s}, \varepsilon_t = \frac{\Delta_t}{t_t} \tag{1}$$

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} = \mathbf{K} \boldsymbol{\varepsilon}, \tag{2}$$

где  $K$  – матрица жесткости. В трехмерной задаче номинальное напряжение  $t$  связанного элемента состоит из трех компонентов  $t_n$ ,  $t_s$  и  $t_t$ , которые представляют собой нормальный ( $t$  направления) и тангенциальный ( $n$  и  $s$  направления) компоненты соответственно.

Общим критерием разрушения является критерий квадратичного напряжения, который составляет:

$$\left(\frac{\sigma_{rr}}{\sigma_{rr}^F}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau^F}\right)^2 = 1 \tag{3}$$

Под действием внешней силы вектор смещения в направлении  $i$  в глобальной системе координат равен  $\vec{\Delta}_i$ , тогда можно получить:

$$\vec{\Delta}_i = \vec{u}_i^+ - \vec{u}_i^- = N_k \vec{u}_{ki}^+ - N_k \vec{u}_{ki}^- = N_k \vec{u}_{ki}, \tag{4}$$

где  $\vec{u}_{ki}$  – смещение точки  $k$  в направлении  $i$ ;  $N_k$  – стандартная функция Лагранжа.

Для любой точки также можно использовать локальную систему координат. Определим касательную плоскость с помощью  $\vec{v}_\xi$  и  $\vec{v}_\eta$ .

Можно определить тензор изменения из локальной системы координат в глобальную систему координат (от направления  $s$  локальной системы координат к направлению  $i$  глобальной системы координат) как  $\theta_{si}$ .

Тогда относительное смещение в локальной системе координат равно

$$\delta_s = \theta_{si} \Delta_i = \theta_{si} N_k u_{ki} = B_{sik} u_{ki} \tag{5}$$

Также можно определить оператор  $D_{sr}$ , чтобы связать натяжение  $\tau_s$  и деформацию  $\Delta_i$ , где  $\tau_s = D_{sr} \Delta_i$ .

По принципу виртуальной работы для клеевого слоя можно записать следующее уравнение:

$$\int_S d \delta_s \tau_s dS - f_{ki} du_{ki} = 0 \tag{6}$$



Подставляя уравнение (4) и (5) в уравнение (6), получаем

$$\int_S B_{sik} D_{sr} N_k dS u_{ki} = f_{ki} \quad (7)$$

Поскольку  $K_{ikvz} * u_{ki} = f_{ki}$ , где  $K_{ikvz}$  - жесткость клеевого материала, то можно получить жесткость клеевого материала

$$K_{ikvz} = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} B_{sik} D_{sr} N_k \left| \vec{v}_\xi \times \vec{v}_\eta \right| d\xi d\eta \quad (8)$$

### Экспериментальные определения механических характеристик клеевого материала

Силовые элементы кузова легкового автомобиля испытывают сложное напряженно-деформированное состояние [1]. Поэтому модель клеевого соединения должна позволять рассчитывать НДС при реальных нагрузках. Однако для такого соединения одними из наиболее опасных является работа на разрыв и сдвиг [6]. Поэтому для разработки модели использовались результаты испытаний на разрыв и сдвиг клеевого материала с целью определения и исследования механических свойств материалов при квазистатических нагрузках. Испытание на разрыв и сдвиг проводилось в соответствии со стандартами ASTM. Марка клеевого материала – DOW1482, марка стали – DP600.

Для промышленного измерения свойств клеевого материалов обычно придерживаются международного стандарта ISO 11003-2-2019 [10], но этот метод не применим для измерения свойств клеевого соединения в автомобильном корпусе поскольку не позволяет учесть анизотропию клеевого материала. Испытательная схема ISO 11003-2-2019 показана на рис. 6.

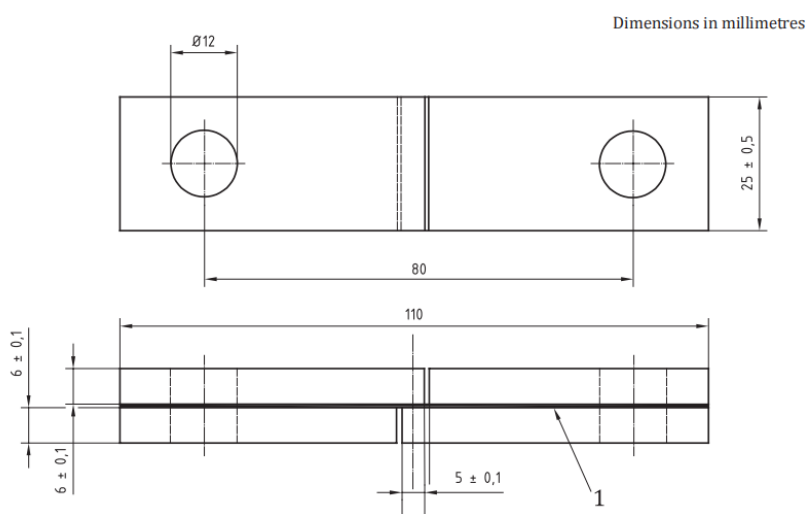


Рис. 6. Образец для измерения свойства клея по стандарту ISO 11003-2-2019

Fig. 6. Sample for measuring of adhesive properties as per ISO 11003-2-2019

Толщина клеевого соединения в автомобилестроении не является регламентированной, поэтому необходимо проводить измерение ее реального значения. Квазистатические испытания проводились на гидравлической машине с сервоприводом, используемой для испытания материалов, смещение образца измерялось экстензометром, а скорость нагружения при испытаниях составляла 0,125 мм/с.



Рис. 7. Экспериментальная установка для измерений

Fig. 7. Pilot installation for measurements

С помощью указанных выше экспериментальных устройств были получены НДС клеевого материала (рис. 8).

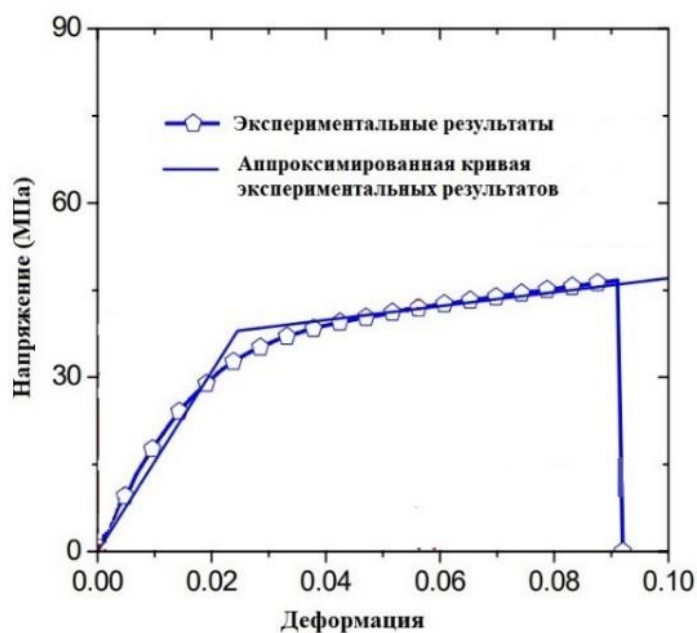


Рис. 8. Графики зависимости напряжения-деформации клея DOW1482 при растяжении

Fig. 8. Stress-strain dependence graphs for DOW1482 adhesive under tension

Из рис. 8 видно, что у аппроксимированной кривой результатов эксперимента есть две точки излома, и процесс деформации состоит из трех стадий: стадии упругой деформации, стадии пластической деформации и стадии разрушения.

Полученные механические характеристики клея показаны в табл. 1.

Таблица 1.

Механические характеристики клея при квазистатической нагрузке

Table 1.

Mechanical characteristics of the adhesive under quasistatic load

Модуль Юнга, ГПа	Предел текучести, МПа	Коэффициент Пуассона	Модуль упрочнения, ГПа
1,55	38	0,43	0,12

Из уравнения (3) следует, что характеристики разрушения клеевого соединения в основном определяются двумя значениями – максимальным нормальным напряжением  $\sigma_{rr}^F$  и максимальным напряжением сдвига  $\tau^F$ . Экспериментально установлено, что при квазистатическом нагружении  $\sigma_{rr}^F = 163$  МПа и  $\tau^F = 38$  МПа для материала DOW1482 [11]; это означает, что для клеевых соединений разрушение более вероятно при растяжении, чем при сдвиге.

Для более полного определения параметров разрушения и других характеристик клеевого соединения проведено сравнение результатов четырех одинаковых испытаний на разрыв и сдвиг. Размеры испытательного образца показаны на рис. 9.

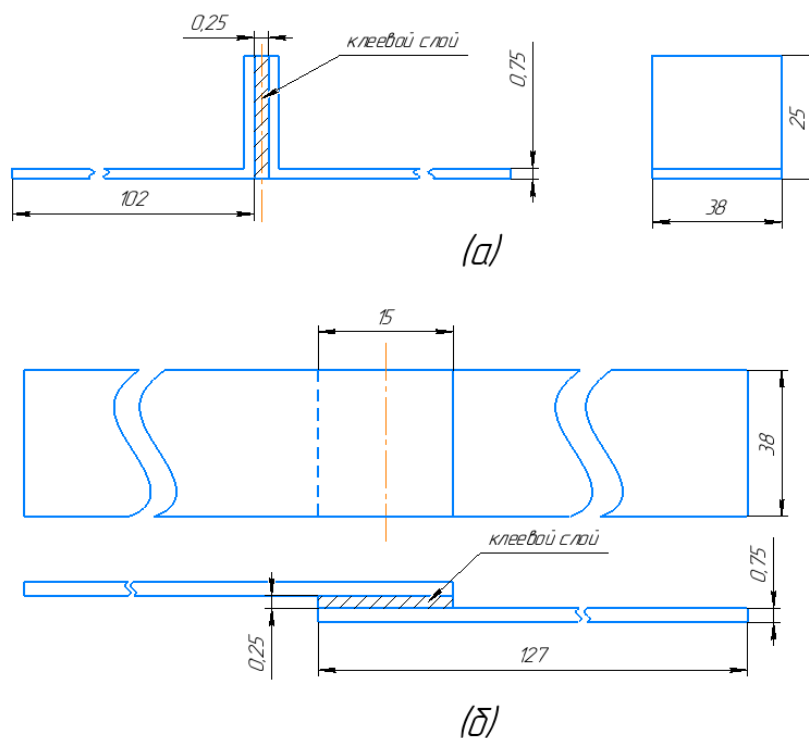


Рис. 9. Размер образца клеевого соединения «встык» (а) и «внахлест» (б)

Fig. 9. Adhesive joint sample size: «butt» (a) and «lap» (b)

Подобно испытанию материала на разрыв и сдвиг, испытание по определению характеристик клеевого соединения «встык» и «внахлест» при квазистатическом нагружении проводилось на гидравлической машине с сервоприводом. Результаты четырех экспериментов по направлениям «встык» и «внахлест» показаны на рис. 10.

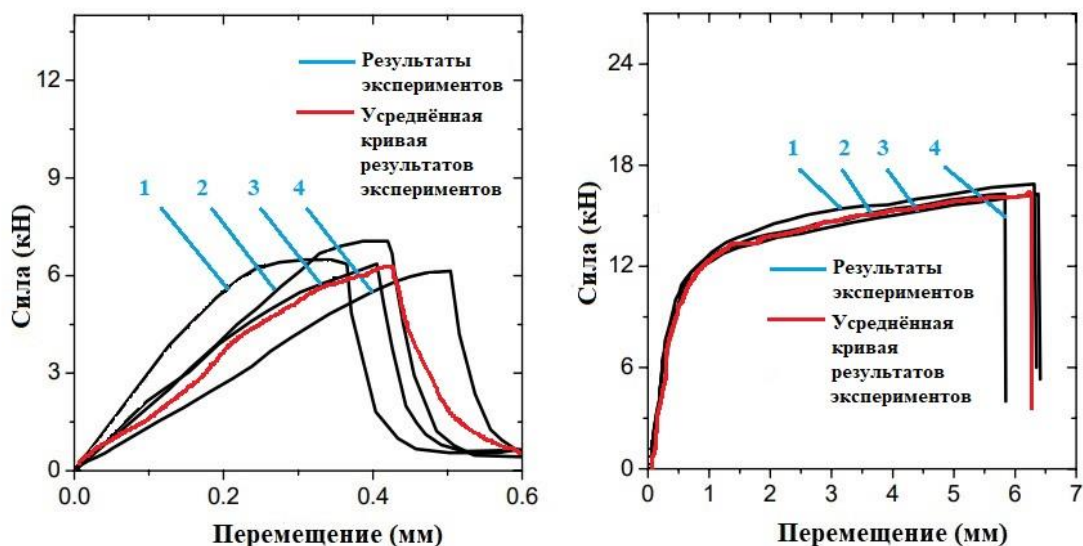


Рис. 10. Графики изменений сила-перемещение при квазистатических испытаниях для соединений «встык» (а) и «внахлест» (б)

Fig. 10. Graphs of force-displacement changes during quasistatic tests for «butt» joints (a) and «lap» joints (b)

### Моделирование клеевого соединения в программном комплексе LS-DYNA

Как правило, для моделирования кузова легкового автомобиля используются оболочечные конечные элементы. Они обеспечивают получение необходимой точности результатов при приемлемом времени решения задач [6]. При этом их плоскость располагается в срединной поверхности основного материала. Слой клея моделируется объемными КЭ, а соединение между ними и элементами кузова реализуется посредством клеевого контакта (CONTACT\_TIE) в программном комплексе LS-DYNA.

Для испытательного образца (рис. 9(б)) построена КЭМ для расчетов в программном комплексе LS-DYNA (рис. 11). Расчет проводился при скорости растяжения 0,125 мм/с в течение 50 с. Поскольку минимальный шаг по времени тесно связан с размером сетки КЭМ и скоростью звука внутри материала, расчет кузова будет весьма длительным. С целью экономии времени скорость растяжения увеличена до 1,25 мм/с, при этом общее время расчета составляет всего 5 с.

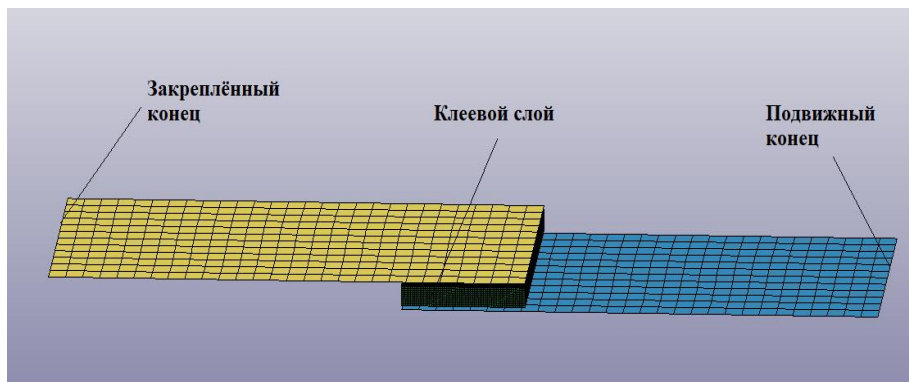


Рис. 11. КЭМ клеевого соединения «внахлест»

Fig. 11. FEM of «lap» adhesive joint

Расчетная характеристика изменений силы показана на рис. 12.

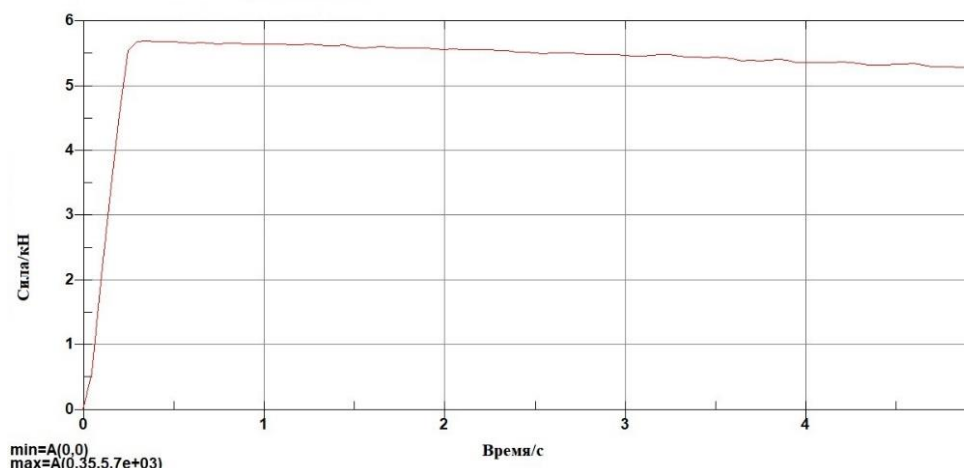


Рис. 12. Изменения силы в клеевом слое

Fig. 12. Changes of force in adhesive layer

Сравнение расчетных значений с экспериментальными данными (рис. 10(б)) показывает, что существует большая погрешность вычисленных значений максимальной силы растяжения: в результате моделирования максимальное усилие на растяжение составляет 5,7 кН, а в результате эксперимента усилие разрушения составляет около 13 кН. Большая погрешность связана, прежде всего, с неправильным представлением толщины клеевого слоя из-за приведения КЭ оболочечного типа к срединной поверхности в реальной конструкции при генерации сетки КЭ. Это указывает на то, что параметры модели материала нуждаются в корректировке.

### Корректировка параметров модели клеевого материала

Как отмечалось, вышеуказанная модель использует оболочечные КЭ для представления срединной плоскости основного материала, а клеевой слой моделируется объемными КЭ, полностью заполняя зазор между двумя пластинами. Таким образом, как показано на рис. 13, при моделировании толщина слоя клея составляет 1 мм, а фактическая толщина слоя клея – всего 0,25 мм. Это одна из причин возникновения погрешности моделирования.

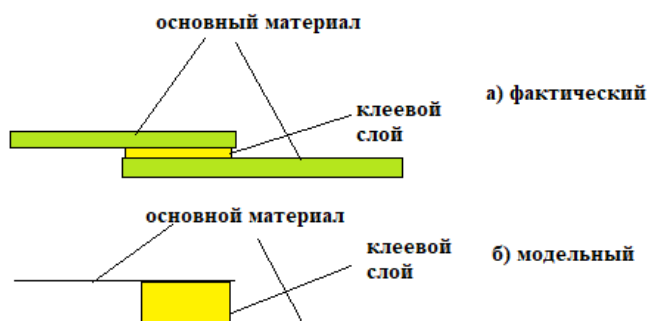


Рис. 13. Схема изменения толщины клеевого соединения в КЭМ

Fig. 13. Scheme of adhesive joint thickness change in FEM

Существует два метода решения этой проблемы. Один из них – метод коррекции геометрии, при котором объемные элементы получают реальную толщину клеевого слоя в модели, а между объемными и оболочечными элементами моделируемого основного материала оставляется необходимое расстояние. Castagnetti [12] использовал этот метод для моделирования клеевых соединений и получил более точные результаты моделирования. Метод коррекции на основе только геометрии трудно применить в модели клеевых соединений в автомобиле, поскольку этих соединений много, и толщина клеевого слоя имеет разброс в диапазоне 0,25-3 мм, а сетка КЭ генерируется автоматически. При этом также необходимо учитывать, что использование реальной толщины клеевого слоя оказывает большое влияние на точность моделирования. Другой метод основан на коррекции параметров материала, его применил Beevers [7]. Он скорректировал начальную жесткость клеевого соединения путем увеличения модуля Юнга в модели материала клея. Однако изменение модуля Юнга в модели материала будет влиять только на фазу упругой деформации материала. Для модели материала, которую используем мы, также необходимо модифицировать процесс пластической и смешанной деформации. Кроме того, надо учитывать, что важным критерием является также способность модифицированной модели эффективно работать при различных нагрузках.

Механическое поведение склеенного материала характеризуется тремя параметрами, а именно  $E$ ,  $\sigma_0$  и  $E_t$ . На рис. 14 представлена схема нагружения при однонаправленной растягивающей нагрузке, где элементы  $a$  и  $b$  представляют собой элементы с увеличенной и с фактической толщинами соответственно.

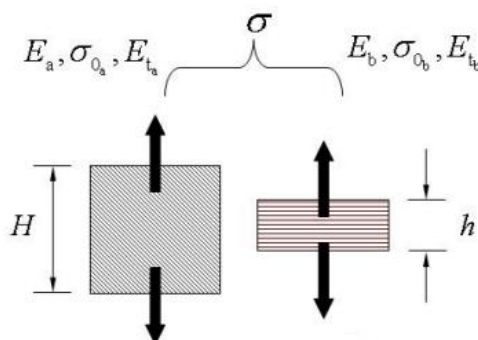


Рис. 14. Схема нагружения элементов с увеличенной и фактической толщинами

Fig. 14. Scheme of loading of elements with increased and actual thicknesses

Деформация по направлению толщины представлена в уравнении (9).

$$\begin{cases} \delta_e = \frac{\sigma}{E} t & (\sigma < \sigma_0) \\ \overline{\delta_e} = \frac{\sigma}{E} t = \frac{\sigma_0}{E} t & (\sigma = \sigma_0) \\ \delta_p = (\sigma - \sigma_0) \left( \frac{1}{E_t} - \frac{1}{E} \right) t & (\sigma > \sigma_0), \end{cases} \quad (9)$$

где  $\delta_e$ ,  $\overline{\delta_e}$  и  $\delta_p$  – упругая деформация, деформация по текущему моменту и пластическая деформация материала соответственно;  $\sigma$  – напряжение элемента клеевого материала;  $t$  – толщина элемента.

Для того, чтобы деформации элемента  $a$  по направлению толщины и элемента  $b$  были одинаковыми при одном и том же напряженном состоянии, необходимо скорректировать параметры материала. Все три вышеуказанные величины необходимо откалибровать. Для того, чтобы деформация толщины клеевого слоя соответствовала фактической, необходимо:

$$\begin{cases} \delta_{ea} = \delta_{eb} & (\sigma < \sigma_0) \\ \delta_{ea} = \delta_{eb} & (\sigma = \sigma_0) \\ \delta_{pa} = \delta_{pb} & (\sigma > \sigma_0) \end{cases} \quad (10)$$

С учетом уравнений (9) и (10):

$$\begin{cases} E_a = E_a * \frac{H}{h} \\ \sigma_{0a} = \sigma_{0b} \\ E_{ta} = E_{tb} * \frac{H}{h} \end{cases} \quad (11)$$

Уравнение деформации в направлении сдвига аналогично уравнению (11), т.е.

$$\begin{cases} G_a = G_a * \frac{H}{h} \\ \gamma_{0a} = \gamma_{0b} \\ G_{ta} = G_{tb} * \frac{H}{h} \end{cases} \quad (12)$$

Можно видеть, что модуль Юнга увеличивается пропорционально толщине, но предел текучести не изменяется независимо от направления (независимо от заданной толщины материала). Тем самым соответствующие параметры модифицируются. Результаты моделирования показаны на рис. 15.

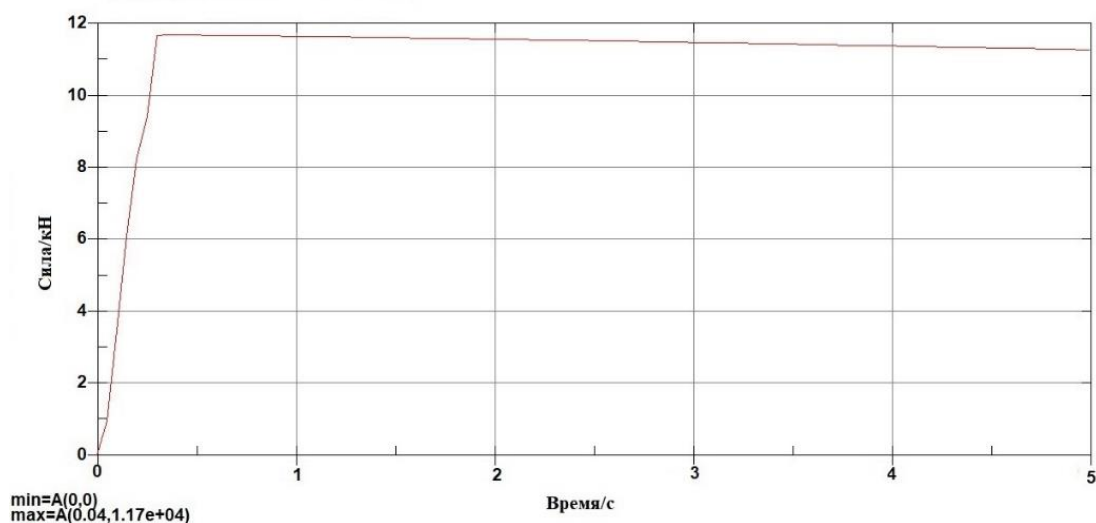


Рис. 15. Изменения напряжений в клеевом слое после коррекции свойств

Fig. 15. Changes of stresses in adhesive layer after correction of properties

Сравнивая рис. 15. и рис. 11(б), можно сделать вывод, что вычислительные ошибки обоих вариантов составляют 54 и 12 % соответственно. Из приведенных выше результатов моделирования можно предположить, что коррекция параметров модели, вероятно, будет также эффективна и при соединении «встык».

### Расчет модели «встык» при квазистатическом нагружении

Для расчета составлена КЭМ (рис. 16), аналогичная применяемым ранее (рис. 9(а) и 10(а)).

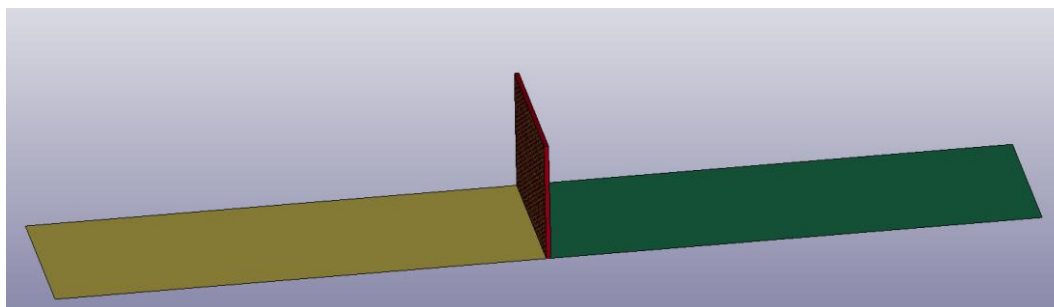


Рис. 16. Модель клеевого соединения «встык»

Fig. 16. «Butt» adhesive joint model

Расчет проводился с параметрами материала без корректировки и с корректировкой соответственно, расчетные значения растягивающей силы представлены на рис. 17.

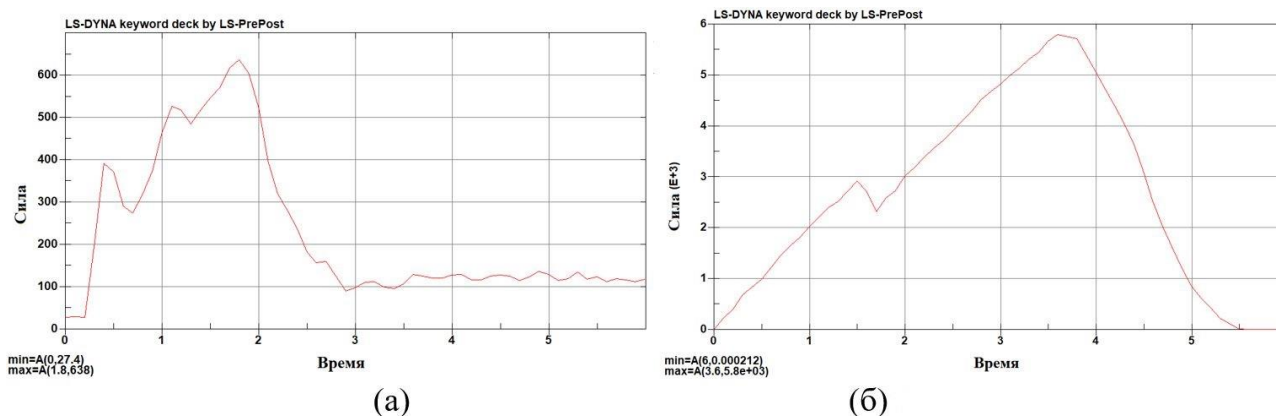


Рис. 17. Графики изменений силы в соединении конструкции «встык» без корректировки параметров материала (а) и с корректировкой их (б)

Fig. 17. Graphs of force changes in the structure «butt» joint without correction of the material parameters (a) and with their correction (b)

По сравнению с рис. 10 (а) видно, что погрешность расчета моделирования параметров с корректировкой составляет 12 %. Это значительное усовершенствование по сравнению с точностью расчета без корректировки, которая составляла 84 %.

### Заключение

1. Предложен метод коррекции модуля Юнга и модуля затвердевания материала применительно к расчету клеевых соединений «встык» и «внахлест» в автомобильных конструкциях, повышающий точность моделирования при многовариантных расчетах с помощью программного комплекса *LS-DYNA*;
2. При моделировании с коррекцией свойств клеевого материала для соединения «внахлест» погрешность расчета уменьшается с 54 до 12 %, для соединения «встык» – с 84 до 12 %.

Необходимо учитывать также влияние изменений характеристик материала в зависимости от толщины клеевого соединения при его моделировании применительно к конструкциям автомобилей при квазистатическом нагружении.



**Библиографический список**

1. **Зузов, В.Н.** Совершенствование конструкции корпуса кузова легкового автомобиля на стадии проектирования для обеспечения требований пассивной безопасности при кософронтальном ударе / В.Н. Зузов, И.В. Зузов // *Машиностроение*. 2013. № 1. С. 60-71.
2. **Xia Y** Johnson NL, Gayden XQ and Fickes JD. Development of high efficiency modeling technique for weld-bonded steel joints in vehicle structures, Part I: Static experiments and simulations. *Int J Adhesion Adhesives*, 2009. № 29. P. 414-426.
3. **Xia Y** Gayden XQ and Fickes JD. Development of high efficiency modeling technique for weld-bonded steel joints in vehicle structures, Part II: Dynamic experiments and simulations. *Int J Adhesion Adhesives*, 2009. № 29. P. 427-433.
4. **Carpenter W C** Two finite elements for modelling the adhesive in bonded configurations. *J Adhesion*, 1989. № 30. P. 25-46.
5. **Su C.** An elastic-plastic interface constitutive model: application to adhesive joints. *Int J Plast*, 2004. № 20. P. 2063-2081.
6. **Thomas C.** Adhesive Joining for Crashworthiness CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2008.
7. **Beevers A.** Analysis of stiffness of adhesive joints in car bodies. *J Mater Process Tech*, 2001. № 118. P. 96-101.
8. **Alexander.** Crash stable adhesives in application and simulation. LS-DYNA user conference, 2006.
9. **Shi Y.** Effect of Elastic Modulus and Thickness of Adhesives on the Stress Distribution in Weld-bonded Joints *Materials Engineering*, 1998. № 5. P. 19-13.
10. **Chang B.** Study on the Effect of Weld Spot Size on the Stress Distribution in Weld-bonded Joints. *Scientific achievements*, 1999. № 1. P.22-24.
11. **Xin Y.** Study of Modeling Techniques of Weld-Bonded Joints under Impact Loading. Tsinghua University for the degree of Doctor of Engineering, 2010.
12. **Castagnetti D.** Standard finite element techniques for efficient stress analysis of adhesive joints. *Int J Adhesion Adhesives*, 2009. № 29. P. 125-135.
13. **Wang R X.** Strength of adhesive joints with adherend yielding: II. Peel experiments and failure. *J Adhesion*, 2003. № 79. P. 49-66.
14. **Wang J.** Simulation Technology of Deformation of Rubber Welding Body Structure under Large Impact Load [MA]. *Automotive Engineering*, Tsinghua University, 2006.
15. **Guo Z.** Adhesive bonding applications for aluminum alloy structures Defense Industry Press, 1993.

*Дата поступления  
в редакцию: 13.05.2022*

УДК 629

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_98

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХОДА МАШИНЫ ПЛАНИРОВЩИКА И ЧИСЛА ОБОРОТОВ ФРЕЗЫ НА СИЛУ РЕЗАНИЯ СНЕЖНО-ЛЕДОВОЙ МАССЫ ТОРОСА

**И.С. Никандров**

ORCID: 0000-0001-9502-0298 e-mail: mnnd@mail.ru

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

ORCID: 0000-0002-2429-0685 e-mail: al.malygin.dpi@yandex.ru

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

ORCID: 0000-0002-1330-7840 e-mail: ktmdpingtu@mail.ru

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

ORCID: 0000-0003-2941-2669 e-mail: krasnov1955@internet.ru

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

Рассматривается проблема очистки ледового покрова от торосов. Экспериментально обоснован технологический режим очистки поверхности льда фрезой новой конструкции. Представлено новое техническое решение по разрушению торосов. Изучено влияние скорости и глубины резания смерзшейся снежно-ледовой массы тороса на величину силы резания единичным резцом. Получена зависимость силы резания от хода ледорезной машины и числа оборотов шнековой фрезы, установленной на ней. Определена область оптимальных технологических параметров для шнековой фрезы диаметром 1 м. Полученные зависимости сил резания от хода машины позволили определить силовые нагрузки на элементах фрезы и требуемую мощность на ее валу. Использование теории разрыва снежно-ледовой массы при оптимальной расстановке режущих элементов на линии образующей позволило определить ширину режущей кромки резца для снижения энергоемкости процесса резания.

**Ключевые слова:** торосы, машина-планировщик, шнековая фреза, снежно-ледовая масса, резание, сила резания.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Никандров, И.С. Исследование влияния хода машины планировщика и числа оборотов фрезы на силу резания снежно-ледовой массы тороса / И.С. Никандров, А.Л. Малыгин, А.Д. Шурашов, Ю.В. Краснов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 98-105. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_98

## STUDY OF EFFECT OF SURFACE PLANING MACHINE TRAVEL AND EFFECT OF CUTTER REVOLUTIONS NUMBER ON HUMMOCK SNOW-AND-ICE BULK CUTTING FORCE

**I.S. Nikandrov**

ORCID: 0000-0001-9502-0298 e-mail: mnnd@mail.ru

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

**A.L. Malygin**ORCID: 0000-0002-2429-0685 e-mail: [al.malygin.dpi@yandex.ru](mailto:al.malygin.dpi@yandex.ru)

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

*Nizhny Novgorod, Russia***A.D. Shurashov**ORCID: 0000-0002-1330-7840 e-mail: [ktmdpingtu@mail.ru](mailto:ktmdpingtu@mail.ru)

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

*Nizhny Novgorod, Russia***Yu.V. Krasnov**ORCID: 0000-0003-2941-2669 e-mail: [krasnov1955@internet.ru](mailto:krasnov1955@internet.ru)

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

*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Problem of ice cover cleaning from hummocks is considered. Technological mode of ice surface cleaning using a cutter of new design is experimentally substantiated. New technical solution for destruction of hummocks is presented. Effect of speed and depth of cutting of frozen snow-and-ice bulk of hummock by the cutting force intensity using a single cutter, is studied. Dependence of the cutting force on ice-cutting machine travel and revolutions number of worm-screw cutter installed on it, is obtained. Space of optimal technological parameters for a worm-screw cutter with diameter of 1 m, is determined. Obtained dependences of the cutting forces on the machine travel allowed to determine power loads at the cutter elements and required power at its shaft. Use of the theory of rupture of snow-and-ice bulk with optimal arrangement of cutting elements on the line of generatrix, made it possible to determine the width of cutting edge of cutter to reduce the energy intensity of cutting process.

**Key words:** hummocks, planning machine, screw milling cutter, snow and ice mass, cutting, cutting force.

**FOR CITATION:** I.S. Nikandrov, A.L. Malygin, A.D. Shurashov, Yu.V. Krasnov. Study of effect of surface planning machine travel and effect of cutter revolutions number on hummock snow-and-ice bulk cutting force. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 3. Pp. 98-105. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_98

**Введение**

Образование торосов на поверхности ледового покрова водоемов проходит в период ледостава. Постепенно из-за заноса снегом на них образуются смерзшиеся снежно-ледовые образования. При выполнении сезонных технологических работ, связанных с прокладкой трубопроводов, электрических кабелей, линий связи или транспортных трасс очистка ледовых поверхностей от сформировавшихся на них снежно-ледовых образований становится обязательной операцией обеспечения работы технологических комплексов на ледовом покрове водоема. Планирование поверхности неизбежно связано с резанием снежно-ледового материала и удалением снежно-ледовой массы с площади обслуживания технологического оборудования, работающего на льду. При использовании для планирования ледовой поверхности очистки ее от торосов машины-планировщика с горизонтальной шнековой фрезой резание снежно-ледового образования тороса выполняется множеством единичных резцов, расставленных по режущим кромкам шнека (рис. 1).

В общем случае взаимодействие фрезы с разрушаемым смерзшимся массивом снежно-ледового образования следует рассматривать как взаимодействие единичного резца с единичным объемом массы снежно-ледового образования.

Исследовали резание замороженных блоков снежно-ледовой массы с долей снега 0,4 от общей массы. Смесь льда и снега с размером частиц менее 3 см заливали нахоложенной водой с температурой 0 °С и ставили в морозильную камеру. Для экспериментального исследования процесса резания готовили два вида смерзшихся снежно-ледовых блоков с размерами первого 400x300x200 мм и второго 300x200x100 мм.



**Рис. 1. Работа машины-планировщика с горизонтальной шнековой фрезой**

**Fig. 1. Operation of a surface planing machine with horizontal worm-screw cutter**

### Экспериментальная часть

Блоки получили замораживанием в пластмассовых формах при  $t = -18-20$  °С смеси воды со снежно-ледовой крошкой в соотношениях, близких к их долям в торосе [1]. Испытания резания блоков первого вида проводили на установке, созданной на основе горизонтального фрезерного станка, описанного в работе [2], а блоки второго вида резали единичным резцом нажатием прецизионным прессом с усилием сжатия 5000 Н [3]. Погрешность замера усилия пресса составляла 0,1 %, ширина резца равна 16 мм. Скорость резания варьировалась в пределах 5,5-50 см/с. Глубина резания (толщина срезаемой стружки) составляла 0,5-5 см. Угол заточки резцов и угол скоса режущей кромки приняли оптимальными, как в работе [4], и равными соответственно 40 и 12°.

Результаты опытов приведены в табл. 1 и 2. Удельное сопротивление резанию снежно-ледовой массы принимали отнесенной к 1 см ширины резца. Результаты брали средними по трем параллельным опытам.

*Таблица 1.*

#### Резание снежно-ледовой массы на фрезерном стенде

*Table 1.*

#### Cutting of snow-and-ice bulk on a milling dummy machine

№ п/п	Глубина резания, см	Скорость резания, см/с	Удельная сила сопротивления резанию, Н/см <sup>2</sup>
1	0,6	5,2	33
2		10,8	31
3		15,2	36
4	1,2	5,8	37
5		12,0	33
6		16,4	35
7		20,5	39
8	2,0	4,4	38
9		10,6	35
10		16,8	40
11		20,8	52

Продолжение табл. 1.

Резание снежно-ледовой массы на фрезерном стенде

Table 1 (continued).

Cutting of snow-and-ice bulk on a milling dummy machine

№ п/п	Глубина резания, см	Скорость резания, см/с	Удельная сила сопротивления резанию, Н/см <sup>2</sup>
12	2,5	6,3	37
13		12,0	41
14		17,5	59
15		20,2	65
16	3,1	4,6	37
17		10,2	34
18		14,7	49
19		18,0	79

Таблица 2.

Резание снежно-ледовой массы единичным резцом с помощью пресса

Table 2.

Cutting of snow-and-ice bulk with a single cutter using a press

№ п/п	Глубина резания, см	Скорость резания, см/с	Удельная сила сопротивления резанию, Н/см <sup>2</sup>
1	0,5	7,6	34
2		10,2	35
3		15,4	36
4		20,5	39
5		30,2	42
6	1	6	36
7		10,8	33
8		16	35
9		20,5	37
10		38,8	40
11	1,5	7,8	34
12		11	32
13		15,2	34
14		20,4	36
15		30,3	38
16	2	6,3	38
17		10,8	41
18		16,2	46
19		20,4	49
20		29,6	54
21	3	7,5	36
22		12,5	36
23		15,6	39
24		20,6	51
25		39,8	74
26	4	10,4	46
27		16	49
28		25	59
29		40,4	82
30	5	10,3	57
31		22	70
32		31,4	86
33		40,8	102

### Обсуждение результатов

Опыты показали, что при глубине резания 2 см и менее сопротивление относительно мало, и удельная сила резания не превышает  $50 \text{ Н/см}^2$  даже при скоростях 20-40 см/с. При дальнейшем увеличении толщины срезаемой стружки сопротивление среды возрастает. Сила резания в интервале 40-50 Н/см сохраняет только при скоростях менее 20 м/с. При увеличении скорости резания больше 20 см/с сопротивление среды пропорционально возрастает. При глубине резания менее 1 см сила резания для скоростей 5-30 см/с практически остается постоянной, меняясь только в пределах  $32-40 \text{ Н/см}^2$ .

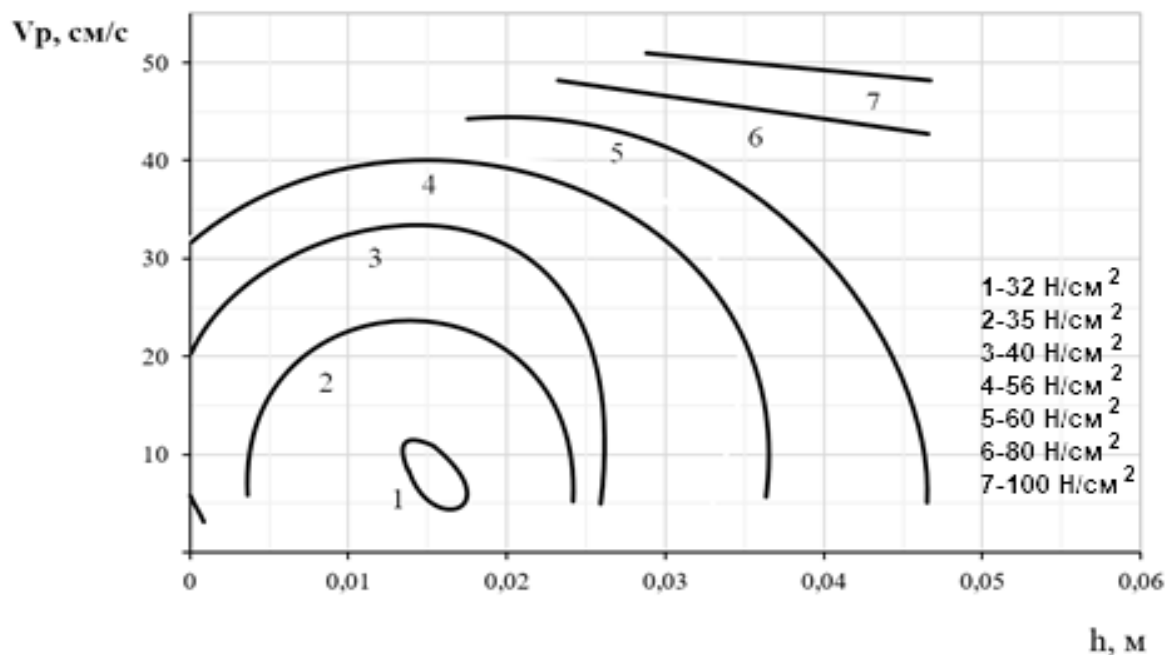
Выполнено сравнение полученных нами данных, экспериментальных значений удельных сил резания, отнесенных к 1 см ширины реза, с расчетными значениями, определенными по уравнению, полученному экспериментально-статистическим методом [2], имеющему вид:

$$q = 219,4 + 71,7 \alpha + 510h - 29,5\alpha h - 94hV_p - 0,084\alpha^2 - 463000h^2 \quad (1)$$

где  $q$  – это удельная сила сопротивления разрушаемой среды резанию, отнесенная к 1 см ширины реза.

Сравнение данных величин показало достаточно высокую сходимость расчетных и экспериментально полученных значений. В данном уравнении  $\alpha$  – угол резания (град),  $h$  – толщина стружки или глубина резания (м),  $V_p$  – скорость резания (см/с). Расхождение экспериментальных и расчетных величин для сопоставимых условий резания не превышало  $\pm 8 \%$ .

Результаты экспериментального определения сопротивления среды резанию показали (рис. 2) наличие области оптимума технологических параметров.



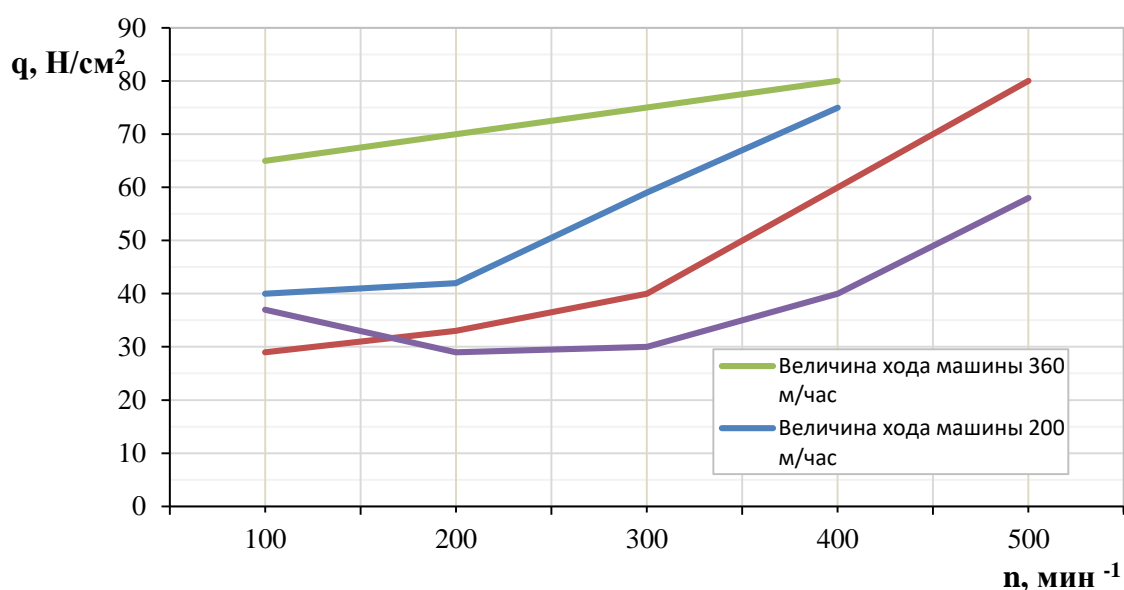
**Рис. 2.** Совместное влияние скорости резания ( $V_p$ ) и глубины резания на положение линии постоянных сил сопротивлений резанию снежно-ледовой массы единичным резцом

**Fig. 2.** Combined effect of cutting speed ( $V_p$ ) and cutting depth on position of line of constant forces of resistance to cutting of snow-and-ice bulk with a single cutter

Как видно из рис. 2, совместное влияние скорости резания ( $V_p$ ) снежно-ледовой массы и глубины резания ( $h$ ), т.е. толщины слоя, срезаемого одним резцом, неоднозначно и носит

экстремальный характер. Область минимума величины силы сопротивления резанию приходится на резание со скоростью 7-10 см/с при глубине резания 1,2-1,8 см. При этом удельная сила резания равна 30-32 Н/см<sup>2</sup> для снежно-ледовой массы с долей снега 0,4 от общей массы, что характерно для большинства торосов. При дальнейшем увеличении скорости резания сопротивление резанию снежно-ледовой массы возрастает в 1,5-2 раза. Сопротивление резанию аналогично возрастает и с дальнейшим увеличением толщины срезаемой стружки.

Полученные данные по резанию достаточно хорошо корректируются с данными Романова В.В. [5], полученным при резании льда ударником КИСИ. Это косвенно подтверждает достоверность наших данных по резанию снежно-ледовой массы при  $t = -20-30$  °С. Поскольку глубина резания определяется ходом машины-планировщика и числом заходов винтовой линии, на которой расставлены резцы на шнековой фрезе, а скорость резания определяется числом оборотов шнека, практический интерес представляет изображения зависимости удельной силы резания от величины хода машины ( $L$ , м/ч) и числа оборотов шнека ( $n$ , об/мин). Данная зависимость представлена на рис. 3.



**Рис. 3. Совместное влияние хода машины-планировщика и числа оборотов фрезы на силу резания снежно-ледовой массы тороса двухзаходной шнековой фрезой диаметром 1 м**

**Fig. 3. Combined effect of surface planning machine travel and the cutter revolutions number on cutting force of snow-and-ice bulk of hummock using a two-thread worm-screw cutter with diameter of 1 m**

В процессе очистки ледовой поверхности от торосовых образований шнековая фреза надвигается на смерзшийся снежно-ледовый слой тороса. При этом разрушение массы тороса происходит при полном блокировании срезаемого резцами слоя льда. Понижение температуры разрушаемой массы также способствует увеличению силы резания и нагрузки на элементы фрезы. Неоднородность состава снежной ледовой массы в торосе приводит к значительным колебаниям нагрузки на резцы (как на высоте резки, так и по фронту очистки). В результате нагрузка на отдельных резцах может меняться в 2-3 раза.

Для шнековой фрезы диаметром 1 м оптимальное значение хода машины-планировщика равно 70-140 м/час, а число оборотов фрезы 200-300 об/мин. При резании клиновым резцом льда или снежно-ледового образования в зоне под острием клина резца действуют развивающиеся сжимающие напряжения. Перпендикулярно боковым поверхностям клина резца действуют растягивающие напряжения, приводящие к образованию трещин вдоль осевой линии режущего клина, распространяющихся по линии расстановки режущих элементов.

При соблюдении условия  $n_t \leq 2,5$  в, рекомендованного Зенковым Р.П. [6], создаются условия для смыкания развивающихся микротрещин в единый разрыв на длину более ширины полушнека фрезы.

Исходя из опыта работы землеройной техники при разработке смерзшегося материала [6], оптимальная расстановка режущих элементов на линии образующей цилиндрическую поверхность шнековой фрезы равна:

$$n = (z - 2,5)v \quad (2)$$

где  $v$  – ширина режущей кромки резца.

Отсюда

$$2,5v = \frac{B}{(z-1)} \quad (3)$$

где  $B$  – ширина одного полушнека фрезы,

$z$  – число резцов на одной шнековой линии.

Толщину резца рекомендуется для льда принять равной 0,5 в.

Схема размещения резцов на шнековой линии фрезы приведена на рис. 4.

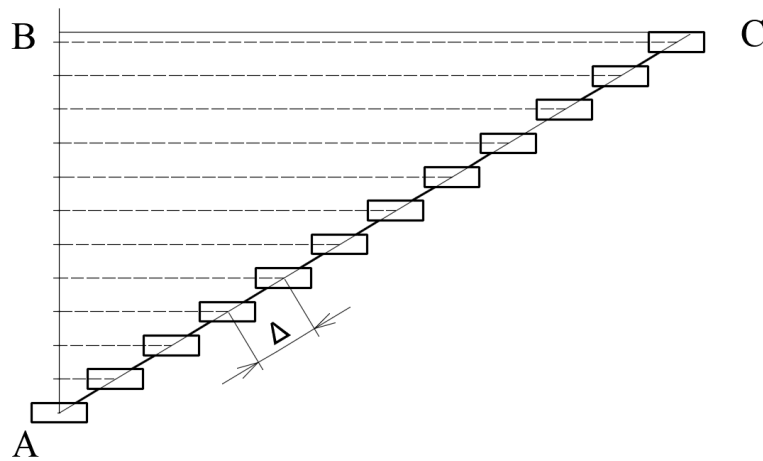


Рис. 4. Схема расстановки резцов на шнековой образующей линии фрезы

Fig.4. Scheme of arrangement of cutters on the line of generatrix of worm-screw cutter

При ширине полушнека АВ, равной 1400 мм, для фрезы диаметром 1000 мм величина ВС равна:

$$BC = \pi D/2 = 1570 \text{ мм} \quad (4)$$

Тогда длина образующей шнековой линии АС равна 2152 мм, а расстояние между резцами на этой линии равно:

$$\Delta = \frac{(AC-B)}{(z-1)} \approx 175 \text{ мм} \quad (5)$$

Необходимая ширина клина резца равна:

$$v = \frac{B}{2,5 \cdot (z-1)} = \frac{1400}{2,5 \cdot 12} = 46,6 \text{ мм} \quad (6)$$



### Заключение

Среднее значение сил сопротивления резанию снежно-торосовых образований можно принять равным  $32 \text{ Н/см}^2$ . Угол заточки клина резцов следует принять равным  $40^\circ$ , угол скоса резца  $12-15^\circ$ .

Для шнековой фрезы диаметром 1 м рекомендуется число оборотов 150-300 об/мин при рабочем ходе машины-планировщика 70-280 м/ч. Для полушнека шириной 1400 мм и диаметром 1000 мм ширину режущей кромки фрезы следует принять равной 46,6 мм.

### Библиографический список

1. **Nikandrov, I.** Structure and property hummock on the river and lake / I. Nikandrov, Dunaev, D. Zolotov, A. Shurashov, A. Gorshkov // Norwegian diurnal of development of the international science. 2018. vol. 1, no.18. P. 46-50.
2. **Никандров, И.С.** Построение математической модели силы резания снежно-ледовой массы / А.Л. Малыгин, И.М. Дунаев, А.А. Кукушкин, В.В. Парамонов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 5. С. 187-191.
3. **Горшков, А.С.** Резание смерзшейся грунто-ледяной массы клиновым резцом / А.С. Горшков, В.Ф. Кулепов, А.Д. Шурашов // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 214.
4. **Горшков, А.С.** Определение характеристик торцевой фрезы для резания грунто-ледяной массы опытными образцами / А.С. Горшков, В.Ф. Кулепов, А.Д. Шурашов, И.С. Никандров, Ю.В. Краснов // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 2. С. 32-36.
5. **Романов, В.В.** Приборы для оценки прочностных свойств разрабатываемых сред / В.В. Романов, А.И. Убитин, Ю.В. Сосевич // Тезисы всесоюзной научно-технической конференции «Повышение надежности и экологических показателей автомобильных двигателей». – Горький, 1990. С. 111.
6. **Зенков, Р.А.** Механика насыпных грузов / Р.Л. Зенков. – М.: Машиностроение, 1964. С. 246.

*Дата поступления  
в редакцию: 08.04.2022*

УДК 629

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_106

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРЕНА КУЗОВА НА ПОПЕРЕЧНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ГРУЗОВОГО ФУРГОНА ПРИ ПОВОРОТЕ

**Тинт Наинг Вин**

ORCID: 0000-0001-8473-1545 e-mail: tintnaingwin1990@gmail.com

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

(Калужский филиал)

*Калуга, Россия***В.М. Алакин**

ORCID: 0000-0002-0250-2245 e-mail: alakin.vic@yandex.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

(Калужский филиал)

*Калуга, Россия*

Исследовано распределение поперечных сил и влияние крена кузова на поперечную устойчивость автомобиля типа «фургон» при режиме скоростного движения на поворотах по вариантам потребной и установленной угловой жесткости подвески. Определены поперечные силы и углы крена кузова фургона при режиме интенсивного движения на поворотах автомобиля с учетом потребной и установленной угловой жесткости подвески. Полученные результаты поперечных сил и угла крена кузова при режиме скоростного движения на поворотах сравниваются, тестируются и предлагаются для модернизации систем поперечной стабилизации серийных грузовых автомобилей типа фургон, а также для будущих исследований по созданию управляемых электромагнитных стабилизаторов. Результаты исследования важны для развития систем поперечной устойчивости, особенно фургонов, обеспечивающих повышение дорожной безопасности.

**Ключевые слова:** автомобиль, поперечная устойчивость, безопасность движения, опрокидывание, плечо крена, поперечные силы, угол крена, угловая жесткость, подвеска, стабилизатор поперечной устойчивости.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Тинт, Н.В. Исследование влияния крена кузова на поперечную устойчивость грузового фургона при повороте / Н.В. Тинт, В.М. Алакин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 106-113. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_106

## STUDY OF EFFECT OF BODY ROLL ON LATERAL STABILITY OF A CARGO VAN WHEN TURNING

**Tint Naing Win**

ORCID: 0000-0001-8473-1545 e-mail: tintnaingwin1990@gmail.com

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University

*Kaluga, Russia***V.M. Alakin**

ORCID: 0000-0001-8473-1545 e-mail: alakin.vic@yandex.ru

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University

*Kaluga, Russia*

**Abstract.** Distribution of transverse forces and effect of the body roll on transverse stability of a van-type vehicle in the mode of high-speed traffic at turns, as per variants of the required and the set roll stiffness of suspension, are studied. Transverse forces and roll angles of the van body are determined in the mode of heavy traffic at turns of the vehicle, taking into account the required and the set roll stiffness of suspension. Obtained results of the transverse forces and the body roll angle in the mode of high-speed traffic at turns are compared, tested and proposed for modernization of roll stabilization systems of production van-type trucks, as well as for future study on creation of controllable elec-

tromagnetic stabilizers. Results of the study are important for development of lateral stability systems, especially vans, which are to ensure the road safety improvement.

**Key words:** vehicle, lateral stability, traffic safety, rollover, roll arm, lateral forces, roll angle, angular stiffness, suspension, anti-roll bar.

**FOR CITATION:** Tint Naing Win, V.M. Alakin. Study of effect of body roll on lateral stability of a cargo van when turning. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 3. Pp. 106-113. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_106

## Введение

Поперечная устойчивость грузовых автомобилей типа «фургон» в процессе интенсивного движения на поворотах в значительной степени определяет безопасность движения и сохранность человеческой жизни и груза. Опрокидывание или скольжение скоростных грузовиков является одним из наиболее распространенных случаев дорожно-транспортных происшествий [1]. В отечественных и особенно зарубежных автомобилях применяются многочисленные системы механического и автоматического управления с положением кузова относительно подвески с целью восстановления вертикального положения автомобиля в движении. Вопросы исследования поперечной устойчивости автомобиля рассмотрены в многочисленных работах российских и зарубежных ученых [1-6]. Установлено, что на поперечную устойчивость автомобиля типа «фургон» значительное влияние оказывает крен подрессоренной массы, особенно при режиме скоростного движения на поворотах. Под действием боковой силы изменяются нагрузки на упругие элементы подвески и шины левой и правой сторон автомобиля, вследствие чего кузов фургона наклоняется в поперечном направлении [6]. Поэтому комфорт поездки, управляемость и устойчивость на дороге фургонов в режиме скоростного движения на поворотах должны обеспечиваться более современными техническими решениями. Рычажный стабилизатор поперечной устойчивости улучшает управляемость автомобиля за счет повышения устойчивости при криволинейном движении, но при этом имеет ряд существенных недостатков. Также он не предполагает применение системы автоматического управления положением кузова на поворотах. Поэтому для повышения поперечной устойчивости автомобиля и сцепления шин с дорогой необходимо совершенствовать устройства стабилизации в направлении разработки комбинированных систем, адаптированных к режиму интенсивного движения на поворотах.

Прогрессивные решения в данном направлении возможны, когда исследованы динамические и силовые параметры транспортного средства типа «фургон» при эксплуатации в режиме интенсивного движения на поворотах (средняя эксплуатационная скорость на повороте, поперечные силы, угол крена высокого кузова, связанные с плечом крена, массой и высотой транспортного средства и расположения его центра тяжести при полной погрузке). Результирующая боковая и вертикальная нагрузка на шину при повороте будет также определять устойчивость автомобиля по скольжению на поворотах, что, в свою очередь, определяет его устойчивость в целом [7]. Поэтому на этапе исследований поперечной устойчивости модернизируемого серийного автомобиля типа «фургон» установлены пределы расположения центра тяжести при полной погрузке, поперечных сил, угловых жесткостей подвески и величина угла крена при повороте на горизонтальной дороге с учетом реальных значений конструкции модернизируемого автомобиля, скорости и радиуса поворота.

## Исследование поперечных сил, угловой жесткости подвески и угла крена кузова грузового фургона на примере ГАЗель NEXT

Для решения задачи по повышению устойчивости автомобиля предложили частные методики, зависимости и провели анализ поперечных сил, угловой жесткости подвески и крена кузова на примере конструкции и эксплуатации серийного фургона ГАЗель NEXT (рис. 1).



Рис. 1. Экспериментальная машина ГАЗель NEXT

Fig. 1. GAZelle NEXT experimental vehicle

На первом этапе предложена методика и зависимости исследования поперечных сил  $P_{ky}$  эксплуатации серийных фургонов с полной нагрузкой при интенсивном движении на поворотах. Для реализации методики составлена схема наклона кузова (рис. 2).

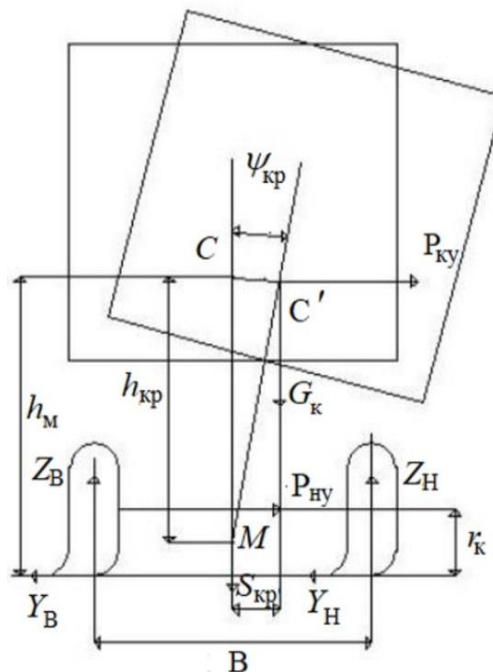


Рис. 2. Схема к определению боковой силы инерции и угла крена кузова на повороте

Fig. 2. Scheme for determining of lateral force of inertia and the body roll angle at turn

При движении на повороте автомобиля (рис. 2) значение поперечной силы  $P_{ky}$  исследовали при изменении значений скорости движения  $v$  фургона и радиусов дуги поворота  $R$  по формуле [8,9]:

$$P_{ky} = \frac{M v^2}{R}, \quad (1)$$

где  $M$  – масса кузова грузового фургона,  $v$  – скорость автомобиля на повороте,  $R$  – радиус поворота автомобиля.

Распределение поперечной силы  $P_{ky}$  на переднюю  $P_{ky1}$  и заднюю  $P_{ky2}$  оси определяется по формуле [8,9]:

$$P_{ky1} = P_{ky} \frac{b}{L}, \quad (2)$$

$$P_{ky2} = P_{ky} \frac{a_M}{L}, \quad (3)$$

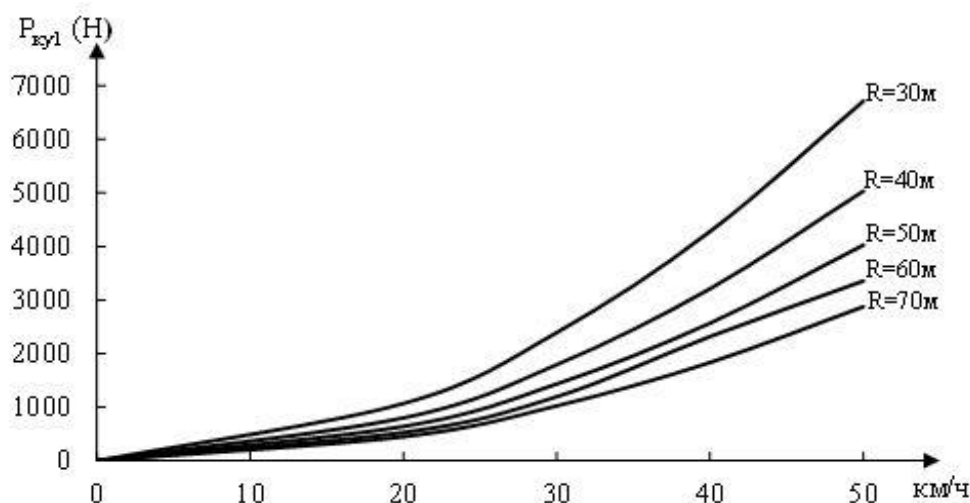
где  $a_m$  – расстояние от центра масс до осевой точки переднего моста машины;  $b$  – расстояние от центра масс до осевой точки заднего моста;  $L$  – колесная база автомобиля.

Продольные координаты центра тяжести  $a_m$  и  $b$  для снаряженного или груженого автомобиля определяют по формуле [8,9]:

$$a_m = \frac{Q_2 L}{Q}, b = L - a \quad (4)$$

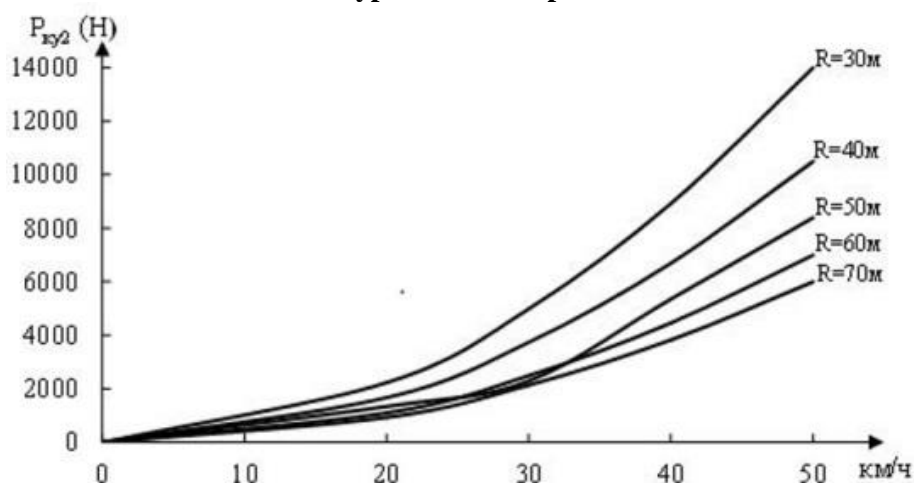
где  $Q$  – полная масса машины;  $Q_2$  – масса, приходящаяся на вторую ось;  $L$  – колесная база автомобиля;  $a_m$  – расстояние от центра масс до осевой точки переднего моста машины;  $b$  – расстояние от центра масс до осевой точки заднего моста.

**Результаты исследования поперечных сил на переднюю  $P_{ky1}$  и заднюю оси  $P_{ky2}$  при повороте грузового фургона ГАЗель NEXT**



**Рис. 3. Графики определения поперечных сил  $P_{ky1}$ , действующей на передний мост при повороте груженого автомобиля типа «фургон» ГАЗель NEXT в режиме эксплуатации**

**Fig. 3. Graphs for determining of transverse forces  $P_{ky1}$  acting on front axle at turn of Gazelle NEXT, loaded van-type vehicle in operation mode**



**Рис. 4. Графики определения поперечных сил  $P_{ky2}$ , действующей на задний мост при повороте груженого автомобиля типа «фургон» ГАЗель NEXT в режиме эксплуатации**

**Fig. 4. Graphs for determining of transverse forces  $P_{ky2}$  acting on rear axle at turn of Gazelle NEXT, loaded van-type vehicle in operation mode**

По итогам анализа распределения массы фургона по осям и его центра тяжести в условиях эксплуатации с полной нагрузкой были приняты и уточнены по предложенной методике результаты для расчета пределов значений сил  $P_{ky}$  и  $P_{ky1}$  в режиме эксплуатации фургонов. На рис. 3 и 4 представлены исследования распределения поперечных сил на передний  $P_{ky1}$  и задний мост  $P_{ky2}$  при повороте груженого автомобиля типа «фургон» ГАЗель NEXT. На повороте грузового автомобиля определили распределения поперечных сил при скорости движения  $v = 10, 20, 30, 40, 50$  км/ч и радиусе поворота автомобиля  $R = 30, 40, 50, 60, 70$  м при этом получили пределы изменения значений поперечных сил  $P_{ky1}$  от 400 до 7000 Н и  $P_{ky2}$  от 800 Н до 14 000 Н.

На втором этапе предложена методика определения пределов потребного относительно установленного приращения угловой жесткости подвески от действия поперечных сил при повороте автомобиля для повышения эффективности выравнивания кузова. Пределы потребной угловой жесткости для передней  $C_{y1(\text{треб})}$  и задней подвески  $C_{y2(\text{треб})}$  со стабилизаторами определяются по формуле [9,10]:

$$C_{y1(\text{треб})} = \frac{P_{ky1} \cdot h_{kp1}}{[\psi_{kp}]} + G_{k1} h_{kp1}, \quad (5)$$

$$C_{y2(\text{треб})} = \frac{P_{ky2} \cdot h_{kp2}}{[\psi_{kp}]} + G_{k2} h_{kp2}, \quad (6)$$

где  $P_{ky1}$  и  $P_{ky2}$  – поперечные силы, действующие на передний и задний мост автомобиля;  $\psi_{kp}$  – угол крена кузова не должен превышать 10 град (0,1745);  $h_{kp1,2}$  – плечо крена переднего и заднего моста;  $G_{k1}$  и  $G_{k2}$  – сила тяжести фургона, приходящаяся на передний и задний мосты.

Угловую жесткость для установленной передней независимой подвески  $C_{y1(\text{устан})}$  и задней рессорной подвески  $C_{y2(\text{устан})}$  грузового фургона на примере автомобиля ГАЗель NEXT без стабилизатора определяется по формуле [9,10]:

$$C_{y1(\text{без})} = 0,5B^2 C_{\text{пр}}, \quad (7)$$

$$C_{y2(\text{без})} = 0,5B_p^2 \dot{C}_p \eta \quad (8)$$

где,  $C_{\text{пр}}$  и  $C_p$  – жесткости передней пружины и задней рессорной подвески ГАЗель NEXT;  $B$  – расстояние между серединами пружин, м;  $B_p$  – расстояние между серединами рессор, м;  $\eta$  – коэффициент увеличения жесткости рессор при скручивании в поперечном направлении =1,05-1,25

Угловая жесткость рычажного стабилизатора переднего и заднего моста фургона определяется по формуле:

$$C_{yT1,2} = 2C_{T1,2} \left[ \frac{B_{1,2}}{2} \right]^2, \quad (9)$$

где  $B_{1,2}$  – колея переднего и заднего моста,  $C_{T1}$  и  $C_{T2}$  – жесткость стабилизатора поперечной устойчивости переднего и заднего моста.

На третьем этапе методики исследованы углы крена по вариантам потребной и установленной угловой жесткости подвески от действия поперечных сил при повороте автомобиля типа фургон. Для определения угла крена провели анализ схемы поперечных нагрузок на автомобиль (рис 1). В центре тяжести подрессоренных масс приложена сила и центробежная сила инерции  $P_{ky}$ , которая приводит к крену подрессоренных масс  $\psi_{kp}$ . Момент поперечной силы  $P_{ky}$  на плече крена кузова  $h_{kp}$  он поворачивает кузов относительно оси крена на угол, а точка  $C$  смещается в точку  $C'$ . Угол крена кузова автомобиля на повороте по варианту потребной угловой жесткости подвески определяется по формуле [8,9,11]:

$$\psi_{kp(\text{потр.})} = \frac{P_{ky} h_{kp}}{C_{y(\text{потр.})} - G_k h_{kp}}, \quad (10)$$

где  $C_{y1(потр.)} = (C_{y1} + C_{y1})$  – суммарная потребная угловая жесткость передней и задней подвески автомобиля,  $h_{кр}$  – плечо крена,  $G_k$  – подрессоренная масса исследуемого автомобиля,  $P_{кy}$  – поперечная сила.

Угол крена кузова автомобиля на повороте по вариантам установленной угловой жесткости подвески определяется по формуле [8,9,11];

$$\psi_{кр(устан.)} = \frac{P_{кy}h_{кр}}{C_{y(устан.)} - G_k h_{кр}}, \quad (11)$$

где  $C_{y1(устан.)} = (C_{y1} + C_{y1})$  – суммарная установленная угловая жесткость передней и задней подвески автомобиля,  $h_{кр}$  – плечо крена,  $G_k$  – подрессоренная масса исследуемого автомобиля,  $P_{кy}$  – поперечная сила.

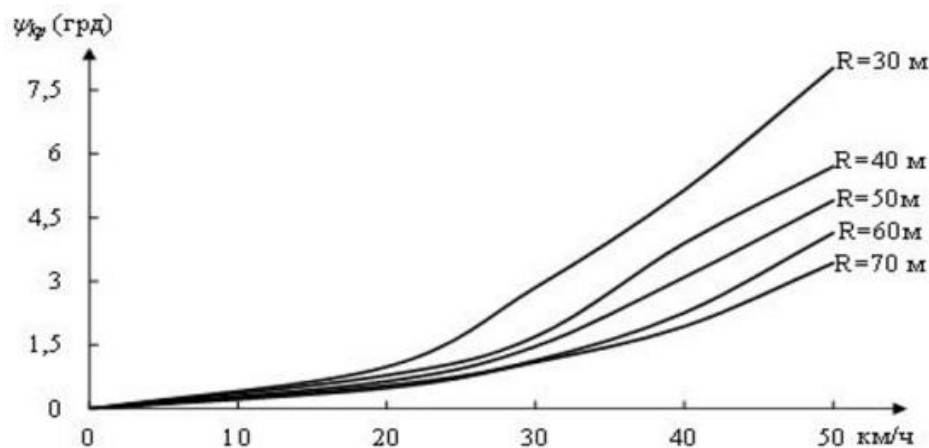
Плечо крена  $h_{кр}$  определяется по формуле [6,7,9,11]:

$$h_{кр} = h_m - \frac{a_m h_2 - b h_1}{L}, \quad (12)$$

где;  $h_1$  и  $h_2$  – расстояния от поверхности дороги до переднего и заднего моста фургона,  $a_m$  – расстояние от центра масс до осевой точки переднего моста фургона,  $b$  – расстояние от центра масс до осевой точки заднего моста машины,  $h_m$  – высота центра тяжести.

На рис. 5 и 6 представлены графики определения угла крена при повороте автомобиля по потребной и установленной угловой жесткости подвески. Значения угла крена по вариантам потребной угловой жесткости подвески получили пределы изменения  $\psi_{кр}$  от 0,45 до 7,5 град и установленной угловой жесткости получили пределы изменения  $\psi_{кр}$  от 0,5 до 10,5 град на повороте. При этом установили, что значения углов крена фургона по вариантам установленной угловой жесткости подвески больше, чем по потребной угловой жесткости подвески. По требованиям к безопасности движения грузовых транспортных средств предельное эксплуатационное значение угла крена  $\psi_{кр}$  для грузовых автомобилей не должно превышать  $10^\circ$  [8,9,11].

**Результаты исследования угла крена кузова при повороте автомобиля**



**Рис. 5. Графики определения угла крена при повороте автомобиля по потребной угловой жесткости подвески**

**Fig. 5. Graphs for determining the roll angle when cornering the vehicle according to the required angular stiffness of the suspension**

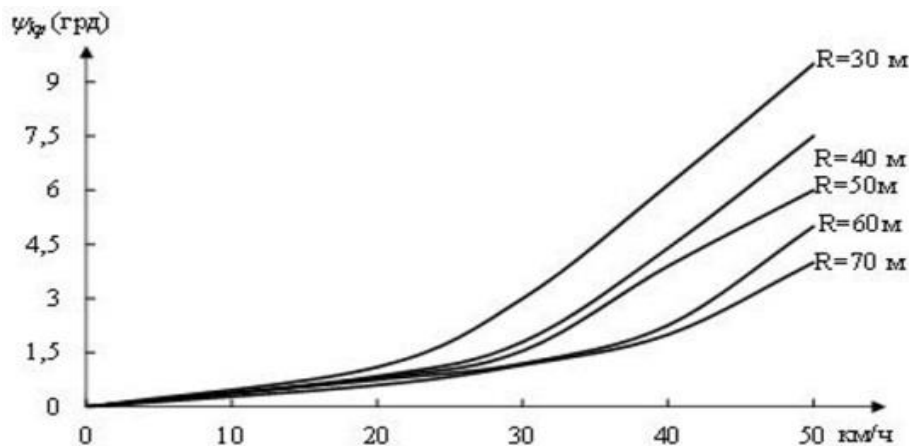


Рис. 6. Графики определения угла крена на повороте по установленной угловой жесткости подвески

Fig. 6. Graphs for determining the roll angle at a turn according to the set angular stiffness of the suspension

### Выводы

1. Предложена методика исследования поперечных сил  $P_{кy}$  и их распределения по осям в режиме эксплуатации серийных фургонов с полной нагрузкой при интенсивном движении на поворотах.
2. Предложена методика определения приращения потребной относительно установленной угловой жесткости подвески от действия поперечных сил при повороте автомобиля типа фургон для повышения эффективности выравнивания кузова.
3. Предложена методика и исследованы результаты крена кузова по углу наклона при эксплуатации серийных малотоннажных фургонов с полной нагрузкой по вариантам потребной и установленной угловой жесткости. В результате исследования углов крена  $\psi_{кр}$  выявлено, что поперечные силы  $P_{кy}$  и плечо крена  $h_{кр}$  кузова значительно увеличиваются в режиме эксплуатации современных фургонов с полной нагрузкой относительно ранее известных данных, а увеличение угловой жесткости подвески автомобиля по результатам анализа приращения потребной угловой жесткости позволяет снизить угол крена кузова.

### Библиографический список

1. **F. Aparicio, J. Paez, F. Moreno, F. Jimenez, and A. Lopez.** Discussion of a new adaptive speed control system incorporating the geometric characteristics of the roadway, *Int. J. Veh. Auton. Syst.* 2005. Vol.3. No.1. Pp. 47-64.
2. **R. Kamnik, F. Boettiger, and K. Hunt.** Roll dynamics and lateral load transfer estimation in articulated heavy freight vehicles. *Proc.Inst. Mech. Eng. D, J. Automob. Eng.*, 2003. Vol. 217. No 11. Pp. 985-997.
3. **Doumiati M., Victorino A., Charara A., and Lechner.** Lateral load transfer and normal forces estimation for vehicle safety: experimental test, *Vehicle System Dynamics*, 2009. Vol. 47. No. 12. Pp.1511-1533.
4. **Nalecz, A. G., Bindemann, A. C. and Brewer, H. K.** Dynamic analysis of vehicle rollover. In *Proceedings of the 12th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles*, 1989. Gotenburg, Sweden. Pp. 803-819.
5. **Verma, M. K. and Gillespie, T. D.** Roll dynamics of commercial vehicles. *Veh. System Dynamics*, 1980. Vol. 9. No.1. Pp. 1-17.



6. **Поливаев, О.И.** Повышение эксплуатационных свойств мобильных энергетических средств за счет совершенствования приводов ведущих колес: монография / О.И. Поливаев, О.М. Костиков. – Воронеж: ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2013. – 210 с.
7. **Kelvin Hubert Spartan chassis**, «Anti-Roll Stability Suspension Technology». SAE Technical Paper 2005-01-3522, 2005.
8. **Артамонов, М.Д.** Теория автомобиля и автомобильного двигателя: учебник для техникумов / М.Д. Артамонов, В.А. Иларионов, М.М. Морин. – М.: Машиностроение, 1968. – 283 с.
9. **Иларионов, В.А.** Эксплуатационные свойства автомобиля: учебник для студентов автомобильно-дорожных вузов и факультетов / В.А. Иларионов. – М.: Машиностроение, 1966. – 280 с.
10. **Семенов, Н.В.** Методика расчета параметров подвески автомобиля с учетом поперечно-угловых колебаний кузова: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. СПб, 2011. – 171 с.
11. **Тарасик, В.П.** Теория и движения автомобиля: учебник для вузов / В.П. Тарасик. – СПб: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.

*Дата поступления  
в редакцию: 31.05.2022*

УДК 629.114.46(575.3)

DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_114

## ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ИЗНАШИВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН В УСЛОВИЯХ ГОРНЫХ КАРЬЕРОВ

**А.М. Умирзоков**

ORCID: 0000-0002-9966-2359 e-mail: [ahmad.umirzokov@maul.ru](mailto:ahmad.umirzokov@maul.ru)

Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими

*Душанбе, Таджикистан*

**И.П. Трояновская**

ORCID: 0000-0003-2763-0515 e-mail: [troianovskaiaip@susu.ru](mailto:troianovskaiaip@susu.ru)

Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

*Челябинск, Россия*

**А.Л. Бердиев**

ORCID: 0000-0002-8013-4716 e-mail: [alik8405@inbox.ru](mailto:alik8405@inbox.ru)

Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими

*Душанбе, Таджикистан*

**С.С. Сайдуллозода**

ORCID: 0000-0002-9663-2453 e-mail: [saivali.saidullo@mail.ru](mailto:saivali.saidullo@mail.ru)

Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

*Челябинск, Россия*

Исследовано повышение эксплуатационной эффективности карьерного автомобиля путем увеличения долговечности автомобильной шины, что обусловлено необходимостью снижения интенсивности изнашивания, а также уменьшения числа механических повреждений при определенных соотношениях различных механизмов изнашивания. Обоснованы особенности механизмов изнашивания и механических повреждений автомобильной шины; выработаны предложения по выявлению резервов, связанных с прогнозированием нормы ее пробега в горных карьерных условиях. Установлен характер проявления отдельных механизмов истирания и механических повреждений автомобильных шин, свойственных преимущественно горным карьерным условиям и способствующих резкому снижению ресурса шин. По результатам экспериментальных исследований построены графики зависимости для установления критических значений остаточной высоты рисунка, при достижении которых наступает резкое повышение интенсивности изнашивания. Также представлена графическая зависимость интенсивности изнашивания рисунка протектора шины от проскальзывания в различных по сложности эксплуатационных условиях.

Результаты исследований могут быть применены для совершенствования конструкции в стадиях проектирования и производства шин, а также для уточнения норм их пробега с учетом особенностей условий эксплуатации.

**Ключевые слова:** автомобильная шина, абразивное изнашивание, усталостное изнашивание, механизм изнашивания, интенсивность изнашивания, абразивность, проскальзывание, горные породы, гидроабразивный износ, условия эксплуатации.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Умирзоков, А.М. Особенности механизма изнашивания автомобильных шин в условиях горных карьеров / А.М. Умирзоков, И.П. Трояновская, А.Л. Бердиев, С.С. Сайдуллозода // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 3. С. 114-123. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_114

## SPECIFICS OF AUTOMOBILE TIRE WEAR MECHANISM IN CONDITIONS OF QUARRIES

**A.M. Umirzokov**

ORCID: **0000-0002-9966-2359** e-mail: **ahmad.umirzokov@maul.ru**

Tajik Technical University n.a. academician M.S. Osimi  
*Dushanbe, Tajikistan*

**I.P. Troyanovskaya**

ORCID: **0000-0003-2763-0515** e-mail: **troianovskaiaip@susu.ru**

South Ural State University (National Research University)  
*Chelyabinsk, Russia*

**A.L. Berdiev**

ORCID: **0000-0002-8013-4716** e-mail: **alik8405@inbox.ru**

Tajik Technical University n.a. academician M.S. Osimi  
*Dushanbe, Tajikistan*

**S.S. Saidullozoda**

ORCID: **0000-0002-9663-2453** e-mail: **saivali.saidullo@mail.ru**

South Ural State University (National Research University)  
*Chelyabinsk, Russia*

**Abstract.** Improvement of operational efficiency of a quarry vehicle by increasing of an automobile tire durability that is caused by the need to reduce the intensity of wear, as well as a decrease in number of mechanical damages at certain ratios of various wear mechanisms, are studied. Specifics of wear mechanisms and mechanical damages of an automobile tire, as well as working-out of proposals for revealing of reserves associated with prediction of its mileage standard in mining and quarry conditions, are substantiated. Mode of presentation of individual mechanisms of abrasion and mechanical damages of automobile tires, mainly specific to mining and quarry conditions and contributing to a sharp decrease in tire life, are established. According to the results of experimental studies, dependence graphs are constructed to establish critical values of the pattern residual height; when such critical values are reached, a sharp increase in the intensity of wear occurs. Also, the curve of tire tread pattern wear intensity on slippage in operating conditions of varying complexity is presented.

Results of the research can be applied to improve the structure at the tires design and production stages, as well as to specify the mileage standards thereof, taking into account the specifics of operating conditions.

**Key words:** automobile tire, abrasive wear, fatigue wear, wear mechanism, wear intensity, abrasiveness, slippage, rocks, hydro abrasive wear, operating conditions.

**FOR CITATION:** A.M. Umirzokov, I.P. Troyanovskaya, A.L. Berdiev, S.S. Saidullozoda. Specifics of automobile tire wear mechanism in condition of quarries. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 3. Pp. 114-123. DOI: 10.46960/1816-210X\_2022\_3\_114

### Введение

Автомобильная шина в горных карьерах эксплуатируется в сложных, порой очень суровых дорожно-климатических условиях, формирующихся под влиянием более чем сорока различных факторов и огромного числа их сочетаний [1-4]. Из их большого многообразия наиболее важными, значительно ускоряющими интенсивность изнашивания рисунка протектора шины, являются нагрузочные и дорожно-климатические составляющие, под действием которых наблюдаются все виды изнашивания, характерные для резинотехнических изделий: абразивный, усталостный, посредством скатывания [5-7]. В условиях горных карьеров пробег шины автомобилей-самосвалов значительно сокращается, в основном, из-за абразивного изнашивания рисунка ее протектора [8, 9]. Следует отметить, что наиболее частыми причи-

нами снятия шин с эксплуатации в горных карьерах являются механические повреждения [10, 11].

Вместе с тем, вопросы, связанные с исследованием особенностей взаимодействия автомобильной шины, остаются малоизученными. Установление закономерности абразивного изнашивания и причинно-следственной связи между сложным дорожно-климатическим условием и интенсивностью изнашивания служит основанием уточнения нормы пробега шины, выбора шины с наилучшими эксплуатационными показателями с учетом особенностей условий эксплуатации, разработки рекомендаций по обоснованию эффективности функционирования автомобиля, эксплуатируемого в горных карьерных условиях.

### Материалы и методы исследования

Между автомобильной шиной и дорожным покрытием имеет место сложный процесс взаимодействия, характеризующийся значительными нагрузочными, температурными напряжениями и низким качеством дорожного покрытия, отличающегося высокой агрессивностью. Среди всевозможных видов изнашивания для данных условий преобладают такие разновидности истирания, как абразивный и посредством скатывания, а также их сочетания, отличающиеся высокой интенсивностью, что обуславливает низкую долговечность шины.

В горных карьерах повреждения поверхностного слоя шины при усталостном износе рисунка протектора случаются по причине частых деформаций его выступов неровностями дорожного покрытия и твердыми округло-обломочными скальными породами в виде тупых и гладких гравия, галечников и валунов. В процессе взаимодействия шины с дорожным покрытием происходят следующие виды нарушений пятна касания, называемых фрикционными связями [12-15]:

а) микрорезание или царапание рисунка протектора, обусловленные взаимодействием шины с засыпанными на поверхности дорожного полотна древесными и щебенистыми обломками скальной породы с острыми ребрами и гранями при больших контактных давлениях, превосходящих предел прочности эластичного материала шины;

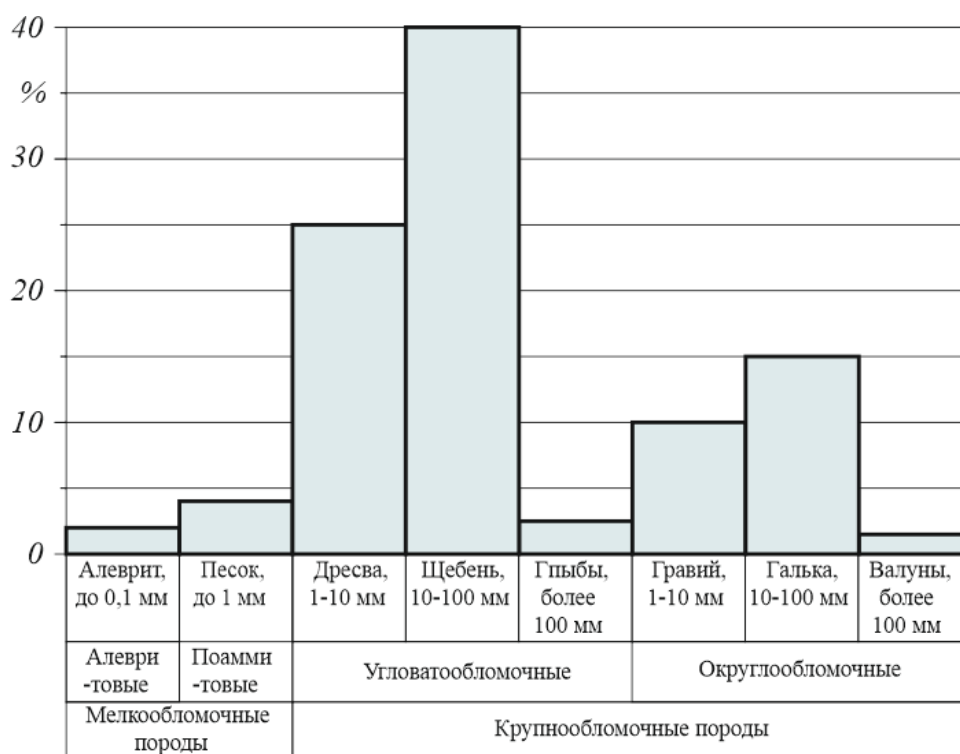
б) упругое оттеснение, относящееся к наиболее типичному случаю истирания резины, при котором разрушение материала происходит за большое число циклов;

в) адгезионный отрыв, обуславливающий молекулярную составляющую силы трения на поверхности соприкосновения (адгезия всегда присутствует при любом виде взаимодействия, но она невелика по сравнению с объемной прочностью материала);

г) когезионный отрыв, или схватывание поверхностей, сопровождающееся глубинным вырыванием материала.

Усталостное истирание рисунка протектора отличается относительно низкой интенсивностью по сравнению с износом посредством скатывания и абразивным износом. Первый случай имеет место при чрезмерных нагрузочных и температурных режимах и агрессивном стиле езды, характерном для горных условий (при резком и длительном торможении при движении на продолжительных спусках, маневрировании на больших скоростях, а также при ускорениях при движении на подъем). При этом сдвиговые напряжения нередко превышают прочность резины, что способствует к появлению разрывов, трещин и рисунков истирания в виде параллельно чередующихся гребней и впадин, перпендикулярных направлению истирания на поверхности протектора. Интенсивность усталостного износа шины повышается с ростом температуры поверхности шины, а также с увеличением неровности дорожного покрытия и уровня засоренности поверхности дороги галечниковыми, гравийными обломками и валунами.

Абразивное изнашивание рисунка протектора наблюдаются при разрушительном взаимодействии автомобильной шины с мелкообломочными и крупнообломочными породами скального происхождения (рис. 1), отличающимися высокой абразивной способностью.



**Рис. 1. Распределение горных пород (по массе) на поверхности карьерных дорог в условиях строительства ГТС**

**Fig. 1. Distribution of rock formation (by mass) on the surface of quarry roads in conditions of water-development works construction**

Особенность абразивного истирания рисунка протектора автомобильной шины заключается в том, что она одновременно взаимодействует как с неподвижно закрепленными и подвижными абразивными частицами, так и с обломками твердой породы на поверхности дороги, которые отличаются широким спектром форм, размеров, механических свойств и абразивной способностью. При этом в процессе абразивного истирания в основном участвуют мелко- и угловато-обломочные породы скального происхождения. Если мелкообломочные породы в виде алевритов и песка участвуют в формировании неглубоких и мелких царапин, то угловато-обломочные породы оставляют на теле шины глубокие и крупные прорезы, способствуя при этом снижению абразивной стойкости резины из-за увеличения контактной площади. При движении автомобиля образованные царапины и прорезы протектора шины насыщаются абразивными частицами горной породы различных размеров и форм, усугубляя и без того сложный процесс истирания резины. К тому же насыщение поверхности протектора твердыми частицами приводит к повышению жесткости протекторной резины, и, как следствие, к снижению ее износостойкости. Кроме того, крупнообломочные породы служат причиной частых механических повреждений в виде проколов, разрывов и пробоев. По данным исследований [16], около 40 % бракованных шин, эксплуатирующихся в горных условиях, пришло в негодность по причине порезов или проколов острыми предметами и большими камнями (рис. 2).



**Рис. 2. Механические повреждения шин при эксплуатации в горных условиях**

**Fig. 2. Mechanical damage to tires during operation in mountain conditions**

В процессе эксплуатации автомобильной шины в абразивной среде происходит постепенное вдавливание мелко- и угловато-обломочных частиц в протекторную резину и насыщение ими протекторной резины. На величину абразивного изнашивания и его интенсивность влияют следующие факторы [17, 18]:

- природа происхождения абразивных частиц;
- среда эксплуатации автомобильной шины (степень агрессивности среды);
- свойство протекторной резины и характеристики дорожных условий, которые включают в себя тип и состояние дорожного покрытия, характеристику плана и профиля дороги;
- ударные нагрузки из-за неровности дорожного полотна;
- температурные показатели и многие другие.

В горных условиях абразивные частицы, засыпанные на поверхности дорожного полотна, в основном, выпадают из кузова автомобиля-самосвала при перевозке вскрышных горных пород из-за сложности дорожных условий. Горные карьерные дороги, проложенные на высотах от 1000 до 2000 м над уровнем моря, отличаются неровностью дорожного покрытия, а также сложностью ее геометрии в плане и профиле, характеризуемыми частыми подъемами и спусками, и большим числом поворотов за погонный км дороги (табл. 1).

*Таблица 1.*

**Показатели условий эксплуатации в горных карьерах (на примере строительства ГТС)**

*Table 1.*

**Indicators of operating conditions in quarries  
(as exemplified by water-development works construction)**

Показатель, формирующий условие эксплуатации	Пределы варьирования	Среднее значение показателя
Количество подъемов и спусков на 1 км пути, шт.	1 ... 10	4
Количество поворотов на 1 км пути, шт.	4 ... 20	11
Количество ускорений (разгонов) на 1 км пути, шт.	12 ... 16	14
Количество замедлений на 1 км пути, шт.	8 ... 12	10
Неровность дорожного покрытия, м/км	7 ... 8	7,5
Количество торможений на 1 км пути, шт.	11 ... 15	13
Всего количества маневров на 1 км пути, шт.	36 ... 65	50
Температура воздуха, °С	- 16 ... +35	9
Среднее количество дней осадков в году, дни	75 ... 100	85
Среднее количество осадков в году, мм	800 ... 950	880
Высота над уровнем моря, м	1100 ... 1440	1320
Абразивная способность	-	высокая

Основную долю абразивных частиц в этих условиях составляют такие горные породы скального происхождения, как галит, гранит, гематит и др., отличающиеся высокими показателями плотности, прочности (стойкости одноосному давлению), твердости и абразивной способности. В целом в абразивном изнашивании рисунка протектора автомобильной шины так или иначе принимают участие свыше десяти разновидностей горных пород, разбросанных (распределенных) на поверхности дорожного покрытия.

В среде мелкообломочных пород острые абразивные частицы алеврита и песка царапают и совершают хаотический процесс микрорезания поверхности шины. Более крупные абразивы угловато-обломочных скальных пород в виде дресвы, щебня и глыбы, разбросанные на твердой поверхности дорожного покрытия, могут оставлять более глубокие царапины и раздиры, совершая хаотический процесс макрорезания поверхности шины.

В горных карьерных дорогах нередко встречается вид изнашивания, называемый гидроабразивным. Как разновидность гидроабразивного изнашивания, часто встречающуюся в условиях горных карьеров, следует отметить истирание протектора шины в среде толстого слоя грязи, достигающего до 10 см и выше, содержащего высокую концентрацию абразивных частиц в виде мелко-и крупнообломочных скальных пород [19, 20] (рис. 3).



**Рис. 3. Дорожные условия в горных карьерах при строительстве ГЭС:**  
*a – сухое дорожное покрытие с засыпанными абразивными породами; б – дорожное полотно, покрытое слоем грязи, содержащее высокую концентрацию абразивных частиц*

**Fig. 3. Road conditions in quarries during the water-development works construction:**  
*a – dry road surface with abrasive rocks filled in; b – roadbed covered with a layer of dirt containing a high concentration of abrasive particles*

Хотя механизм процесса изнашивания рисунка протектора шины в среде абразивной грязи на сегодня остается вопросом до конца не изученным, сотрудниками технологического парка Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими, совместно с инженерно-техническим персоналом ОАО «Основное строительство Рогунской ГЭС» установлено, что интенсивность изнашивания рисунка протектора в среде абразивной грязи на 10-15 % превышает интенсивность изнашивания на сухой карьерной дороге. Установлено также, что при эксплуатации автомобиля до 12-18 % увеличивается параметр потока отказов или среднее число отказов шин в течение определенной наработки по причине механического повреждения в среде абразивной грязи в сравнении с сухим дорожным покрытием. Причиной этого являются частые наезды шины на крупнообломочные скальные породы в виде обломков с острыми ребрами и гранями, которые остаются незамеченными водителем под лужей грязной воды или грязи.

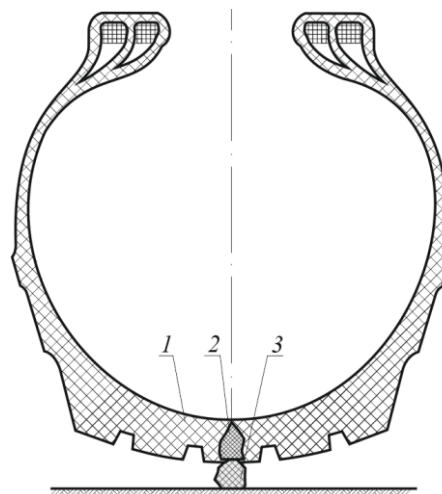
В процессе эксплуатации автомобилей-самосвалов дресвяные и щебнистые обломки твердых пород с острыми ребрами и гранями внедряются и часто застревают в теле автомобильной шины в области ее протектора (рис. 4), оставляя при этом глубокие и довольно обширные прорезы и глухие проколы, тем самым способствуя дальнейшему ускоренному абразивному истиранию [14, 20].



**Рис. 4.** Глухие проколы шин обломками твердых скальных пород

**Fig. 4.** «Dumb» punctures of tires by fragments of solid rock

При движении автомобиля по горным карьерным дорогам остроконечные щебни вдавливаются в тело шины и углубляются в него (рис. 5). На практике не исключается случай наступления тем же местом, т.е. застрявшим щебенистым осколком на другой твердый предмет (осколок щебня, булыжник, галечник и др.) и глубокое вдавливание до сквозного прокалывания протектора шины.



**Рис. 5.** Механизм механического повреждения шины в следствии последовательного внедрения обломков твердой скальной породы, засыпанной в виде щебня или галечника в тело протектора:

*1 – автомобильная шина; 2 – обломок твердой скальной породы в виде щебня с острыми ребрами и гранями; 3 – галечник или обломок твердой скальной породы*

**Fig. 5.** Mechanism of mechanical damage to the tire as a result of the sequential penetration of fragments of solid rock, filled into the tread body in the form of rubble or pebble:

*1 – automobile tire; 2 – fragment of solid rock in the form of rubble with sharp edges; 3 – pebble or a fragment of solid rock*

### Результаты исследования

Известно, что в формировании механизма истирания рисунка протектора автомобильной шины немаловажное значение имеет режим движения «качение с проскальзыванием». В карьерных дорогах, проложенных в горных условиях, проскальзывание колес автомобилей-самосвалов варьирует в широких пределах и составляют от 2 до 6 % в зависимости от особенностей условия эксплуатации (рис. 6).



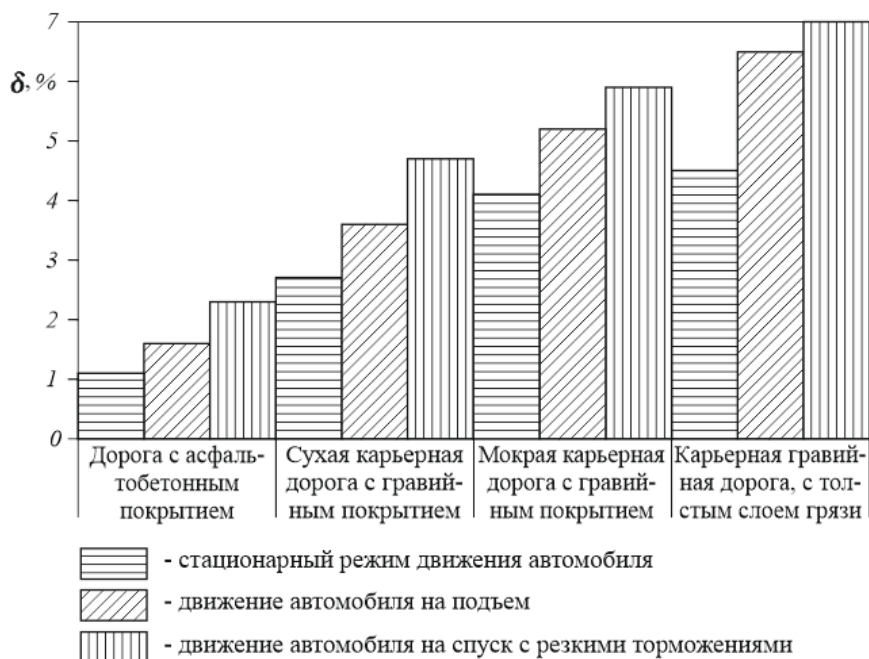


Рис. 6. График зависимости интенсивности изнашивания рисунка протектора шины от проскальзывания

Fig. 6. Dependence graph of tire tread pattern wear intensity on slippage

Известно, что интенсивность изнашивания протектора шины зависит от соотношения видов изнашивания, которые непостоянны в процессе эксплуатации с увеличением пробега, следовательно, и непостоянен и интенсивность изнашивания. Для сложных условий эксплуатации автомобилей в горных карьерах в результате обработки экспериментальных данных установлено, что это непостоянство может варьировать в широких пределах, линейно меняясь до определенного пробега и резко увеличиваясь после него (рис. 7).

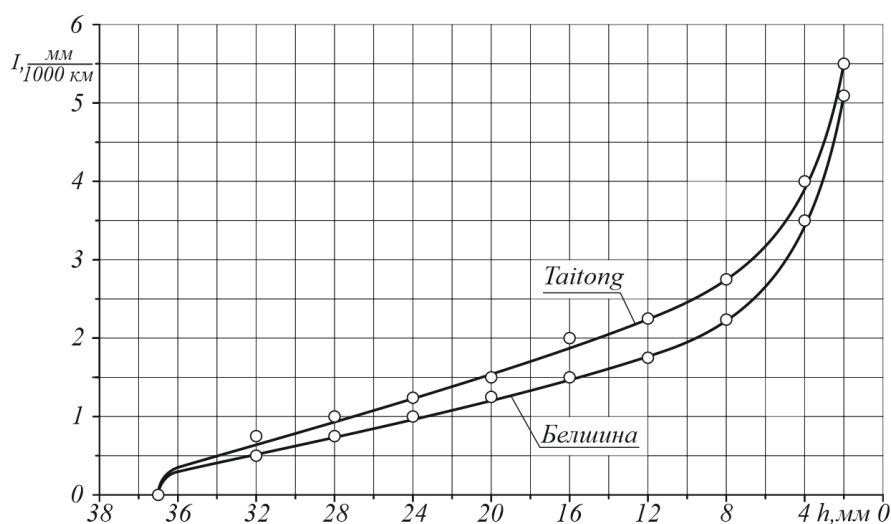


Рис. 7. Зависимость интенсивности изнашивания  $I$  от остаточной высоты протектора  $h$  для шин, эксплуатируемых в горных условиях

Fig. 7. Dependence of wear intensity  $I$  on residual tread height  $h$  for tires used in mountain conditions

Интенсивность абразивного изнашивания рисунка протектора шины в зависимости от свойств абразивной среды, концентрации, формы, размеров абразивов, состояния шины, скорости скольжения шины по дороге и удельного давления для шин типоразмера 18.00–25 составляют от 0,9 до 1,8 мм/1000 км, для шин типоразмера 12.00–20 данный показатель варьирует в пределах от 0,6 до 1,0 мм/1000 км.

### Выводы

1. В настоящее время не существует однозначной теории, описывающей во всей полноте механизм изнашивания автомобильной шины, не объяснены критерии перехода от одних видов изнашивания к другим, не установлен характер взаимосвязи между износостойкостью со свойствами резины и эксплуатационными условиями. Для снижения интенсивности изнашивания твердость изнашиваемой поверхности должна быть на 30 % тверже абразива, что исключается для автомобильной шины. Следовательно, для снижения интенсивности абразивного истирания необходимо очищать поверхность дороги от твердых структурных составляющих.

2. Снижение интенсивности изнашивания в горных карьерных условиях можно связать с положением критической точки, при достижении которого в 2 и более раза снижается сопротивление истираемости протекторной резины.

3. В абразивной среде интенсивность изнашивания, линейно меняясь в течение срока службы, резко увеличивается при достижении определенной остаточной высоты рисунка протектора: 12-10 мм для шин типоразмера 18.00–25 и 8-7 мм для шин типоразмера 12.00–20.

### Библиографический список

1. **Гудков, В.А.** Особенности эксплуатации автомобильных шин на горных маршрутах Республики Дагестан / В.А. Гудков, В.Н. Тарновский, Р.М. Устаров // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. 2009. № 1. С. 99-101.
2. **Юнусов, М.Ю.** Влияние условий эксплуатации на износ шин карьерных самосвалов / М.Ю. Юнусов, А.Л. Бердиев, Х.Б. Хусейнов, Ф.С. Бодурбеков, Ф. Джобиров // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2016. № 1 (33). С. 56-64.
3. **Gudkov, V.A.** Predicting the mileage of motor vehicle tires in mountainous service conditions / V.A. Gudkov, V.N. Tarnovskii, R.M. Ustarov // International Polymer Science and Technology. 2012. Vol. 39(5). pp. 27-29.
4. **Лель, Ю.И.** Карьерные автодороги – их значимость и проблемы совершенствования / Ю.И. Лель, Ю.В. Стенин, А.Г. Колчанов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 3. С. 103-108.
5. **Абдулаев, Э.К.** Анализ и оценка факторов влияющих на ресурс крупногабаритных шин / Э.К. Абдулаев / Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020: Сборник тезисов. Секция «Круглый стол молодых ученых» VII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 23-24 апреля 2020 года. – СПб: Санкт-Петербургский горный университет. 2020. С. 3-5.
6. **Бакеев, Р.Б.** Проблема определения и корректирования нормативов ресурса автомобильных шин / Р.Б. Бакеев / Проблемы эксплуатации автомобилей, строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин: Межвузовский сборник научных трудов. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет. 2001. С. 3-5.
7. **Умирзоков, А.М.** Оценка формирования ресурса шин грузовых автомобилей в горных условиях при строительстве Рогунской гидроэлектростанции / А.М. Умирзоков, Ф.И. Джобиров, С.С. Сайдуллозода, А.Л. Бердиев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. № 4. С. 396-403.
8. **Kravchenko, A.** Research of dynamics of tire wear of trucks and prognostication of their service life / A. Kravchenko, O. Sakno, A. Lukichov // Transport Problems. 2012. Т. 7. № 4. С. 85-94.

9. **Суюнтбеков, И.Э.** Исследование влияния основных факторов, вызывающих повышенный износ шин автотранспортных средств в горных условиях // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2011. № 3. С. 81-86.
10. **Устаров, Р.М.** Неравномерность изнашивания протектора шин автомобилей, используемых в горных маршрутах Республики Дагестан / Р.М. Устаров, И.М. Устаров // Вестник МФ МАДИ (ГТУ). 2008. С. 47-51.
11. **Umirzokov, A.M.** Assessment of the resource of elements of transportation machins operated in mining energy enterprises / A.M. Umirzokov, M.A. Abdullo, F.I. Jobirov, S.S. Saidullozoda, A.B. Tashripov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 990(1). No. 012063.
12. **Gorshkov, Y.G.** Automatic control of air pressure in tires as a way to provide safe movement of wheeled vehicles on slopes / Y.G. Gorshkov, I.N. Starunova, A.A. Kalugin, I.P. Troyanovskaya // Journal of Physics. 2019. Vol. 1177 (1). No. 012004.
13. **Джобиров, Ф.И.** Моделирование ресурса шин грузовых автомобилей в горных условиях при строительстве гидротехнических сооружений (ГТС) / Ф.И. Джобиров // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2021. № 2 (54). С. 119-123.
14. **Умирзоков, А.М.** Влияние дорожных, климатических и эксплуатационных факторов на долговечность автомобильных шин / А.М. Умирзоков, А.А. Саибов, М.А. Абдуллоев, Ф. Джобиров // Вестник Таджикского технического университета. 2015. № 3(31). С. 89-94.
15. **Shkrabak, R.** Automatic control of air pressure in tires as a factor of safety improvement of wheeled vehicle operation in agricultural sector / R. Shkrabak, A. Kalugin, I. Starunova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 341(1). No. 012126.
16. **Юнусов, М.Ю.** Особенности эксплуатации шин в условиях переменного рельефа местности строительства Рогунской ГЭС / М.Ю. Юнусов, М. Мамадорифов, Ф.С. Бодурбеков, Х. Хайруллои // Вестник Таджикского технического университета. 2015. № 3 (31). С. 78-80.
17. **Устаров, Р.М.** Основные причины выхода шин из строя автомобилей эксплуатируемых в горных условиях республики Дагестан / Р.М. Устаров, И.М. Устаров, И.Р. Тагиров, А.А. Рамазанов // Вестник Махачкалинского филиала МАДИ. 2010. № 10. С. 29-32.
18. **Лахмостов, А.И.** Виды износа и разрушения шин / А.И. Лахмостов, А.И. Ушанев // Новая наука: Стратегии и векторы развития. 2017. Т. 2. № 2. С. 130-135.
19. **Умирзоков, А.М.** Оценка сети автомобильных дорог Республики Таджикистан / А.М. Умирзоков, Н.Т. Гоибов, С.С. Сайдуллозода, А.Л. Бердиев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2021. № 3 (134). С. 117-124.
20. **Умирзоков, А.М.** Оценка эффективности эксплуатации автомобильной дороги в горных карьерах / А.М. Умирзоков, К.Т. Мамбеталин, С.С. Сайдуллозода, А.Л. Бердиев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2021. №1 (132). С. 98-105.

*Дата поступления  
в редакцию: 06.04.2022*

## НАШИ АВТОРЫ

### ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

**Богатилов Валерий Николаевич** – профессор Тверского государственного технического университета, д-р техн. наук

**Добротин Сергей Александрович** – заведующий кафедрой Дзержинского филиала Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, д-р техн. наук, профессор

**Ерофеев Владимир Иванович** – директор Института проблем машиностроения РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор

**Иляхинский Александр Владимирович** – старший научный сотрудник Института проблем машиностроения РАН канд. техн. наук

**Коротков Алексей Владимирович** – научный сотрудник Российского федерального ядерного центра «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

**Костин Павел Васильевич** – доцент Приволжского института повышения квалификации ФНС России, канд. юр. наук, доцент

**Косырева Ольга Николаевна** – доцент Дзержинского филиала Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации

**Лабутин Николай Григорьевич** – заведующий кафедрой Приволжского института повышения квалификации ФНС России, канд. техн. наук, доцент

**Попов Анатолий Аркадьевич** – декан ИТФ Дзержинского Политехнического института НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент

**Хлыбов Александр Анатольевич** – заведующий кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

**Дмитриев Сергей Михайлович** – ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор

**Котин Андрей Валерьевич** – математик 1 категории НГТУ им. Р.Е. Алексеева

**Легчанов Максим Александрович** – заместитель директора Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

**Мамаев Александр Викторович** – младший научный сотрудник НГТУ им. Р.Е. Алексеева

**Рязанов Ренат Рамильевич** – младший научный сотрудник НГТУ им. Р.Е. Алексеева

**Соборнов Алексей Евгеньевич** – младший научный сотрудник НГТУ им. Р.Е. Алексеева

**Треушников Михаил Васильевич** – старший разработчик программного обеспечения ООО «Мера НН»

### МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

**Алакин Виктор Михайлович** – начальник отдела научной и инновационной деятельности Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук, доцент

**Бердиев Алишер Лугмонович** – старший преподаватель Таджикского технического университета им. акад. М.С. Осими

**Зузов Валерий Николаевич** – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

**Елисеев Михаил Евгеньевич** – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук

**Елисеева Ирина Николаевна** – ассистент  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева

**Колин Александр Андреевич** – аспирант  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева

**Корчажкин Михаил Георгиевич** – доцент  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

**Кравец Владислав Николаевич** – профессор  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Краснов Юрий Вадимович** – доцент Дзержинского политехнического института НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

**Кулепов Виктор Федорович** – профессор  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Лю И** – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

**Малыгин Александр Львович** – доцент  
Дзержинского политехнического института  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

**Мусарский Роман Абрамович** – главный научный сотрудник НИЛ ТИС НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор

**Наумов Валерий Николаевич** – профессор  
Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

**Никандров Игорь Семенович** – профессор  
Дзержинского политехнического института  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Орлов Лев Николаевич** – профессор НГТУ  
им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

**Сайдуллозода Сайвалли Садуло** – аспирант  
Южно-Уральского государственного университета

**Тинт Наинг Вин** – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

**Трояновская Ирина Павловна** – профессор  
Южно-Уральского государственного университета, д-р техн. наук

**Тумасов Антон Владимирович** – директор  
Института транспортных систем НГТУ им.  
Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент

**Умирзоков Ахмад Маллабоевич** – доцент  
Таджикского технического университета им.  
акад. М.С. Осими, канд. техн. наук

**Шурашов Александр Дмитриевич** – доцент  
Дзержинского политехнического института  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

## ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ «ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

*Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, ауд. 1363-3*

*Телефон: 8(920)00-37-877*

*e-mail: rsl@nntu.ru*

### ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляются два печатных экземпляра статьи и комплекты сопроводительной документации: бумажный и электронный.
- Рекомендуемый объем статьи не превышает 15 страниц текста и 4-6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 7; минимальный объем статьи – 0,5 п.л.
- Статью необходимо сопроводить актом и протоколом экспортного контроля, экспертным заключением о возможности открытого опубликования, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию.
- Печатные экземпляры статей должны быть подписаны всеми авторами.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в порядке, отражающим их авторский вклад); аннотацию, ключевые слова.
- Аннотация (150-250 слов) отражает актуальность поставленной проблемы, цели исследования, методы, результаты, обозначение новизны, ключевые выводы.
- Ключевые слова (не менее 10) отражают тематическую направленность, объект и результаты исследования.
- Изложение материала должно быть логически выстроенным. Тематическая направленность представленного исследования должна строго соответствовать рубрике журналу. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), библиографический список, содержащий только цитируемые или рассматриваемые в тексте работы. Ссылки нумеруются в порядке цитирования. Самоцитирование рекомендуется ограничить тремя пунктами. Рекомендуется использовать в библиографическом списке ссылки на научные работы по теме исследования, индексируемые в международных базах научного цитирования. Библиографический список не должен включать неопубликованные работы.
- К статье необходимо приложить файл с информацией об авторах на русском языке: ФИО (полностью), должность, место работы (полное название организации, город, страна), идентификатор ORCID, e-mail, ученая степень и звание.
- Текст набирается через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое, верхнее и нижнее – 20 мм. Переносы не допускаются. Используется формат *Word for Windows* и стандартные шрифты *Times New Roman* и *Symbol*.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3-12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается. Использованию аббревиатур должна предшествовать их расшифровка.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы: (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel. Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображения выполняются в формате jpg или tif с разрешением 300 dpi. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисовочная подпись 11 жирный кегль, ссылки на рисунки: (рис. 1).

## **РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПРИНИМАЮТСЯ:**

**2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации**

**2.3.8 – Информатика и информационные процессы**

Валерий Павлович Хранилов: **hranilov@nntu.ru**

**2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл,  
радиационная безопасность**

Максим Александрович Легчанов: **legchanov@nntu.ru**

**2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы**

Владимир Сергеевич Макаров: **vladimir.makarov@nntu.ru**

16+

**ТРУДЫ НГТУ  
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

**№ 3 (138)**

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**

*Редакция:*  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24  
rsl@nntu.ru  
Свободная цена

Подписано в печать: 07.09.2022. Дата выхода в свет 16.09.2022. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 7,00. Тираж 300 экз. Заказ .

---

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.  
Типография НГТУ.

Адрес университета и типографии:  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24



**Индекс 44757**  
**Объединенный каталог «Пресса России»**

**Свидетельство о регистрации**  
**периодического печатного издания**  
**ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013 г.**