

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

№ 4 (147)

Нижний Новгород 2024

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2024. № 4 (147). – 130 с.

Выходит 4 раза в год

Журнал включен ВАК при Минобрнауки России

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

Главный редактор А.А. Куркин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

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

В.И. Казакова (ответственный редактор)

А.В. Крылова (ответственный секретарь)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

Сергей Михайлович Дмитриев

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

Пелиновский Дмитрий Ефимович

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

Палкович Ласло

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

Варлаки Петер

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

Виджай Кумар Чакка

PhD, проф., Университет Шив Надар, Индия

Ялчинер Ахмет

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

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

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

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

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

УДК 050(06)
ББК 9я54

© Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2024

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

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

Published since 2010

№ 4 (147)

Nizhny Novgorod 2024

The journal is issued 4 times a year

The journal is included in HAC Ministry of Education and Science

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

Editor-in-Chief A.A. Kurkin

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

EDITORIAL COUNCIL

Chairman

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

Members of Editorial Council

Pelinovski Dmitri

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

László Palkovics

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Péter Várlaki

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Vijay Kumar Chakka

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

Yalciner Akhmet

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

EDITOR AND PUBLISHER:

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

*The certificate on registration of periodic printed editions:
III № ФС 77-56417 11.12.2013*

*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, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ	7
Кузнецов Г.Д., Гай В.Е. Идентификация приложений по сетевому трафику	7
Куликов В.Б., Куликов А.Б., Хранилов В.П. Анализ фрактальных параметров поверхностных топологий микроструктур со стохастическими свойствами	17
Шабашов А.А., Плотников А.А. Квазилинеаризация нелинейной модели беспилотного летательного аппарата	27
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ	37
Богомоллов Д.Е., Кресов Д.Г. Влияние на реактивность плавления силумина в дисперсионных твэлах ядерных реакторов при разгонах на мгновенных нейтронах	37
Горюнов О.В., Семакова А.А. Оценка целостности третьего физического барьера безопасности при падении верхнего блока на реактор	44
Соборнов А.Е., Рязанов Р.Р., Мацин Н.В., Котин А.В., Воробьев И.В., Терехин А.Н. Оптимизация проточной части магнитогидродинамического фильтра для систем водоподготовки ЯЭУ на основе численного моделирования с применением CFD-кода	51
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	64
Вашурин А.С., Колин А.А., Орлов Л.Н., Кулепов В.Ф., Манянин С.Е. Оценка эффективности применения разработанного обтекателя для легкого коммерческого автомобиля	64
Дмитриев П.Е., Аникин А.А., Молев Ю.И., Вахидов У.Ш., Коростелев С.А. Изменение профиля поверхности движения транспортного средства, обусловленное снежным покровом, выветриванием, таянием, деформацией опорного основания, сглаживающей способностью колеса и прочими процессами	71
Дьяков А.С., Федоров Д.С., Рахимжанов Н.Е. Комплексная оценка подвижности виртуальной модели мобильного робота с трехкатковым движителем	82
Марковнина А.И., Капустин А.Г., Макаров В.С. Влияние различных факторов на оценку водителем дорожной обстановки	94
Наумов В.Н., Сарач Е.Б., Стадухин А.А., Русаков Б.В. Метод исследования профильной проходимости мобильного робота на этапе проектирования	103
Трусевич И.А., Абдулов С.В., Тараторкин И.А., Держанский В.Б. Совершенствование конструкции эжекционной системы водооткачки перспективной амфибийной машины	114
НАШИ АВТОРЫ	126

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE, MANAGEMENT AND SYSTEM ANALYSIS	7
Kuznetsov G.D., Gai V.E. Application identification by network traffic	7
Kulikov V.B., Kulikov A.B., Khranilov V.P. Analysis of fractal parameters of surface topologies of microstructures with stochastic properties	17
Shabashov A.A., Plotnikov A.A. Quasilinearization of nonlinear model of unmanned aerial vehicle	27
 NUCLEAR POWER AND ATOMIC POWER ENGINEERING	 37
Bogomolov D.E., Kresov D.G. Effect on reactivity of silumine melting in dispersion fuel elements of nuclear reactors at acceleration on instantaneous neutrons	37
Goryunov O.V., Semakova A.A. Assessment of third physical safety barrier integrity in the event of upper block fall onto the reactor	44
Sobornov A.E., Ryazapov R.R., Matsin N.V., Kotin A.V., Vorobyev I.V., Terekhin A.N. Optimization of magnetohydrodynamic filter flow part for water treatment systems of nuclear power plant based on numerical simulation using cfd-code	51
 MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION	 64
Vashurin A.S., Kolin A.A., Orlov L.N., Kulepov V.F., Manyanin S.E. Efficiency evaluation of developed fairing for light commercial vehicle	64
Dmitriev P.E., Anikin A.A., Molev Y.I., Vakhidov U.Sh., Korostelev S.A. Changes in vehicle's movement surface profile due to snow cover, weathering, melting, deformation of the supporting base, wheel smoothing ability and other processes	71
Dyakov A.S., Fedorov D.S., Rakimzhanov N.E. Integrated technology for ensuring stability of robot model with three-wheel propulsion	82
Markovnina A.I., Kapustin A.G., Makarov V.S. Influence of various factors on the driver's assessment of road condition	94
Naumov V.N., Sarach E.B., Staduhin A.A., Rusakov B.V. A method for investigating cross-country ability of mobile robot during the design phase	103
Trusevich I.A., Abdulov S.V., Taratorkin I.A., Derzhansky V.B. Improving the design of water pumping ejection system of promising amphibian vehicle	114
 AUTHORS	 126

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

УДК 004.89

EDN: PMAPDM

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРИЛОЖЕНИЙ ПО СЕТЕВОМУ ТРАФИКУ

Г.Д. КузнецовORCID: 0000-0001-5564-045X e-mail: gd.smith@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.Е. Гай**ORCID: 0000-0002-3644-5234 e-mail: iamuser@inbox.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Исследована возможность идентификации приложений по сетевому трафику с применением классических методов классификаторов. Предложены модель сбора и обработки входных сетевых данных, а также алгоритм формирования признакового описания для классификации сетевых приложений с целью повышения точности идентификации программ. Проведены эксперименты и анализ полученных результатов, которые позволили выявить преимущества и недостатки используемых методов классификации.

Ключевые слова: идентификация, сетевой трафик, сетевые пакеты, сетевые данные, классификация, признаковое описание.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Кузнецов, Г.Д. Идентификация приложений по сетевому трафику / Г.Д. Кузнецов, В.Е. Гай // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 4. С. 7-16. EDN: PMAPDM

APPLICATION IDENTIFICATION BY NETWORK TRAFFIC

G.D. KuznetsovORCID: 0000-0001-5564-045X e-mail: gd.smith@yandex.ru
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
*Nizhny Novgorod, Russia***V.E. Gai**ORCID: 0000-0002-3644-5234 e-mail: iamuser@inbox.ru
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper presents the possibility of identifying applications by network traffic. Classical classifier methods are applied for identification. The paper proposes a model for collecting and processing input network data, as well as an algorithm for forming a feature description for classifying network applications to improve the accuracy of application identification. The results of the experiments made it possible to identify the advantages and disadvantages of the classification methods used.

Key words: identification, network traffic, network packets, network data, classification, feature description.

FOR CITATION: G.D. Kuznetsov, V.E. Gai. Application identification by network traffic. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 4. Pp. 7-16. EDN: PMAPDM

Введение

Идентификация приложений по сетевому трафику позволяет определить, какая программа сгенерировала сетевую активность. Сетевые приложения создают уникальный поток данных и обладают характерными поведенческими особенностями.

В рамках данной работы предлагается алгоритм формирования признакового описания. Это необходимо для решения задач классификации приложений, которые выполняют обмен данными по сети. Алгоритм основан на выделении временных, переменных и статистических характеристик поведения программ и призван улучшить точность идентификации приложений на основе анализа их сетевой активности. Анализ сетевого трафика и идентификация сетевых приложений могут быть использованы для мониторинга сетевой активности, определения угроз безопасности, оптимизации работы сетевых приложений, повышения эффективности сетевых систем, контроля пиковых нагрузок на сеть и отслеживания используемых ресурсов сетевыми узлами [1].

Обзор существующих методов идентификацией приложений по сетевому трафику

Для идентификации приложений существует несколько методов анализа.

1. *Анализ статистических характеристик* позволяет классифицировать сетевые приложения за счет выделения количественных свойств. Например, выделение размеров пакетов, отклонение времени между передаваемыми пакетами, их количество [2]. Не все сетевые приложения имеют предсказуемое поведение в процессе обмена информацией; поэтому данный метод может не быть эффективным в задачах классификации сетевых приложений.

2. *Анализ протокола, состояний* – более эффективный метод в случае отсутствия шифрования трафика, поскольку идентификация обеспечивается за счет обращения к удаленному серверу и сверкой возвращенного результата [3].

3. *Анализ образца* – метод, при котором содержимое передаваемых данных в сетевых пакетах может содержать информацию с уникальной последовательностью байтов данных. За счет выделения подобных последовательностей можно классифицировать сетевое приложение. Но зачастую бинарные данные сетевых пакетов передаются зашифрованными, поэтому можно классифицировать только малое количество приложений. Также достаточно сложно определить, к какой программе могут относиться передаваемые аудио- и видеоматериалы. Помимо этого, подобная обработка информации может затрудняться за счет случайных совпадений последовательности байт и объема передаваемых данных.

4. *Анализ сетевого трафика с помощью глубокого исследования пакетов DPI (Deep Package Inspection)* имеет высокую точность в вопросах идентификации трафика. Он анализирует непосредственно содержимое передаваемых данных [4]. Такой метод также требует повышенной производительности ЭВМ, на которой производится классификация трафика. На основе DPI существует пакетный метод классификации трафика. Результат идентификации основывается на анализе содержимого отдельных сетевых пакетов. Также существует метод, основанный на потоках, позволяющий анализировать несколько сетевых посылок в течение некоторого времени. При использовании методов глубокого анализа пакетов могут возникать проблемы конфиденциальности пользовательских данных и программ [5].

5. *Совместное использование поведенческого анализа с эвристическим* позволяет анализировать сетевой трафик за счет выделения характерных особенностей поведения программ. Генерируя сетевую активность, можно определить приложение за счет выделения признаков. Подобный анализ требует значительно меньше вычислительных ресурсов.

Предлагаемая модель и алгоритмы идентификации приложений на основе сетевого трафика

Выполнять идентификацию приложений на основе сетевых пакетов предлагается с помощью статистических методов. Это позволит выполнять операцию быстрее на менее требовательных ЭВМ. Для этого необходимо предварительно проанализировать и обработать входные данные. Идентификацию сетевых приложений рекомендуется реализовать поэтапно: выполнить сбор и обработку данных, сформировать признаки, затем обучить модель. За счет формирования приложениями уникальных поведенческих привычек выполняется формирование уникальных признаков описаний.



Рис. 1. Модель классификации сетевых приложений, этап обучения

Fig. 1. Network application classification model, training stage

Определим обучающую выборку как $X^l = (x_i, y_i)^l, i = \overline{1, l}$, где X^l является обучающей выборкой, x_i – конечная последовательность сетевых дампов данных, y_i принадлежит от 0 до N и обозначают к какому классу относится идентифицируемые сетевые программы.

Дополнительно существует некоторая зависимость (отображение), значения которых известны непосредственно на самих элементах выборки данных участвующих в обучение:

$F: X \rightarrow D_f$, где D_f является множество значений признака, которые допустимы в решение задачи.

Когда классификатор будет обучен, модель можно будет применять для идентификации сетевых приложений. Для оценки работы модели формируются метрики, которые демонстрируют качество работы обученных моделей.

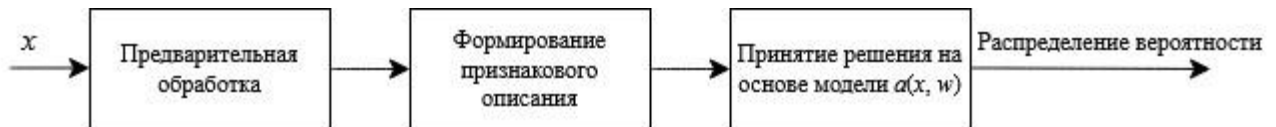


Рис. 2. Модель классификации сетевых приложений, этап применения

Fig. 2. Network application classification model, application stage

На рис. 2 x является конечной последовательностью сетевых дампов данных. $a(x, w)$ в общем виде является самой моделью классификатора, где x – признаки объекта, а w – неизвестные параметры [6, 7]. В процессе обучения модели для идентификации сетевых приложений выполняется поиск критериев оптимальности модели:

$$\sum_i^l L_i(a(x_i, w)) \rightarrow \min_w, \quad (1)$$

где L_i обозначает функцию потерь модели $a(x_i, w)$ на объекте x_i .

Функционал качества модели можно вычислить по формуле:

$$Q: Q(a, X^l) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l L(a(x_i, w), y^*(x_i)) \quad (2)$$

где $y^*(x_i)$ обозначает истинный класс объекта x_i .

Обучение модели μ основано на минимизации эмпирического риска, которая рассчитывается по следующей формуле:

$$\mu(X^l) = \arg \min_{a \in A} Q(a, X^l), \quad (3)$$

где A – множество моделей.

Предлагаемый алгоритм сбора и обработки входных данных

Этап сбора и разметки данных. В процессе накопления сетевых пакетов, которые будут использованы для обучения классификатора, ключевым этапом для идентификации является разметка собранных данных. Она необходима для определения совокупности признаков, характеризующих анализируемый объект. Важно, чтобы разметка была однородной для всех типов данных, так как различные объекты должны описываться одними и теми же свойствами. Различия в этих полях будут определять тип идентифицируемого сетевого приложения.

Этап оптимизации для обработки информации. Размеры исходных файлов, содержащих сетевые данные, в таких форматах, как JSON-структуры, могут быть очень большими. Они содержат не только информацию о назначениях посылок и их характеристиках, но и бинарные данные. Поэтому для эффективной обработки требуется использовать подходы, которые позволяют считывать данные постепенно, по мере необходимости, в зависимости от ресурсов вычислительных машин.

Этап очистки данных. Перед обучением классификатора, необходимо применить фильтр для удаления негативно влияющих сетевых пакетов в процессе генерации моделей, а именно:

1) удаление неполных пакетов – в данных могут присутствовать такие выборки, которые могут исказить обучение моделей. Например, при работе сетевого устройства возможно возникновение пакетов, которые содержат ошибки в процессе приема или передачи данных. Наиболее частые проблемы происходят в процессе установки соединения с удаленным узлом по протоколу TCP/IP;

2) удаление избыточных пакетов – некоторые данные в процессе обмена могут быть избыточными по причине дублирования информации. В свою очередь эти данные будут влиять на точность классификации. Также необходимо проверять и удалять служебную информацию, которая не относится к сетевым приложениям, например ARP запросы;

3) удаление нерелевантных признаков – некоторые поля в пакетах могут содержать в себе данные, которые будут мешать процессу классификации или даже нанести вред в точности определения объекта. Передаваемые служебные данные могут отличаться в зависимости от конфигурации сетевого оборудования и самого наблюдаемого узла. Например, могут быть такие признаки, которые хранят в себе адреса узлов, относящиеся к локальной вычислительной сети, а не внешним адресам в глобальной сети.

Предлагаемая схема обработки данных

1. *Поэтапное считывание данных* необходимо для предотвращения переполнения оперативной памяти вычислительной машины. Поскольку объемы обрабатываемых данных достаточно велики, то и их обработку необходимо выполнять по мере заполнения оперативной памяти.

2. *Форматирование пакетов:* после достижения предела загружаемых данных выполняется этап очистки сетевых данных, которые попадают под категории описанных в этапе очистки данных.

3. После разбора загруженных данных в память приложения выполняется процедура

последующего чтения входного файла с исходными данными, продолжаясь до тех пор, пока исходный файл не закончится.

4. *Сохранение результата*: после завершения обработки исходного файла с сетевым дампом данных программа выполняет сохранения результатов в JSON структуру. Размер выходного файла значительно снизится, что упростит дальнейшую обработку вычисления признакового описания.

На рис. 3 описан первичный алгоритм обработки данных, полученных из анализатора пакетов.

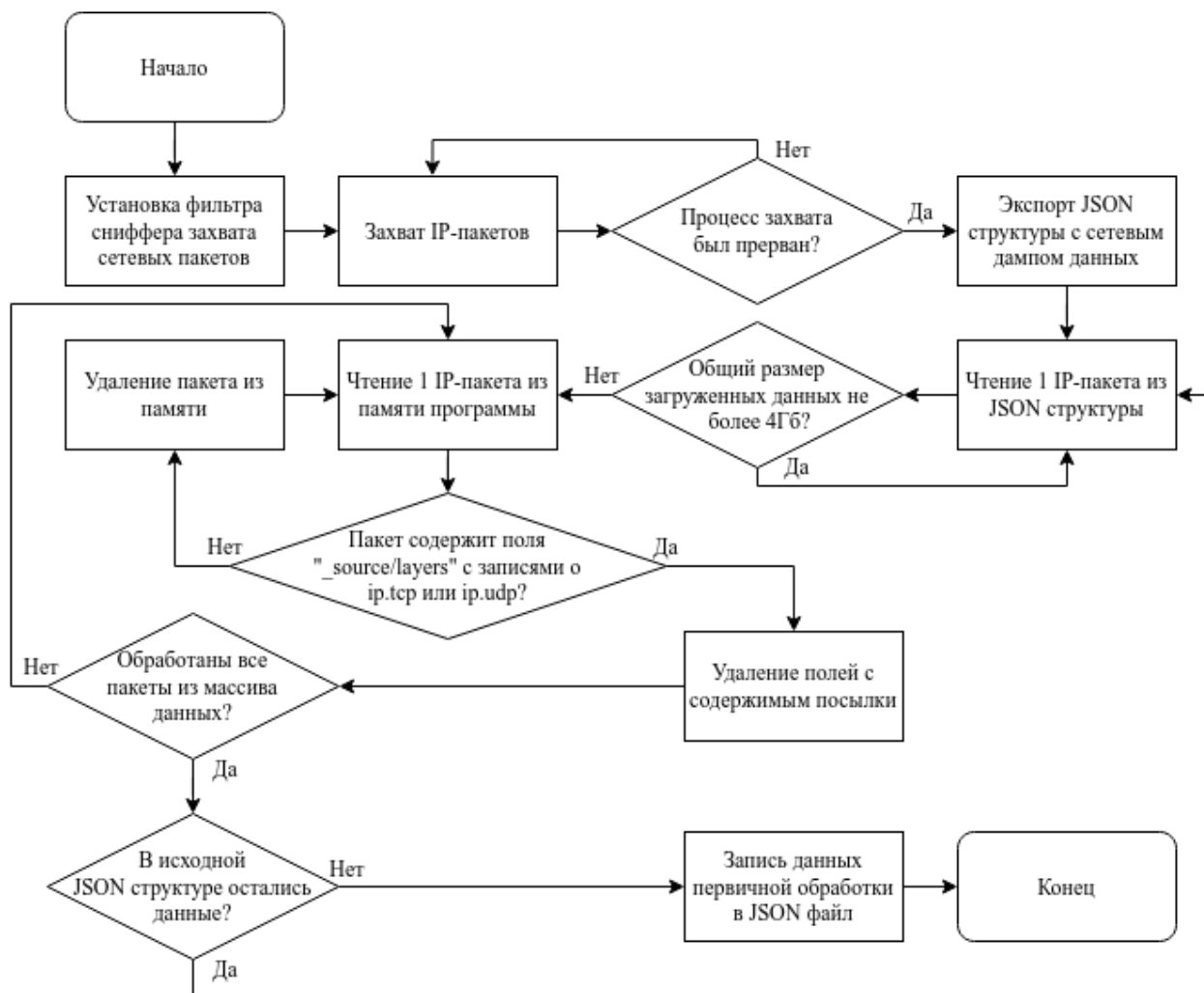


Рис. 3. Алгоритм сбора и предварительной обработки данных

Fig. 3. Algorithm for collecting and pre-processing data

Предлагаемый алгоритм формирования признакового описания сетевого трафика

Повышение точности классификации сетевых приложений напрямую зависит от правильного выделения характерных особенностей их поведения. Необходимо сформировать набор признаков, точно описывающих сетевую активность приложений. Данный процесс можно представить в виде алгоритма (рис. 4).

Этот алгоритм предназначен для выделения уникальных паттернов в сетевых данных, он позволяет отличить одно сетевое приложение от другого. Правильно подобранные признаковые описания позволят классификатору более точно определить, к какому классу относится то или иное приложение.

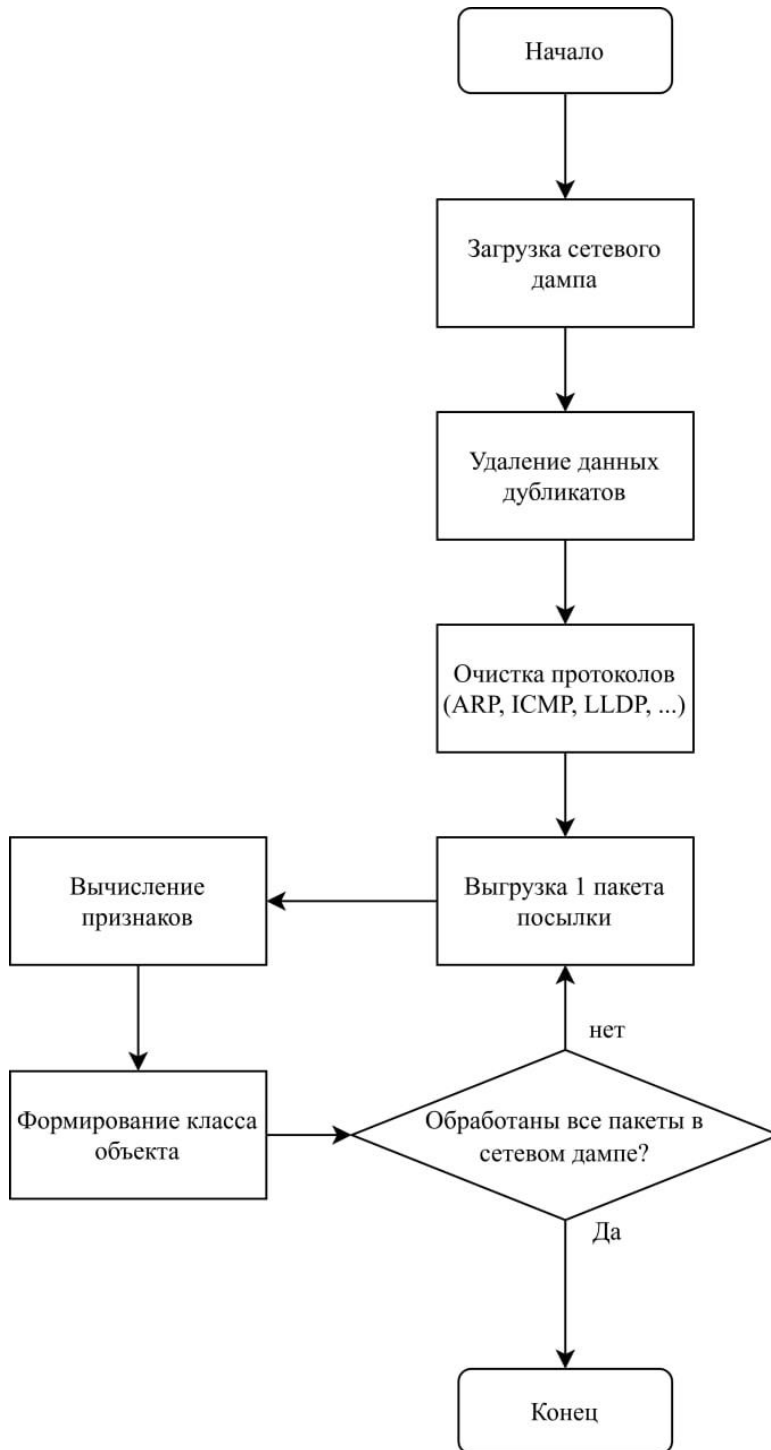


Рис. 4. Алгоритм формирования признакового описания для идентификации приложений по сетевому трафику

Fig. 4. Algorithm for generating a feature description for identifying applications from network traffic

Процесс сбора исходных данных с сетевой активностью приложений

При обучении моделей возникает проблема, связанная с необходимостью генерации обширных баз с данными, так как они имеют отношение к классифицируемым приложениям. Данные должны содержать разнообразные сценарии использования сетевых приложений. Помимо этого, может возникнуть ряд проблем.

1. *Конфиденциальность информации* – сетевые дампы в случае отсутствия шифрования могут содержать приватные данные пользователей (имена, пароли, номера телефонов, личные сообщения и т.д.) Распространение такой информации без согласия пользователей является недопустимым.

2. *Обширное количество сетевых сессий* – трафик, передаваемый по сети, очень разнообразен. Сессии пользователей отличаются по длительности, поведению в используемых сервисах, типу используемых протоколов, объему переданных данных и многим другим параметрам.

3. *Структурирование данных* – собранная информация должна быть структурирована для использования в задачах обучения классификатора. Необходимо создать такой формат данных, который будет удобно обрабатывать.

Формирование базы с трафиком данных осуществляется с использованием специального программного обеспечения, которое позволяет прослушивать все принятые и переданные данные на сетевом интерфейсе без их изменения. Такие программы называются снифферами (например, утилита «Wireshark»). Перед захватом данных в программе можно настроить фильтры, по которым будут отсеиваться не интересующие пакеты. После этого возможен экспорт набранных данных в JSON-структуру.

Для правильного обучения моделей, способных определять сетевые приложения, необходимо установить сниффер на узел, в котором планируется наблюдение за сетевой активностью конкретного приложения, а также обеспечить отсутствие посторонней активности, кроме наблюдаемого класса программы. Данные, которые будут использоваться для анализа, можно собирать на устройствах пользователей, где производится доступ к различным сервисам. Такие наборы данных будут участвовать в процессе детектирования приложений.

Признаки сетевых приложений

Предлагается выделить следующие семь признаков для классификации программ.

1. Признаки сетевых протоколов транспортного уровня TCP/IP и UDP/IP наиболее популярны. Они используются для установки соединения клиентских приложений с удаленными серверами. В процессе первичной обработки входного файла подобные запросы не очищаются.

2. Признак с номером порта назначения в протоколах TCP/IP и UDP/IP предназначен для работы приложений на данных протоколах необходимы номера портов, по которым серверные приложения ожидают входящие соединения. В клиентских приложениях исходящие порты игнорируются, так как они могут изменяться. Удаленный сервис не ищет клиента, а клиент сам инициирует обращение.

3. Признаки адреса удаленного сервера в сети и доменного имени DNS (при его наличии) необходимы для определения к какому ресурсу выполняется обращение. Может учитываться как адрес источника, так и адрес назначения (адрес анализируемого узла игнорируется). Имя сервера, или его доменное имя, необходимо для определения конкретного сервиса, размещенного на сервере. На одном сервере, который имеет один или несколько IP-адресов, может быть размещено несколько сервисов. Например, один сервер обрабатывает несколько web-сайтов.

4. Признаки с временными характеристиками сетевого пакета необходимы для определения обращения пакетов клиентского приложения к удаленным ресурсам во времени.

5. Признак установки сетевых сессий во времени учитывается время прошедшее с открытия предыдущей сетевой сессии. Определяется периодичность установки соединений. Данный признак характеризует уникальное поведение программ во времени.

6. Признак частоты передаваемых пакетов позволяет определить количество переданных фрагментов данных за определенный период времени.

7. Длина сообщений в сетевых пакетах – это средние размеры передаваемых бинарных данных. Размер имеет разную величину в зависимости от используемых сетевых программ.

Для обучения и тестирования моделей машинного обучения был собран объем уникальных данных в 5 гигабайт по каждому из классифицируемых приложений. Данные были разделены на обучающие и тестовые наборы в пропорции 80 к 20 %. Это обеспечивает оптимальный баланс между обучением модели и проведения тестирования модели. Также такое соотношение позволит проверить модель на возможность обобщать результаты на новых наборах сетевых данных. Новые данные также проходят первичную обработку с формированием признаков, затем приложения классифицируются на основе ранее сгенерированных моделей.

Результаты

В эксперименте участвовало несколько подобных программ:

- Telegram – 0 класс;
- Steam – 1 класс;
- Discord – 2 класс.

Предлагаются следующие критерии для оценки адекватности обученных моделей: доля верных ответов (точность), точность (precision), F-мера и полнота [8]. Результаты полученных метрик отражают, что все методы показали высокую точность идентификации сетевых приложений (табл. 1).

Таблица 1.
Метрики качества классификаторов
Table 1.
Classifier quality metrics

Метод	Accuracy	Precision	Recall	F-мера
Model decision tree classifier	0.9999	0.9998	0.9999	0.9999
Model SVM	0.9281	0.9229	0.9285	0.9240
Model logistic regression	0.9998	0.9999	0.9999	0.9999
Model k-nearest neighbors classifier	0.9082	0.9106	0.9082	0.9087
Model multinomial Naive Bayes classifier	0.9263	0.9312	0.9263	0.9274
Model random forest classifier	0.9903	0.9901	0.99	0.9898

С помощью метода кросс-валидации был построен график для оценки качества работы разных моделей обученных на тестовых наборах данных. При тестировании использовались следующие методы:

- SVC (ovo);
- LinearSVC (ova);
- LogisticRegression;
- DecisionTreeClassifier;
- KneighborsClassifier;
- MultinomialNB;
- RandomForestClassifier.

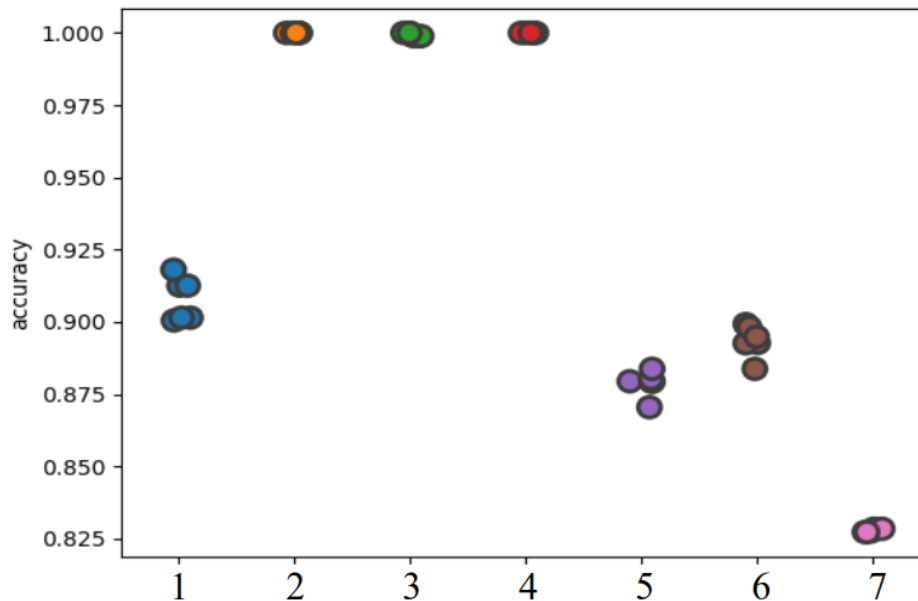


Рис. 5. Результаты точности классификации сетевых приложений различными моделями

Fig. 5. Classification accuracy results of network applications by different models

В процессе проведения вычислительного эксперимента лучшие результаты по точности классификации приложений показали:

- 1) метод опорных векторов;
- 2) метод логистической регрессии;
- 3) метод К ближайших соседей.

Данные результаты демонстрируют высокую эффективность использования методов машинного обучения для идентификации сетевых приложений на основе анализа сетевого трафика. Все используемые методы дают высокую точность идентификации приложений, за исключением «RandomForestClassifier».

Заключение

Рассмотрены методы классификаторов для задач идентификации приложений по сетевому трафику. При выполнении аналитического обзора существующих методов классификации сетевой активности был выявлен ряд недостатков. Предложена новая модель, которая способна идентифицировать сетевые приложения за счет поверхностного анализа сетевого трафика. В ходе проведения вычислительного эксперимента выявлено, что предложенные алгоритмы для идентификации приложений дают сопоставимые результаты с аналогичными системами классификации. Полученные модели могут быть использованы в различных сферах, включая сетевую безопасность, анализ трафика и контроль доступа к сетевым ресурсам.

В перспективе планируется разработка собственного анализатора сетевых дампов данных. Это позволит упростить интеграцию с существующими системами и повысит качество обучаемых моделей классификаторов, а также за счет автоматизации процессов ускорит процесс сбора датасетов. Ключевым направлением станет дополнительное исследование признаков описания сетевого трафика с целью увеличения точности идентификации программ.

Библиографический список

1. **Юхимук, Р.А.** Анализ протоколов сетевого взаимодействия для повышения надежности, быстродействия и безопасности сети организации / Р.А. Юхимук, С.А. Веревкин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 8. С. 286-296.
2. **Веселков, Е.Н.** Проблемы передачи информации в защищенных сетях // Современные материалы, техника и технология. 2019. С. 83-86.
3. **Пальчевский, Е.В.** Анализ и фильтрация протоколов в UNIX-подобных системах, посредством IPTABLES / Е.В. Пальчевский, А.Р. Халиков // Приоритетные задачи и стратегии развития технических наук. 2016. С. 6-9.
4. **Wang, Z.** The applications of deep learning on traffic identification. BlackHat USA. 2015. Т. 24. №. 11. С. 1-10.
5. **Svoboda, J.** Network traffic analysis with deep packet inspection method. Fac. Informatics Masaryk Univ., no. Master's Thesis. 2014.
6. **Утробин, В.А.** Элементы теории активного восприятия изображений // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2010. Т. 81. № 2. С. 61-69.
7. **Воронцов, К.В.** Обзор постановок оптимизационных задач машинного обучения // Общероссийский семинар по оптимизации 3 июня 2020 г. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.mathnet.ru/PresentFiles/27231/voron2020_06_03_opt.pdf
8. **Powers, D.M.W.** Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation //arXiv preprint arXiv:2010.16061. – 2020.

*Дата поступления
в редакцию: 13.09.2024*

*Дата принятия
к публикации: 07.10.2024*

УДК 519.213

EDN: MXHDMW

АНАЛИЗ ФРАКТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТОПОЛОГИЙ МИКРОСТРУКТУР СО СТОХАСТИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

В.Б. КуликовORCID: 0000-0003-2825-7476 e-mail: vb.kulikov@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Б. Куликов**ORCID: 0009-0008-4659-7793 e-mail: akulikov@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.П. Хранилов**ORCID: 0000-0003-1317-5320 e-mail: hranilov@nntu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Предложено решение задачи идентификации одно- и двумерных законов распределения характеристик стохастических структур с фрактальными свойствами. Показано, что если задана матрица данных (измеренные двумерные выборки) топологических параметров структур, то стохастический анализ может опираться на идентифицированную систему одномерных условных плотностей распределения и конструктивно определять систему двух случайных величин. При этом фрактальная геометрия мембранных топологий эффективно исследуется на основе предложенного двумерного R/S-анализа. На основе методов стохастического и фрактального анализа впервые выявлена анизотропия топологических характеристик гибридных газоселективных мембран, что позволило ввести и обосновать математический формализм и представление о двумерной фрактальной размерности Хаусдорфа-Безиковича с двумя «ортогональными» компонентами.

Ключевые слова: идентификация, фрактальная геометрия и фрактальный анализ, двумерная плотность распределения и двумерный R/S-анализ стохастических данных, размерность Хаусдорфа-Безиковича.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Куликов, В.Б. Анализ фрактальных параметров поверхностных топологий микро-структур со стохастическими свойствами / В.Б. Куликов, А.Б. Куликов, В.П. Хранилов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 4. С. 17-26. EDN: MXHDMW

ANALYSIS OF FRACTAL PARAMETERS OF SURFACE TOPOLOGIES OF MICROSTRUCTURES WITH STOCHASTIC PROPERTIES

V.B. KulikovORCID: 0000-0003-2825-7476 e-mail: vb.kulikov@yandex.ruNizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
*Nizhny Novgorod, Russia***A.B. Kulikov**ORCID: 0009-0008-4659-7793 e-mail: akulikov@nntu.ruNizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.P. Khranilov

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

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

Abstract. The paper proposed a solution to the problem of identifying one- and two-dimensional distribution laws of characteristics of stochastic structures with fractal properties. If a data matrix (measured two-dimensional samples) of topological parameters of structures is specified, then stochastic analysis can rely on the identified system of one-dimensional conditional density function and constructively determine a system of two random variables. In this case, the fractal geometry of membrane topologies is effectively studied based on the proposed two-dimensional R/S analysis. The anisotropy of topological characteristics of hybrid gas-selective membranes was revealed for the first time based on stochastic and fractal analysis methods. This made it possible to introduce and substantiate the mathematical formalism and the concept of a two-dimensional Hausdorff-Besicovitch fractal dimension with two «orthogonal» components.

Key words: identification, fractal geometry and fractal analysis, two-dimensional density function and two-dimensional R/S analysis of stochastic data, Hausdorff-Besicovitch dimension.

FOR CITATION: V.B. Kulikov, A.B. Kulikov, V.P. Khranilov. Analysis of fractal parameters of surface topologies of microstructures with stochastic properties. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 4. Pp. 17-26. EDN: MXHDMW

Введение

Стохастический анализ в сочетании с фрактальной геометрией и фрактальным анализом двумерных стохастических данных востребованы в сложных техно- и биосферах современной науки: материаловедении, системах космического наблюдения, микробиологии бактериальных сообществ, атомной и термоядерной энергетике. Структура и динамика этих систем характеризуется полимодальностью законов распределения параметров и закономерностей. Зачастую изучаемая топология двумерных структур фрактальна (мультифрактальна). Методы идентификации шероховатости поверхностей и фрактальных характеристик изложены, в частности, в [1-4]. Для широкого класса задач идентификации одномерных законов распределения случайных величин разработаны эффективные методы [5]. При восстановлении сложных полимодальных законов в [6] рассмотрены новые способы идентификации плотностей распределения на основе регуляризации. Верификация методов выполнена для технических приложений и биомедицины, включая перинатальную диагностику для получения устойчивых решений [7].

В предлагаемой статье излагаются результаты исследования мембранных структур наноразмерного формата: выполнена идентификация, 3D-визуализация и впервые предложенный двумерный R/S-анализ по Херсту. Показано, что для анализа двумерных стохастических пористых структур и интерпретации их свойств необходимо непараметрическое восстановление условных законов распределения системы двух случайных величин, заданных на фрактальной поверхности и двумерный R/S-анализ (обобщение одномерного варианта по Херсту). Двумерный глубинный профиль мембраны измерялся методом атомно-силовой микроскопии (АСМ), после чего для него были идентифицированы одно- и двумерные полимодальные плотности распределения. Две выборки (по 256 элементов) анизотропных параметров Херста впервые в практике исследования и R/S-анализа доопределены идентифицированными плотностями распределения.

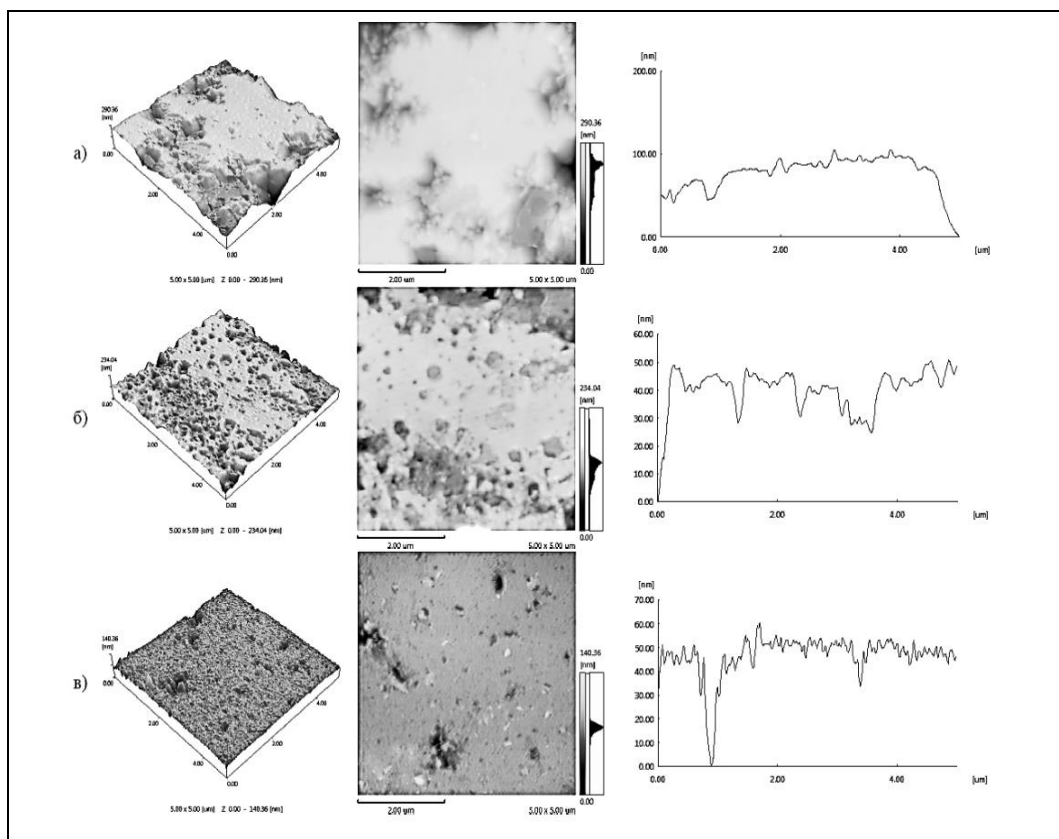
Идентификация и визуализация плотностей распределения двумерных стохастических мембранных структур

Представим краткий обзор технологического аспекта задачи стохастического анализа характеристик мембранных структур. Востребованными наукоемкими технологиями становятся в настоящее время мембранные технологии газоразделения, имеющие важное значение

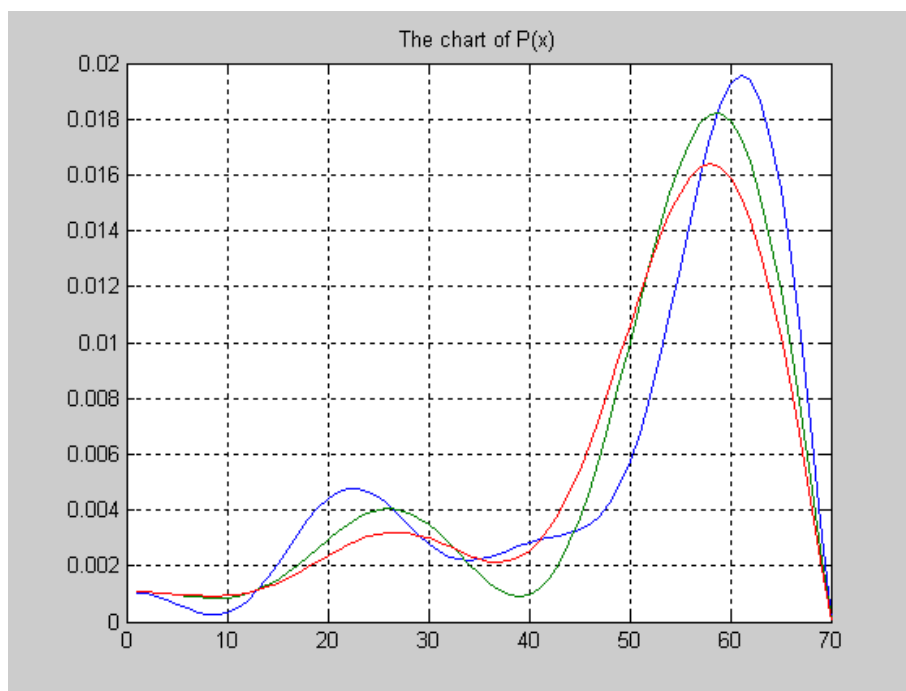
для химической, атомной и многих других отраслей промышленности [8, 9]. При этом новые полимерные мембраны характеризуются высокими значениями механической прочности, избирательности и стойкости к воздействию агрессивных сред. В [10] с этих позиций отмечается перспективность органо-неорганических полимеров блочной структуры. В публикации [11] указывается, что «в этом направлении особую роль играют нано-пористые полимеры, получаемые на основе 2,4-толуиленидиизоцианата и макро-инициаторов – калий-замещенных блок-сополимеров оксидов пропилена и этилена». Для оптимизации концентрации нано-дисперсной фазы в органо-неорганической полимерной мембране и синтеза структур с заранее заданными свойствами по широкому спектру технологических параметров, необходим глубокий анализ исходных материалов мембран, в том числе, контроль стохастических вариаций давления, вязкости, молекулярного веса разделяемых газов. Очень важен также мониторинг процессов загрязнения, деградации топологии и других параметров структур. При исследовании микромембран главенствующую роль играют АСМ-методы, определяющие стохастическую оценку распределения пор (размеры, глубина) на основе измеренных данных [12]. АСМ является «неинвазивной» процедурой, что позволяет изучать мембранные поверхности без предварительной физико-химической обработки. Кроме того, в процессе измерений можно задать бесконтактный режим сканирования топологии микромеханического зонда – кантилевера. В качестве недостатка АСМ можно отметить относительно высокую длительность измерений и требование к исключению вибрационных воздействий на установку.

Настоящая работа является развитием методов исследования, изложенных в [12]. В ходе экспериментов с использованием сканирующего зондового микроскопа были исследованы распределения пор и глубинных профилей полимерных микромембран с различным содержанием полиэдральных октаглицидил-силсесквиоксанов (GI-POSS). Устройство атомно-силовой микроскопии выдает для обработки матрицу данных глубинных профилей структуры размером 256×256 пикселей. Таким образом, изучаемые структуры описываются двумерными выборками, по которым восстанавливается система одномерных плотностей распределения, образующая 3D-поверхность. Ниже будет показано, что дополнение стохастических методов исследования фрактальным анализом представляется перспективным направлением в изучении структур и процессов с самоподобными и хаотическими свойствами.

На рис. 1А приведен снимок топологии и графики распределения глубин пор мембран на центральной линии структур. Мембраны имеют размеры 5 на 5 мкм. Измеренные параметры зависят от температуры разделяемых газов, молекулярного веса и давления, размера пор, фрактальной размерности, характеризующей топологические особенности строения микроструктуры. Глубинные профили мембран по измеренным выборкам идентифицируются разработанными методами как одномерные полимодальные распределения (рис. 1Б). Для идентификации распределений использован созданный авторами комплекс программ в системе MATLAB. Как видно, одномерные плотности распределения глубин пор – полимодальны с максимальным количеством высших мод до 4-5. Полимодальность отражает фрактальность характеристик мембран, что обуславливает сложные связи механических, диффузионных и других химических свойств изучаемых мембран [7]. Рис. 2А дополняет рис. 1 аналогичным изображением для значительных концентраций ПОСС (в 1 масс. %, 2 масс. % и 5 масс. %) и иллюстрирует 3D-график глубинного профиля периодической эталонной мембранной структуры с матрицей данных 512×512 пикселей. Эта мембрана характеризуется бимодальными плотностями распределения глубинного профиля в сечениях вдоль оси X.



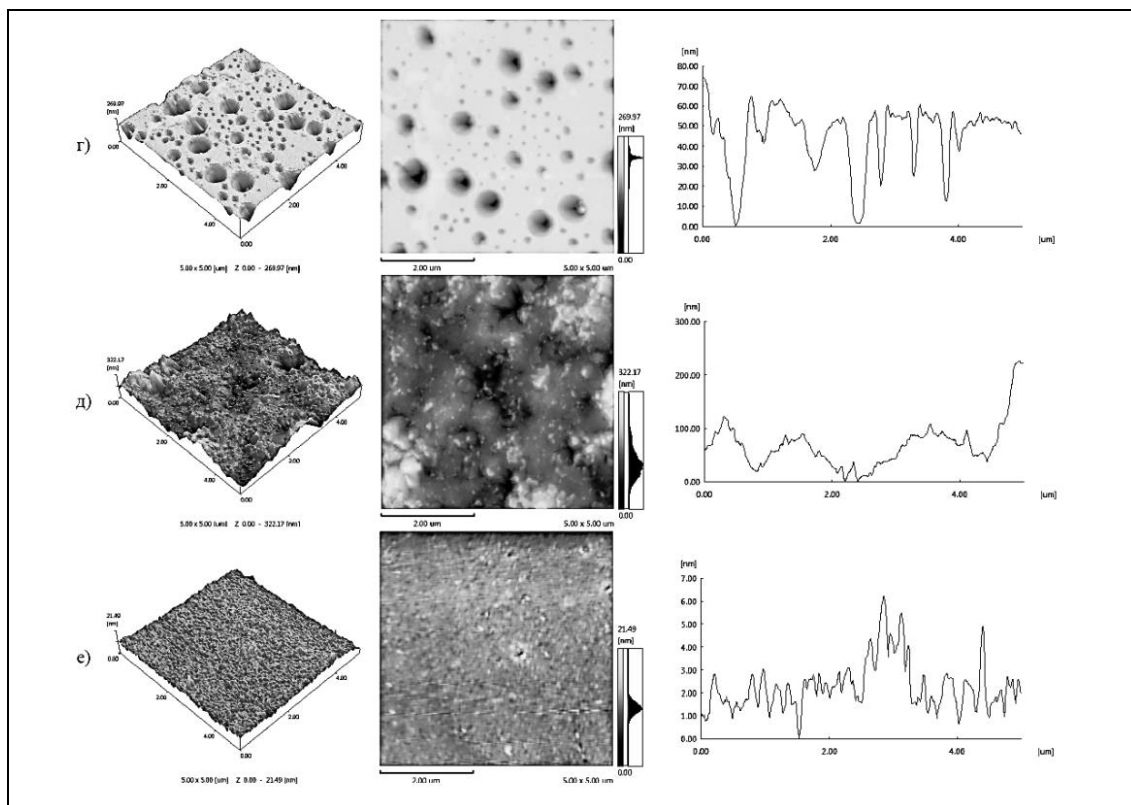
A)



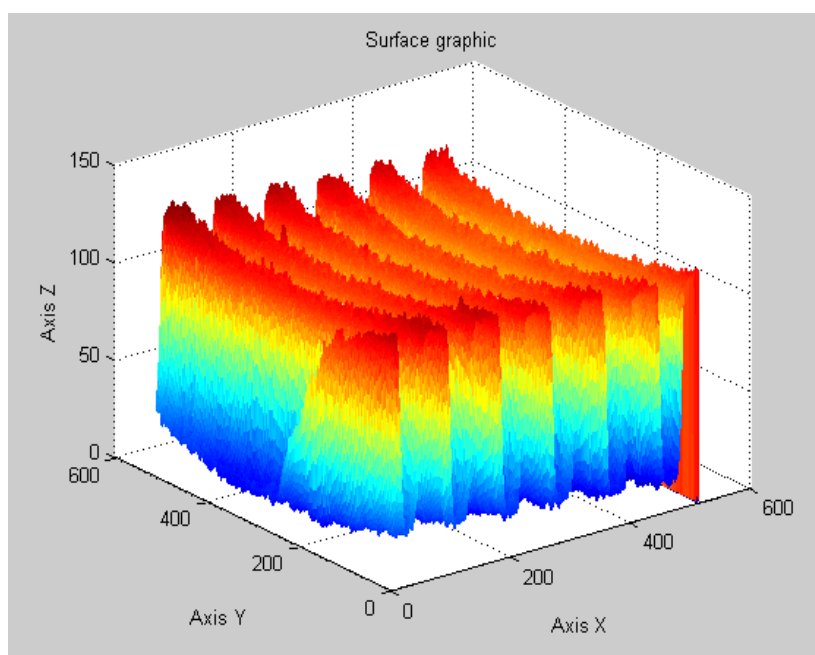
Б)

Рис. 1. А) Снимки атомно-силовой микроскопии топологий [12] и графики глубинного профиля мембран для низких концентраций POSS (масс. %). Б) Законы распределения глубин пор для первых трех выбранных сечений мембраны

Fig. 1. A) Atomic-force microscopy images of membrane topologies [12] and depth profile graphs of membrane for low POSS concentrations (wt.%). Б) Pore depth distribution laws for the first three selected membrane sections



А)



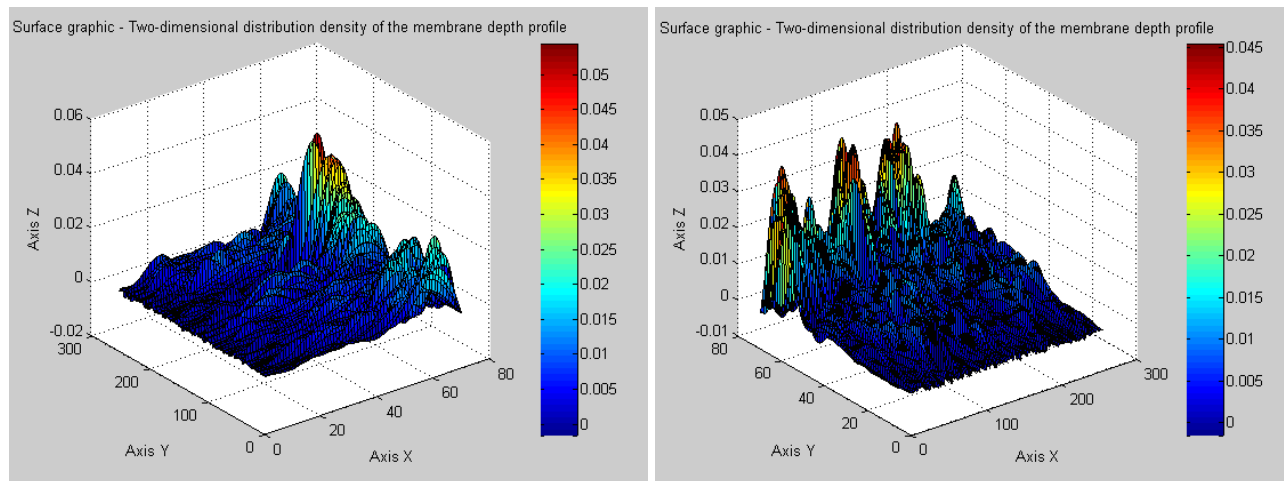
Б)

Рис. 2. А) Снимки атомно-силовой микроскопии топологий [12] и графики глубинного профиля мембран для значительных концентраций POSS (масс. %).

Б) Двумерное изображение периодической эталонной мембраны с матрицей данных 512×512 пикселей

Fig. 2. A) Atomic-force microscopy images of membrane topologies [12] and depth profile graphs of membrane for significant POSS concentrations (wt.%).
 B) Two-dimensional image of a periodic reference membrane with a 512×512 pixel data matrix

На рис. 3А изображен массив одномерных плотностей распределения глубин пор мембраны по оси X при различных значениях по оси Y . Фактически это двумерная система одномерных плотностей распределения, при этом каждая функция плотности рассчитывается за несколько долей секунд в 70 координатах X при выбранном значении Y . На рис. 3Б показана аналогичная система плотностей по оси Y (по X – конкретная координата).



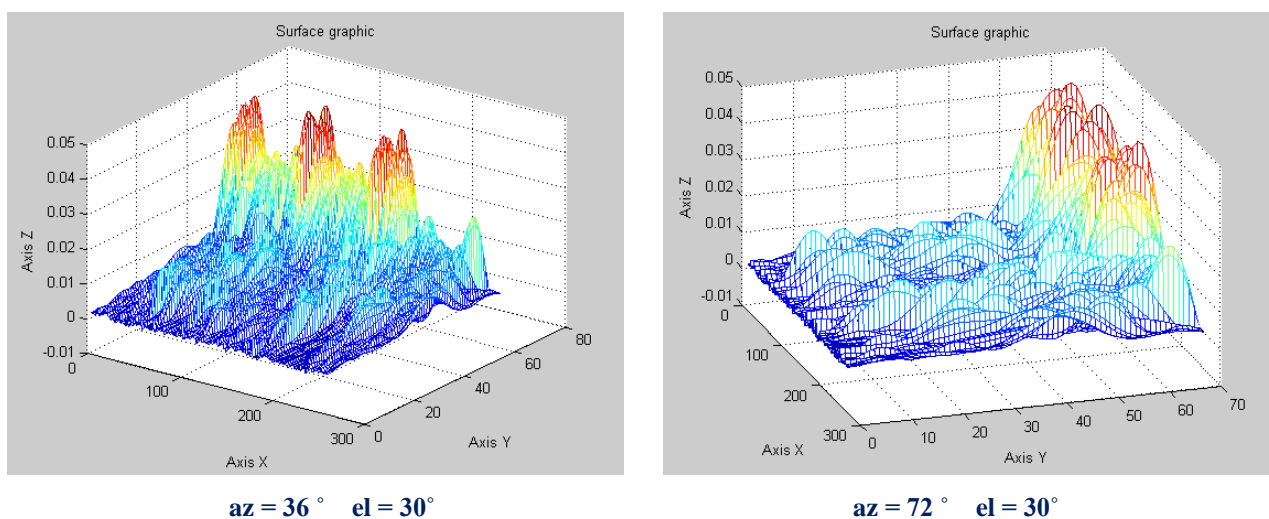
А)

Б)

Рис. 3. Идентифицированные двумерные плотности распределения глубинного профиля мембраны вдоль осей X (Y)

Fig. 3. Identified two-dimensional density functions of the membrane depth profile along the X (Y) axes

Восстановление параметров двумерных стохастических зависимостей в конечном итоге требует высококачественной визуализации графических фигур. Так, 3D-график «двумерной» плотности распределения удобно рассматривать в полярной системе координат. Рис. 4 показывает $p(X, Y)$ в режиме поворота, что повышает наглядность деталей в распределениях структуры, имеющих полимодальный характер, различный по направлениям X и Y .



$$az = 36^\circ \quad el = 30^\circ$$

$$az = 72^\circ \quad el = 30^\circ$$

Рис. 4. Вращение двумерной плотности распределения для мембраны по оси Y (az и el - азимутальный и полярный углы в градусах)

Fig. 4. Rotation of the two-dimensional density function for the membrane along the Y axis (az and el are the azimuthal and polar angles in degrees)

Таким образом, результаты восстановления двумерного распределения по ортогональным направлениям демонстрируют анизотропность функции плотности для глубин пор. Эта особенность подтверждается в рамках предложенного двумерного R/S -анализа. Двумерный стохастический анализ мембран является более эффективным инструментом исследования, позволяющим выявлять тонкую структуру топологий и влияние технологических факторов при изготовлении мембран.

Очевидно, что предложенный подход востребован при обработке конструкций авиационной и космической техники, в «тонком» экспериментальном анализе технологических и физических процессов в аппаратах, включая термоядерные установки типа ИТЭР, токамак Т-10, TEXTOR [4].

Двумерный R/S -анализ характеристик микроструктур

Полиmodalность законов распределения топологических характеристик мембран органично связана с фрактальным анализом, фрактальной геометрией и методологией исследования закономерностей явлений динамического хаоса [7]. В прикладном аспекте изучение фрактальных поверхностей или самоподобных процессов традиционно опирается на статистический метод, а именно – R/S -анализ [13-15]. Нормированный размах R/S связан с показателем Херста – H [13]. Семейство показателей Херста в 256 сечениях мембраны вдоль осей X и Y показано на рис. 5А. В статье [16] говорится, что «метод нормированного размаха Херста позволяет различить случайный и фрактальный временные ряды, а также давать оценку наличия или отсутствия долговременной памяти процесса. Исследуемый одномерный ряд обладает «кратковременной памятью» при $H < 0.5$, если $H > 0.5$ – ряд соответствует фрактальному броуновскому движению (блужданию) с персистентными свойствами. Коэффициенты H в основном выше уровня 0.5 и ниже уровня 1 (фрактальность геометрии поверхности изучаемой мембраны). На некоторых одномерных плотностях показатели H превышают уровень 1».

Авторы полагают, что впервые выявленные «всплески» коэффициентов H для 2D-мембранной структуры аналогичны распределениям с «тяжелыми хвостами» (рис. 5Б).

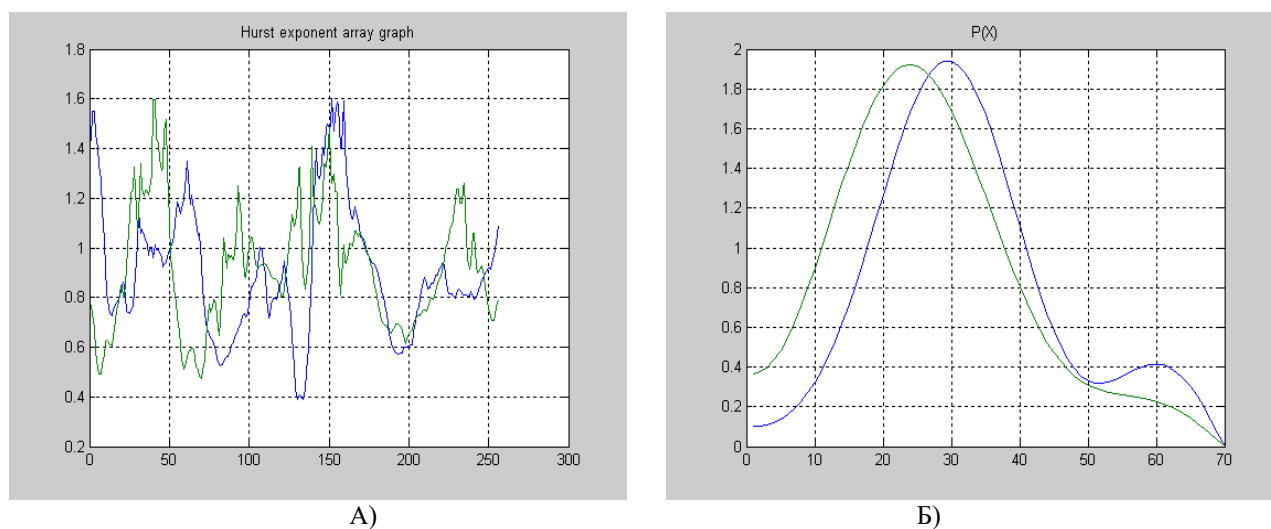


Рис. 5. А) Коэффициенты Херста H глубин пор мембраны вдоль осей X и Y (синий и зеленый цвета соответственно).

Б) Восстановленные одномерные плотности распределения для H

Fig. 5. А) Hurst coefficients H of membrane pore depths along the X and Y axes (blue and green colors, respectively).

Б) Reconstructed one-dimensional density functions for H

Отмеченная особенность отражает сингулярность фрактально-вероятностных свойств конкретной мембранной топологии. Имеет место экстремальная (резко выраженная) глубинная разнородность профилей. R/S -анализ подтверждает фрактальность геометрии и анизотропии свойств пористых поверхностей мембранных структур. Для верификации полученных результатов приведем ниже выдержки из работы [4] ученых НИЦ «Курчатовский институт» по исследованию аморфных пленок на конструкциях из графита в термоядерных установках (ТУ).

«Особенностью условий высокотемпературной плазмы в ТУ является нетривиальная функция распределения турбулентных пульсаций – так называемая негауссовская статистика и перемежаемость» [4, с. 39]. «Пристеночная турбулентность плазмы в токамаке характеризуется такими свойствами, как перемежаемость, негауссова статистика, перенос типа супердиффузии с наличием всплесков амплитуды потоков. Плазма у стенки в токамаке является стохастической системой с динамикой типа Леви с пролетными траекториями» [4, с. 46]. «Фрактальный рост есть следствие сильной неравновесности в системе плазма – стенка и имеет универсальный характер. В токамаке сильная турбулентность пристеночной плазмы может возбуждать флуктуации в осаждаемом потоке, что приводит к фрактальному росту пленок с размерами от нано- до микрометров» [4, с. 34-35]. Для иллюстрации универсальности и значимости разрабатываемого авторами подхода к анализу стохастических и фрактальных структур на рис. 6 показаны поверхности углеводородной пленки токамака Т-10 в процессе экспериментальной эксплуатации [4].

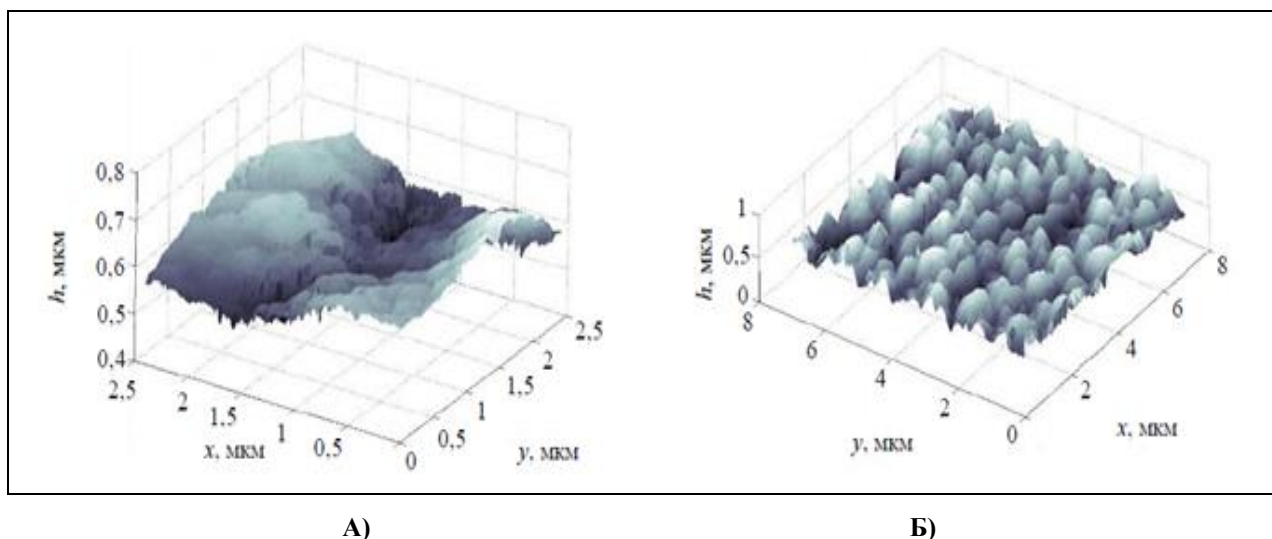


Рис. 6. 3D-структуры углеводородной пленки в установке токамака Т-10 [4]

Fig. 6. 3D structures of hydrocarbon film in the T-10 tokamak installation [4]

Изображение получено с помощью сканирующего туннельного микроскопа. Отмечается, что «форму и иерархическую структуру таких пленок можно классифицировать в рамках фрактальной геометрии, а стохастическая топография поверхности пленок характеризуется показателем Херста, равным 0,68-85, указывая на нетривиальное самоподобие структуры. Фрактальность (пористость) осажденных пленок следует рассматривать как важный вопрос накопления трития в термоядерном реакторе, в том числе, ИТЭР» [4, с. 37]. Таким образом, фрактальное распределение глубинных профилей мембран (пространственная стохастическая характеристика) имеет аналогию со стохастическим движением типа Леви потока частиц в турбулентных полях, определяющих фрактальные свойства микроструктур на этапе технологического синтеза или эксплуатации.

В предшествующей публикации авторов отмечается впервые полученный научный результат: «фрактальный анализ мембран позволяют ввести в рассмотрение для поверх-

ностей двумерную фрактальную размерность Хаусдорфа-Безиковича $D = 3 - H$, которая различается по направлениям X и Y . Фрактальная размерность по направлению X определяется как $D_x = 3 - M\{H_x\}$, где $M\{H_x\}$ – среднее значение показателя Херста по 256 линиям сканирования глубинных профилей. Значение $M\{H_x\} = 0.904$, $D_x = 2.096$. Аналогично вдоль оси Y мембраны компонента $D_y = 3 - M\{H_y\} = 3 - 0.919 = 2.081$ » [16, с. 101-106]. Очевидно, что шероховатость поверхности углеводородной пленки, осажденной на конструкциях токамака Т-10 в процессе эксплуатации, также можно изучать на основе введенных двумерных фрактальных размерностей.

Отметим, что двумерная размерность D , в отличие от традиционного скалярного коэффициента, является вектором, компоненты которого имеют различные плотности распределения (рис. 5Б). Плотности распределения для H в первом приближении можно аппроксимировать линейными (одномодалными) плотностями и корректно ввести двумерную фрактальную размерность Хаусдорфа-Безиковича $D_{x,y} = 3 - M\{H_{x,y}\}$.

Выводы

Исследование стохастических мембранных микроструктур должно опираться на:

- идентифицированную систему одномерных условных плотностей распределения и конструктивно определять систему двух случайных величин;
- обоснованный математический формализм и представление о двумерной фрактальной размерности Хаусдорфа-Безиковича с двумя «ортогональными» компонентами.

Библиографический список

1. Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. Ежегодник. Вып. 12. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2020. – 908 с.
2. **Потапов, А.А.** Фракталы и хаос как основа новых прорывных технологий в современных радиосистемах / Кроновер Р. Фракталы и хаос в динамических системах. Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2006. С. 374-479.
3. **Торохов, Н.А.** Фрактальная геометрия поверхностного потенциала электрохимически осажденных пленок платины и палладия / Н.А. Торохов, В.А. Новиков // Физика и техника полупроводника. 2009. Т. 43. Вып. 8. С. 1109-1115.
4. **Будаев, В.П.** Фрактальная нано- и микроструктура осаждённых пленок в термоядерных установках / В.П. Будаев, Л.Н. Химченко // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, Вып. 3. 2008. С. 34-61.
5. **Тихонов, А.Н.** Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
6. **Куликов, В.Б.** Восстановление полимодальных плотностей вероятности по экспериментальным данным в структурах со стохастическими свойствами // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2014. № 1(1). С. 248-256.
7. **Kulikov, V.** The Stochastic and Singular Analysis of Fractal Signals in Cyber-Physical Systems of Biomedicine / V. Kulikov, A. Kulikov, A. Ignatyev // Society 5.0: Cyberspace for Advanced Human-Centered Society. Studies in Systems, Decision and Control. Cham: Springer, 2021. Vol. 333. p. 239-252.
8. **Vorotyntsev, V.M.** High purification of gases by diffusion through polymer membranes / V.M. Vorotyntsev // Petroleum Chemistry. 2015. Vol. 55. № 4. P. 259-275.
9. **Ямпольский, Ю.П.** Гибридные газоразделительные полимерные мембраны с добавками наночастиц / Ю.П. Ямпольский, Л.Э. Странникова, Н.А. Белов // Мембраны и мембранные технологии. 2014. Т. 4. № 4. С. 231-246.
10. **Kickelbick, G.** Concepts for the incorporation of inorganic building blocks into organic polymers on a nanoscale / G. Kickelbick // Progress in Polymer Science. 2003. Vol. 28. № 1. P. 83-114.
11. **Сазанова, Т.С.** Изучение гибридных полимерных мембран с помощью атомно-силовой микроскопии: топографический анализ поверхности и оценка распределения размеров пор / Т.С. Сазанова, И.В. Воротынцев, В.Б. Куликов, И.М. Давлетбаева, И.И. Зарипов // Мембраны и мембранные технологии. 2016. Т. 6 № 2. С. 166-175.

12. **Sazanova, T.S.** An Atomic Force Microscopy Study of Hybrid Polymeric Membranes: Surface Topographical Analysis and Estimation of Pore Size Distribution / T.S. Sazanova, I.V. Vorotyntsev, V.B. Kulikov, I.M. Davletbaeva, I.I. Zaripov // Petroleum Chemistry. 2016. Vol. 56. N. 5. P. 427-435. Pleiades Publishing, Ltd.
13. **Херст, Г.Э.** Долгосрочная вместимость водохранилищ // Труды Американского общества гражданских инженеров. 1951. Т. 116. С. 770-808.
14. **Петерс, Э.** Хаос и порядок на рынках капитала. Новый аналитический взгляд на циклы, цены и изменчивость рынка / Э. Петерс. – М.: Мир, 2000. – 333 с.
15. **Федер, Е.** Фракталы / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
16. **Куликов, В.Б.** Плотности распределения и фрактальная геометрия двумерных характеристик стохастических структур и систем / В.Б. Куликов, А.Б. Куликов, В.П. Хранилов, А.А. Игнатьев // Математические методы в технологиях и технике. 2024. № 6. С. 101-106.

Дата поступления

в редакцию: 17.09.2024

Дата принятия

к публикации: 14.10.2024

УДК 681.5

EDN: KMTCCU

КВАЗИЛИНЕАРИЗАЦИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А.А. ШабашовORCID: 0009-0000-8320-5201 e-mail: aa.shabashov@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия*АО «Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА»
*Арзамас, Россия***А.А. Плотников**ORCID: 0009-0007-6688-5517 e-mail: artyom152rus@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия*АО «Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА»
Арзамас, Россия

Рассматривается задача представления нелинейной динамической системы в пространстве состояний с помощью метода квазилинеаризации. Разрабатываемый метод построения квазилинейной модели основан на принципах структурно-параметрического синтеза. Первый этап заключается в аналитическом выводе структуры квазилинейной модели из нелинейных дифференциальных уравнений с выявлением варьируемых параметров, от которых зависят динамические характеристики объекта управления. На этапе параметрического синтеза проводится идентификация неизвестных элементов полученной структуры в виде функциональных зависимостей от соответствующих переменных. Для этого решается задача аппроксимации в виде линейной обобщенной модели с использованием алгоритмов разреженной регрессии и эвристического разложения этой модели на необходимые функциональные зависимости. В качестве примера метод квазилинеаризации применен к нелинейной модели изолированного движения беспилотного летательного аппарата в продольном канале относительно центра масс. Предложенный метод может быть применен и к другим моделям с подобными свойствами для решения задач управления нелинейными динамическими системами современными методами теории управления.

Ключевые слова: нелинейная модель, квазилинеаризация, квазилинейная модель, разреженная регрессия, эвристическое разложение, пространство состояний, аппроксимация.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шабашов, А.А. Квазилинеаризация нелинейной модели беспилотного летательного аппарата / А.А. Шабашов, А.А. Плотников // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 4. С. 27-36. EDN: KMTCCU

QUASILINEARIZATION OF NONLINEAR MODEL OF UNMANNED AERIAL VEHICLE

A.A. ShabashovORCID: 0009-0000-8320-5201 e-mail: aa.shabashov@mail.ruNizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
*Nizhny Novgorod, Russia*OJSC Arzamas Scientific and Production Enterprise «TEMP-AVIA»
Arzamas, Russia

A.A. Plotnikov

ORCID: **0009-0007-6688-5517** e-mail: **artyom152rus@yandex.ru**

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

Nizhny Novgorod, Russia

OJSC Arzamas Scientific and Production Enterprise «TEMP-AVIA»

Arzamas, Russia

Abstract. The article discusses the problem of representing a nonlinear dynamic system in the state space using the quasilinearization method. The developed method for constructing a quasilinear model is based on the principles of structural-parametric synthesis. The first stage of construction consists in the analytical output of the structure of the quasilinear model from nonlinear differential equations with the identification of variable parameters, on which the dynamic characteristics of the plant depend. At the stage of parametric synthesis, identification of unknown elements of the resulting structure is carried out in the form of functional dependencies on the corresponding variables. For this, the task of approximation in the form of a linear generalized model using algorithms of sparse regression and heuristic decomposition of this model on the necessary functional dependencies is solved. As an example, the quasilinearization method is applied to the nonlinear model of the isolated movement of the unmanned aerial vehicle in the longitudinal channel relative to the center of the masses. The proposed method can be applied to other models with similar properties to solve problems of controlling nonlinear dynamic systems with modern methods of control theory.

Key words: non-linear model, quasilinearization, quasilinear model, sparse regression, heuristic decomposition, state space, approximation.

FOR CITATION: A.A. Shabashov, A.A. Plotnikov. Quasilinearization of nonlinear model of unmanned aerial vehicle. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 4. Pp. 27-36. EDN: KMTCCU

Введение

Общепринятым подходом к решению задач управления является линеаризация нелинейной динамической системы относительно некоторых опорных точек, характеризующихся рабочими режимами применения объекта. Полученная таким образом линеаризованная модель является лишь приближением исходной системы и не учитывает все аспекты нелинейной динамики. Применительно к беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) такими особенностями могут быть: аэродинамические «ложки», срыв потока на больших углах атаки и т.д. Достижение высокого качества управления во всем диапазоне изменения динамических характеристик предполагает обеспечение наиболее точного представления нелинейной модели объекта в необходимой для синтеза регуляторов форме. Решение рассмотренных задач целесообразно производить с помощью методов современной теории управления, что подразумевает представление системы в пространстве состояний.

Перспективным направлением в представлении нелинейных динамических систем в пространстве состояний является преобразование исходной системы в квазилинейную форму с изменяющимися параметрами (*quasi-Linear Parameter Varying – qLPV*) специальным образом [1]. В зависимости от априорной информации о динамике исследуемого объекта управления могут быть применимы различные методы идентификации систем, например, аналитический вывод, численные методы [2], квазилинеаризация [3], аппроксимация с использованием мягких вычислений (искусственных нейронных сетей, нечеткой логики и т.д.). Перечисленные методы, за исключением последнего, относятся к классу идентификации в узком смысле, что подразумевает наличие достаточно подробной информации о нелинейной динамике. Аппроксимация с помощью мягких вычислений, напротив, относится к классу идентификации в широком смысле и требует только достаточного объема данных в виде «вход-выход». Точность такой аппроксимации существенно зависит от настроек выбранного инструмента: типа и структуры нейронной сети, базы правил нечеткой модели и т.д. В некоторых случаях система нелинейных дифференциальных уравнений рассматриваемого объекта управления полностью известна, но не соответствует нормальной форме Коши. В результате

структурного преобразования к указанной форме появляются неизвестные переменные, которые необходимо идентифицировать по имеющимся исходным данным.

Целью настоящей работы является разработка эффективного метода квазилинеаризации нелинейной модели БПЛА с высокой точностью представления динамической системы по исходным данным о характеристиках объекта управления.

1. Структурный синтез квазилинейной модели

Для решения задач стабилизации относительно центра масс удобно использовать нелинейную модель пространственного движения БПЛА как твердого тела в проекциях на оси скоростной системы координат. В некоторых случаях при необходимости можно не учитывать взаимное влияние продольного и бокового каналов и пренебречь перекрестными связями между ними. Так, например, нелинейная модель изолированного движения БПЛА в продольном канале может иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{\alpha}(t) &= \omega_z(t) - \frac{Y_a(t)}{mV}, \\ \dot{\omega}_z(t) &= \frac{M_z(t)}{J_z}, \\ \dot{\vartheta}(t) &= \omega_z(t), \\ n_y(t) &= \frac{Y_a(t)}{mg(H)},\end{aligned}\quad (1)$$

где $\alpha(t)$ – угол атаки [рад], $\omega_z(t)$ – угловая скорость тангажа [рад/с], $\vartheta(t)$ – угол тангажа [рад], $n_y(t)$ – нормальная перегрузка [g], $Y_a(t)$ – подъемная аэродинамическая сила [Н], $M_z(t)$ – аэродинамический момент тангажа [Н·м], J_z – момент инерции тангажа [кг·м²], $g(H)$ – ускорение свободного падения [м/с²], H – высота [м], V – модуль воздушной скорости [м/с], m – масса БПЛА [кг].

Модель рулевого привода для гипотетического БПЛА может быть описана аperiodическим звеном и иметь вид:

$$T\dot{\delta}_B + \delta_B = \delta_B^{\text{зад}}, \quad (2)$$

где δ_B – угол отклонения руля высоты [рад], $\delta_B^{\text{зад}}$ – управляющий сигнал в продольном канале [рад], T – постоянная времени привода [с].

Нелинейная динамическая система может быть представлена в пространстве состояний с помощью qLPV модели:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(\theta(t))x(t) + B(\theta(t))u(t), \\ y(t) &= C(\theta(t))x(t) + D(\theta(t))u(t),\end{aligned}\quad (3)$$

где $x(t) \in \mathbb{R}^m$ – вектор состояния, $y(t) \in \mathbb{R}^l$ – вектор измерений, $u(t) \in \mathbb{R}^k$ – вектор управления, $\theta(t) = [\theta_1(t) \theta_2(t) \dots \theta_N(t)] \in \Omega \subset \mathbb{R}^N$ – вектор варьируемых параметров (в данном случае зависящий в т. ч. от состояния), N – количество варьируемых параметров, $\Omega = [\theta_1^{\min} \theta_1^{\max}] \times [\theta_2^{\min} \theta_2^{\max}] \times \dots \times [\theta_N^{\min} \theta_N^{\max}]$ – замкнутый гиперкуб, $\theta_n^{\min}, \theta_n^{\max}$ – диапазоны изменения варьируемых параметров.

Чтобы представить систему (1) в виде (3) сначала определим варьируемые параметры, от которых зависят характеристики нелинейной модели. Далее будем считать все параметры модели зависимыми от времени t за исключением J_z, g, H, V, m , которые в рамках короткопериодического движения предполагаются постоянными величинами.

Согласно [4], аэродинамические силу и момент можно представить в виде:

$$Y_a = c_y q S, \quad M_z = m_z q S b_a, \quad (4)$$

где c_y , m_z – аэродинамические коэффициенты силы и момента, q – скоростной напор [Н/м²], S , b_a – характерные площадь [м²] и размер [м].

Аэродинамические коэффициенты сил и моментов гипотетического БПЛА в общем случае являются функциями многих переменных:

$$c_y = c_y(M, \alpha, \beta, \delta_B, \delta_H, \delta_\delta), \quad m_z = m_z(M, \alpha, \beta, \delta_B, \delta_H, \delta_\delta), \quad (5)$$

где M – число Маха, δ_H, δ_δ – углы отклонения рулей направления и элерона [рад].

Пренебрежем перекрестными связями между каналами и проведем разложение рассмотренных коэффициентов в следующей форме:

$$\begin{aligned} c_y(M, \alpha, \delta_B) &= c_{y\alpha}(M, \alpha, \delta_B) \cdot \alpha + c_{y\delta_B}(M, \alpha, \delta_B) \cdot \delta_B + c_{y0}(M), \\ m_z(M, \alpha, \delta_B) &= m_{z\alpha}(M, \alpha, \delta_B) \cdot \alpha + m_{z\delta_B}(M, \alpha, \delta_B) \cdot \delta_B + m_{z0}(M). \end{aligned} \quad (6)$$

Подставляя выражения (4) в систему (1) с учетом (6), $q = \rho_H V^2 / 2$ и $V = a_H M$, нелинейную модель изолированного движения в продольном канале представим в виде:

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= -c_{y\alpha}(M, \alpha, \delta_B) \frac{\rho_H a_H M S}{2m} \cdot \alpha + \omega_z - c_{y\delta_B}(M, \alpha, \delta_B) \frac{\rho_H a_H M S}{2m} \cdot \delta_B - \\ &\quad - c_{y0}(M) \frac{\rho_H a_H M S}{2m}, \\ \dot{\omega}_z &= m_{z\alpha}(M, \alpha, \delta_B) \frac{\rho_H a_H^2 M^2 S b_a}{2J_z} \cdot \alpha + m_{z\delta_B}(M, \alpha, \delta_B) \frac{\rho_H a_H^2 M^2 S b_a}{2J_z} \cdot \delta_B + \\ &\quad + m_{z0}(M) \frac{\rho_H a_H^2 M^2 S b_a}{2J_z}, \\ \dot{\vartheta} &= \omega_z, \\ n_y &= c_{y\alpha}(M, \alpha, \delta_B) \frac{\rho_H a_H^2 M^2 S}{2mg(H)} \cdot \alpha + c_{y\delta_B}(M, \alpha, \delta_B) \frac{\rho_H a_H^2 M^2 S}{2mg(H)} \cdot \delta_B + \\ &\quad + c_{y0}(M) \frac{\rho_H a_H^2 M^2 S}{2mg(H)}, \end{aligned} \quad (7)$$

где ρ_H – плотность воздуха как функция от высоты H [кг/м³], a_H – скорость звука на высоте H [м/с].

Как видно из анализа системы уравнений (7), характеристики нелинейной модели зависят от множества переменных, которое можно представить в виде вектора варьируемых параметров для продольного канала:

$$\theta_{\Pi} = [H \quad M \quad \alpha \quad \delta_B].$$

Далее, предположив, что переходной процесс БПЛА совершается из установившегося движения (т.е. движение с нулевыми значениями начальных сил и моментов), статические составляющие $c_{y0}(M)$, $m_{z0}(M)$ будем считать равными нулю. Теперь можно записать нелинейную модель изолированного движения в продольном канале (7) вместе с уравнением динамики рулевого привода (2) в qLPV форме (3):

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \omega_z \\ \delta_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_4(\theta_\Pi) & 1 & -a_5(\theta_\Pi) \\ a_2(\theta_\Pi) & 0 & a_3(\theta_\Pi) \\ 0 & 0 & -T^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \omega_z \\ \delta_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T^{-1} \end{bmatrix} \delta_B^{\text{зад}}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} n_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_6(\theta_\Pi) & 0 & a_7(\theta_\Pi) \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \omega_z \\ \delta_B \end{bmatrix},$$

где

$$a_2(H, M, \alpha, \delta_B) = m_{z\alpha}(M, \alpha, \delta_B) \frac{\rho_H a_H^2 M^2 S b_a}{2J_z}, \quad a_3(H, M, \alpha, \delta_B) = m_{z\delta_B}(M, \alpha, \delta_B) \frac{\rho_H a_H^2 M^2 S b_a}{2J_z},$$

$$a_4(H, M, \alpha, \delta_B) = c_{y\alpha}(M, \alpha, \delta_B) \frac{\rho_H a_H M S}{2m}, \quad a_5(H, M, \alpha, \delta_B) = c_{y\delta_B}(M, \alpha, \delta_B) \frac{\rho_H a_H M S}{2m},$$

$$a_6(H, M, \alpha, \delta_B) = c_{y\alpha}(M, \alpha, \delta_B) \frac{\rho_H a_H^2 M^2 S}{2mg(H)}, \quad a_7(H, M, \alpha, \delta_B) = c_{y\delta_B}(M, \alpha, \delta_B) \frac{\rho_H a_H^2 M^2 S}{2mg(H)}.$$

2. Параметрический синтез квазилинейной модели

Пусть исходные данные об аэродинамических коэффициентах гипотетического БПЛА представлены в общей форме (5). Тогда, на основании синтезированной структуры qLPV модели (8), необходимо провести идентификацию неизвестных параметров

$$c_{y\alpha}(M, \alpha, \delta_B), \quad c_{y\delta_B}(M, \alpha, \delta_B), \quad m_{z\alpha}(M, \alpha, \delta_B), \quad m_{z\delta_B}(M, \alpha, \delta_B)$$

в виде функциональных зависимостей от соответствующих переменных.

Одним из вариантов получения разложения коэффициентов в необходимой форме (6) является аппроксимация исходных зависимостей (5) специальным образом. Для реализации подобного преобразования заметим, что в первом приближении коэффициенты аэродинамических сил и моментов могут быть представлены гладкими всюду непрерывными функциями, которые зависят лишь от малого числа входных параметров. Следовательно, нет необходимости рассматривать все возможные нелинейные комбинации, а достаточно вести поиск в малом наборе зависимостей требуемого вида [5, 6].

В результате задача параметрического синтеза может быть сведена к задаче аппроксимации с помощью линейной обобщенной модели:

$$f(x) \approx \sum_{i=1}^m \theta_i(x) \xi_i = \Theta(x) \Xi, \quad (9)$$

где $f(x) = [f_1(x_1), \dots, f_n(x_n)] \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ – наборы значений аппроксимируемой зависимости для соответствующих наборов входных параметров $x = [x_1, \dots, x_n] \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $x_i = [p_1, \dots, p_b] \in \mathbb{R}^{1 \times b}$ – входные параметры i -ого набора для $f_i(x_i)$, $\Theta(x) = [\theta_1(x), \dots, \theta_m(x)] \in \mathbb{R}^{n \times m}$ – библиотека функций кандидатов, $\theta_i(x) = [\theta_i(x_1), \dots, \theta_i(x_n)] \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ – наборы значений i -ой функции кандидата, $\Xi = [\xi_1, \dots, \xi_m] \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ – вектор коэффициентов перекрестных связей.

Модель (9) вычисляется путем нахождения вектора коэффициентов Ξ на основе задачи выпуклой разреженной регрессии с регуляризацией по L_1 норме:

$$\Xi = \arg \min_{\Xi} \|f(x) - \Theta(x)\Xi\|_2 + \varepsilon \|\Xi\|_1, \quad (10)$$

где ε – настраиваемый параметр, характеризующий разреженность.

Для решения задачи (10) может быть использован последовательный метод наименьших квадратов с порогом [7]. Далее представлено его описание.

Алгоритм 1 Последовательный метод наименьших квадратов с порогом

Вход: $f(x)$ – наборы значений аппроксимируемой зависимости, x – наборы входных параметров, $\Theta(x)$ – библиотека функций кандидатов, ε – параметр разреженности модели, k_{\max} – максимальное число итераций.

Выход: Ξ – вектор коэффициентов перекрестных связей.

1. Вычислить начальное приближение $\Xi^0 = \Theta^{-1}(x)f(x)$;

2. **Цикл** $k < k_{\max}$

3. $k = k + 1$;

4. Найти коэффициенты меньше установленного порога $I_\varepsilon = |\Xi^k| < \varepsilon$;

5. Исключить из отбора малые коэффициенты $\Xi^k(I_\varepsilon) = 0$;

6. Найти оставшиеся коэффициенты $I_s \sim I_\varepsilon$;

7. Сформировать новую k оценку $\Xi^k(I_s) = \Theta^{-1}(I_s, :)f(x)$;

8. **Конец цикла**

Выбор нужного набора функций кандидатов зависит от вида необходимого представления $f(x)$. Тогда для получения формы (6) удобно использовать следующую полиномиальную модель:

$$L(x) = \sum_{i=0}^{P_{\max}} \sum_{j=0}^{P_{\max}} \dots \sum_{l=0}^{P_{\max}} \left(\xi_a \cdot \underbrace{p_1^i \cdot p_2^j \cdot \dots \cdot p_b^l}_{\theta_a}, \quad a = a+1 \right), \quad a = 1, \dots, m, \quad (11)$$

где P_{\max} – максимальная степень полинома. Причем каждая уникальная комбинация степеней $p_1^i \cdot p_2^j \cdot \dots \cdot p_b^l$ из (11) соответствует определенной функции кандидату θ_a из (9).

Для получения необходимого разложения по форме (6) ряд (11) необходимо представить в виде:

$$L(x) = \sum_{i=1}^M L_i(x) \cdot p_{l_i}, \quad (12)$$

где M – число разложений, $L_i(x)$ – полиномиальные модели, входящие в состав (11), определяемые в результате разложения, $p_{l_1}, p_{l_2}, \dots, p_{l_M}$ – параметры, для которых нужно найти разложение.

Модель по форме (11) допускает разнесение параметров по форме (12). Однако в общем случае их количество может быть достаточно большим, что усложняет эвристический способ разложения. Предположим, что наибольший вклад в изменение аэродинамических коэффициентов вносят элементы малых порядков без перекрестных связей между входными параметрами, тогда процесс разложения может быть автоматизирован для исключения ошибок, связанных с «ручным» разбиением.

Если коэффициент ξ_a при функции кандидате θ_a учитывает несколько входных параметров и является достаточно большим, его следует дополнительно разложить на несколько составляющих, которые могут быть равномерно разнесены между всеми $L_i(x) \cdot p_{l_i}$, если p_{l_i} входит в θ_a .

Далее представлен эвристический алгоритм разложение ряда, облегчающий переход модели из формы (11) в (12). Для удобства работы полиномиальная модель $L(x)$, множество участвующих в разложении аргументов P , библиотека функций кандидатов θ_a реализованы в алгоритме в виде строковых массивов. В результате, задача параметрического синтеза сводится к решению задачи (10) на основе алгоритмов 1 и 2.

Алгоритм 2 Алгоритм эвристического разложения функциональной зависимости

Вход: $L(x)$ – полиномиальная модель в форме (11), P – множество аргументов p , участвующих в разложении, M – количество параметров, участвующих в разложении.

Выход: $L_i(x)$ – полиномиальные модели из (12).

1. Инициализация $L_i(x) = []$, $i = 1, \dots, M$;
 2. **Цикл** по всем элементам θ_a из $L(x)$;
 3. **Цикл** по всем элементам p_{l_i} из P ;
 4. $\theta'_a = \theta_a$;
 5. **Если** $(\theta'_a \cap p_{l_i}) = \emptyset$
 6. Перейти на новую итерацию цикла по p_{l_i} ;
 7. **Конец если**
 8. Понизить степень элемента p_{l_i} в θ'_a ;
 9. Сформировать множество R не включающее в себя p_{l_i} : $R = P \setminus p_{l_i}$;
 10. **Если** $(\theta'_a \cap R) = \emptyset$ или степень p_{l_i} больше степеней $\forall p_i \in R$ входящих в θ'_a
 11. $L_i(x) = L_i(x) + \xi_a \cdot \theta'_a$;
 12. **Конец если**
 13. **Если** степень p_{l_i} равна степеням $\forall p_i \in R$ входящих в θ'_a
 14. $\xi'_a = \xi_a / M$;
 15. **Цикл** по всем элементам p_{l_k} из P
 16. $\theta'_a = \theta_a$;
 17. Понизить степень элемента p_{l_k} в θ'_a ;
 18. $L_k(x) = L_k(x) + \xi'_a \cdot \theta'_a$;
 19. **Конец цикла**
 20. **Конец если**
 21. Перейти на новую итерацию цикла по θ_a ;
 22. **Конец цикла**
 23. $a = a + 1$;
 24. **Конец цикла**
-

3. Численное моделирование

Проведем численное моделирование для проверки адекватности разработанного метода. В качестве параметров модели, соответствующих (8), использованы характеристики объекта из работы [8]. Тогда аэродинамические коэффициенты подъемной силы и момента тангажа могут быть представлены следующими функциональными зависимостями:

$$\begin{aligned}
c_y(M, \alpha, \delta_B) &= 0,1741 \cdot \alpha + 0,004766 \cdot \alpha^2 - 0,01185 \cdot M \cdot \alpha + \\
&\quad + 0,1155 \cdot \delta_B + 0,0008479 \cdot \alpha \cdot \delta_B - 0,0182 \cdot M \cdot \delta_B, \\
m_z(M, \alpha, \delta_B) &= -0,0294 \cdot \alpha - 0,0006682 \cdot \alpha^2 - 0,005962 \cdot M \cdot \alpha - \\
&\quad - 0,04525 \cdot \delta_B - 0,0005829 \cdot \alpha \cdot \delta_B - 0,007453 \cdot M \cdot \delta_B.
\end{aligned} \tag{13}$$

Выбранные диапазоны определения параметров модели (13) представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Диапазоны выходных параметров

Table 1.
Output parameter ranges

Параметр	Наименование	Диапазон	Единицы измерения
1	2	3	4
M	Число Маха	[3 6]	—
α	Угол атаки	[-12 12]	[град]
δ_B	Угол отклонения руля высоты	[-15 15]	[град]

Проведем разложение исходных функций (13) в соответствии с формой (6). Максимальная степень полиномиального члена, участвующего в разложении, составляет $P_{\max} = 4$. Применяя алгоритмы 1 и 2, получим следующие функциональные зависимости:

$$\begin{aligned}
c_y(M, \alpha, \delta_B) &\approx c_{y\alpha}(M, \alpha) \cdot \alpha + c_{y\delta_B}(M, \alpha) \cdot \delta_B, \\
m_z(M, \alpha, \delta_B) &\approx m_{z\alpha}(M, \alpha) \cdot \alpha + m_{z\delta_B}(M, \alpha) \cdot \delta_B,
\end{aligned} \tag{14}$$

где

$$\begin{aligned}
c_{y\alpha}(M, \alpha) &= 0,1741 - 0,01185 \cdot M + 0,004766 \cdot \alpha, \\
c_{y\delta_B}(M, \alpha) &= 0,1155 - 0,0182 \cdot M + 0,0008479 \cdot \alpha, \\
m_{z\alpha}(M, \alpha) &= -0,0294 + 0,005962 \cdot M - 0,0006682 \cdot \alpha, \\
m_{z\delta_B}(M, \alpha) &= -0,04525 + 0,007453 \cdot M - 0,0005829 \cdot \alpha.
\end{aligned}$$

Точность полученной аппроксимации (14) относительно исходных данных оценивается по критериям (15) и для равномерно распределенной случайной выборки $n_s = 10^6$ представлена в табл. 2.

$$\begin{aligned}
E_{\max} &= \max_{i=1, \dots, n} \max \left| (k_0 - k_A) k_0^{-1} \right| \cdot 100\%, \\
E_{\text{mean}} &= \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} \max \left| (k_0 - k_A) k_0^{-1} \right| \cdot 100\%,
\end{aligned} \tag{15}$$

где n_s – размер случайной выборки, k_0, k_A – исходный и полученный в результате аппроксимации аэродинамические коэффициенты.

Таблица 2.
Точность аппроксимации аэродинамических коэффициентов

Table 2.
Approximation accuracy of aerodynamic coefficients

Ошибка	c_y , [%]	m_z , [%]
1	2	3
Максимальная (E_{\max})	$2,217 \cdot 10^{-10}$	$4,898 \cdot 10^{-9}$
Средняя (E_{mean})	$3,585 \cdot 10^{-12}$	$1,711 \cdot 10^{-11}$

Согласно результатам, полученное разложение (14) по форме (6) обеспечивает высокую точность аппроксимации исходных функций (13). Проведем сравнительный анализ путем численного моделирования исходной нелинейной модели (1) и ее qLPV формы (8). В качестве условий моделирования выбран фиксированный режим с высотой полета $H = 23$ км и числом Маха $M = 5$. Соотношения параметров объекта для такого режима представлены в табл. 3.

Таблица 3.
Соотношение параметров объекта управления на выбранном режиме полета

Table 3.
The ratio of the parameters of the control object in the selected flight mode

Параметр	Значение
$Q \cdot S \cdot L / J_z$	3643,4
$Q \cdot S / m \cdot V$	0,6053
V / g	151,1792
T	0,015

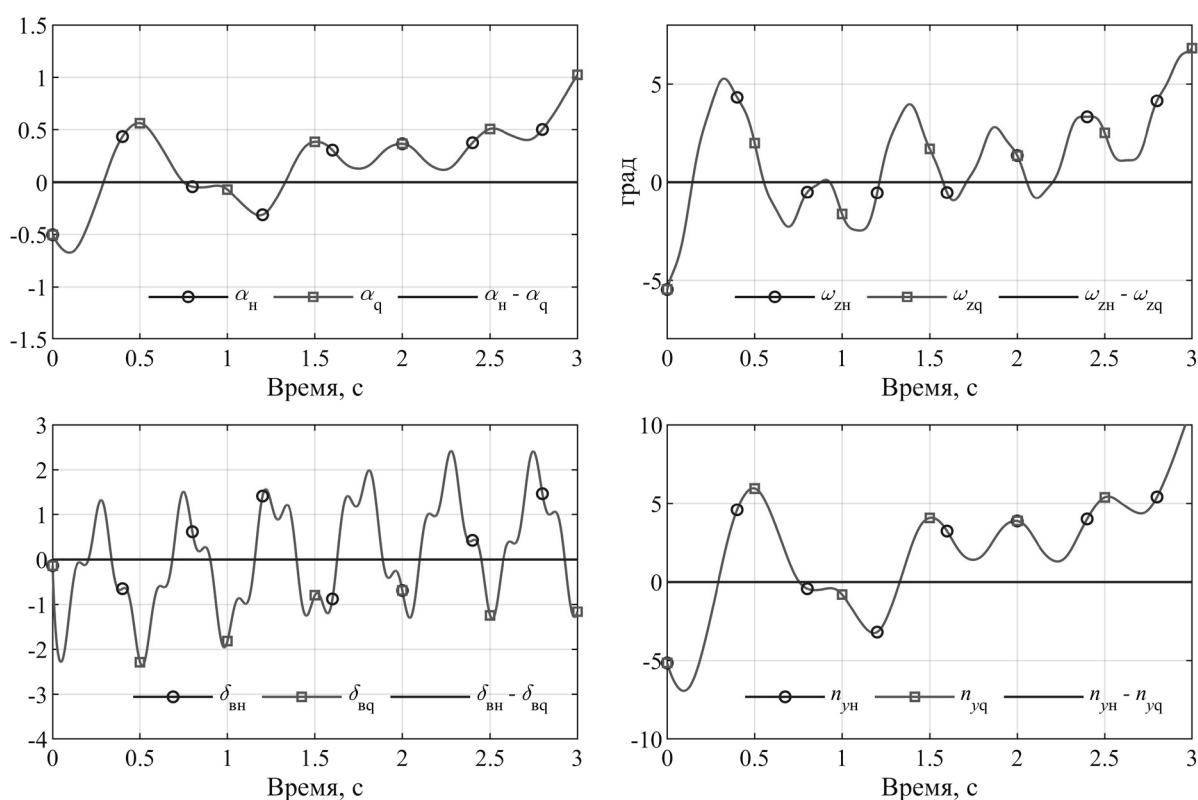


Рис. 1. Моделирование динамик нелинейной модели и ее qLPV формы

Fig. 1. Modeling of the dynamic of the nonlinear model and its qLPV form

Управляющий сигнала на рассматриваемом режиме определен следующим законом:

$$\delta_B^{\text{зад}} = 0,5730 \cdot \sin(6,5 \cdot 2 \cdot \pi \cdot t) + 0,5730 \cdot \cos(0,2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot t) + 1,4325 \cdot \cos(2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot t).$$

Результат моделирования нелинейной модели (1) с учетом динамики привода (2) и ее qLPV формы (8) представлен на рис. 1. Параметры с индексом «н» соответствуют состоянию и выходу нелинейной модели, а с индексом «q» – qLPV модели. В качестве начальных условий использовалось следующее положение на фазовой плоскости:

$$\alpha_0 = -0,5 \text{ град}, \omega_{z0} = -5,5 \text{ град/с}, \delta_{B0} = 0 \text{ град}.$$

Согласно полученным результатам, динамики исходной нелинейной и qLPV моделей полностью совпадают, что свидетельствует о высокой точности представления нелинейной динамической системы в пространстве состояний с помощью разработанного метода квазилинеаризации.

Заключение

Разработан метод квазилинеаризации нелинейной модели БПЛА с использованием подхода структурно-параметрического синтеза. Предложенный подход основан на аналитическом выводе структуры qLPV модели с последующей идентификацией неизвестных переменных в виде аппроксимации линейной обобщенной моделью посредством решения задачи разреженной регрессии и эвристического разложения. В ходе разработки метода проведена квазилинеаризация нелинейной модели изолированного движения БПЛА в продольном канале относительно центра масс. Результаты численного моделирования показали минимальные ошибки по соответствующим фазовым координатам исходной модели и ее qLPV формы. Полученные результаты позволяют заключить, что разработанный метод обеспечивает высокую точность представления нелинейной динамической системы в виде qLPV модели.

Библиографический список

1. **P. Varanyi**, Y. Yam, P. Varlaki. Tensor Product Model Transformation in Polytopic Modelbased Control. – CRC Press, Florida, 2013.
2. **Гайдук, А.Р.** Численный метод синтеза квазилинейных моделей нелинейных объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22. № 6. С. 283-290.
3. **Грон, Д.** Методы идентификации систем / Д. Грон. – М.: Мир, 1979. – 302 с.
4. **Ефремов, А.В.** Динамика полета: учебник для студентов высших учебных заведений / А.В. Ефремов, В.Ф. Захарченко, В.Н. Овчаренко. – М.: Машиностроение, 2011. – 775 с.
5. **К. Kaheman**, J.N. Kutz, S.L. Brunton SINDy-PI: a robust algorithm for parallel implicit sparse identification of nonlinear dynamics. Proceedings of the Royal Society A. 2020. Т. 476. №. 2242. С. 20200279.
6. **Lee J.D.** et al. Communication-efficient sparse regression //Journal of Machine Learning Research. 2017. Т. 18. № 5. С. 1-30.
7. **S.L. Brunton**, J.N. Kutz. Data-driven science and engineering: machine learning, dynamical systems, and control. – Cambridge University Press, 2020.
8. **Xu H.** et al. Four-loop feedback control system with integrator design for hypersonic cruise missile. 21st AIAA international space planes and hypersonics technologies conference. 2017. С. 2112.

Дата поступления

в редакцию: 30.09.2024

Дата принятия

к публикации: 08.10.2024

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.039.52

EDN: TGWCMV

**ВЛИЯНИЕ НА РЕАКТИВНОСТЬ ПЛАВЛЕНИЯ СИЛУМИНА
В ДИСПЕРСИОННЫХ ТВЭЛАХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ
ПРИ РАЗГОНАХ НА МГНОВЕННЫХ НЕЙТРОНАХ****Д.Е. Богомолов**

ORCID: 0009-0007-8405-344X e-mail: bogomolov_de@okbm.nnov.ru

ОКБМ «Африкантов»

*Нижний Новгород, Россия***Д.Г. Кресов**

ORCID: 0009-0002-6169-7801 e-mail: dkresov@okbm.nnov.ru

ОКБМ «Африкантов»

Нижний Новгород, Россия

С привлечением упрощенной модели твэла расчетно исследован начальный этап аварийного режима типа RIA со ступенчатым вводом положительной реактивности, сопровождающегося разогревом дисперсионной топливной композиции в наиболее теплонапряженных участках твэлов выше температуры плавления силуминовой матрицы. Временная задержка разогрева части топлива активной зоны из-за потерь энергии на разрушение кристаллической структуры силумина приводит к снижению энергии, передаваемой в теплоноситель, и ослаблению доплеровского эффекта. Вследствие этих процессов ядерная энергия, выделяющаяся в период вспышки мощности, увеличивается с перекомпенсацией потерь на плавление, преимущественно из-за тепловой инерции. Моделирование начала развития модельной аварийной ситуации показывает, что максимумы температур в активной зоне снизились, но возросла удельная нагрузка на твэл в период «вспышки» мощности.

Получена зависимость отношения суммарной энергии, выделяющейся в процессе «вспышки», к энергии, идущей собственно только на разогрев твэла, от объемной доли топливной композиции в активной зоне, достигшей температуры плавления силумина. Рекомендован учет процесса плавления силумина при исследованиях существенно запроектных реактивных аварий.

Ключевые слова: дисперсионное топливо, плавление силумина, эффекты реактивности, безопасность реакторов.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Богомолов, Д.Е. Влияние на реактивность плавления силумина в дисперсионных твэлах ядерных реакторов при разгонах на мгновенных нейтронах / Д.Е. Богомолов, Д.Г. Кресов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 4. С. 37-43. EDN: TGWCMV

**EFFECT ON REACTIVITY OF SILUMINE MELTING
IN DISPERSION FUEL ELEMENTS OF NUCLEAR REACTORS
AT ACCELERATION ON INSTANTANEOUS NEUTRONS****D.E. Bogomolov**

ORCID: 0009-0007-8405-344X e-mail: bogomolov_de@okbm.nnov.ru

«Afrikantov» Joint Stock Company

*Nizhny Novgorod, Russia***D.G. Kresov**

ORCID: 0009-0002-6169-7801 e-mail: dkresov@okbm.nnov.ru

«Afrikantov» Joint Stock Company

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents the results of calculations of the initial stage of the RIA type emergency mode with a stepwise introduction of positive reactivity using a simplified fuel element model. This process is accompanied by heating of the dispersion fuel composition in the most heat-stressed sections of the fuel elements above the melting point of the silumin matrix. The time delay in the heating of part of the core fuel due to energy losses on the destruction of the crystalline structure of silumin leads to a decrease in the energy transmitted to the coolant and a weakening of the Doppler effect. As a result of these processes, the nuclear energy released during the power «flash» increases with the overcompensation of melting losses, mainly due to thermal inertia. Modeling of the beginning of the model emergency situation shows that the maximum temperatures in the core decreased, but the specific load on the fuel element increased during the «flash» of power.

The relationship between the ratio of the total energy released during the «flash» process and the energy used only to heat the fuel element from the volume fraction of the fuel composition in the core that has reached the melting point of silumin is obtained. It is recommended to take into account the melting process of silumin during studies of significantly beyond design basis reactivity accidents.

Key words: dispersion fuel, silumin melting, reactivity effects, reactor safety.

FOR CITATION: Bogomolov D.E., Kresov D.G. Effect on reactivity of silumine melting in dispersion fuel elements of nuclear reactors at acceleration on instantaneous neutrons. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 4. Pp. 37-43. EDN: TGWCMV

Введение

Одной из характеристик аварии типа RIA является выделившееся в твэлах количество энергии, выступающее в качестве критериального параметра при обосновании безопасности [1]. Способность реактора противостоять аварийным возмущениям собственными качествами в значительной мере определяется величиной и оперативностью срабатывания отрицательных обратных связей. Используемые в современных водо-водяных реакторах малой мощности судового и стационарного назначения дисперсионные твэлы содержат относительно легкоплавкую силуминовую матрицу (сплав алюминия с кремнием и никелем). В связи с этим возник интерес к количественной оценке эффекта от задержки разогрева топливной композиции (ТК), связанной с расходом выделяющейся в топливной крупке энергии, на разрушение кристаллической структуры силумина при его плавлении.

В настоящей работе данный эффект расчетно анализируется в режимах ступенчатого ввода внешней положительной реактивности на данных реакторной установки (РУ) типа РИТМ-200, в исходном состоянии находящейся в «холодных» пусковых условиях с выведенными в критическое положение регулирующими органами. С учетом новизны исследований прежде всего анализируется этап «вспышки» мощности вплоть до значимого количества передачи тепла в теплоноситель на последующей квазистатической стадии процесса.

В работе приняты следующие посылки и предположения:

- 1) ТК и оболочка твэла описываются (каждая) одним инерционным звеном (при этом температура урановых гранул одинакова по всему их объему и равна температуре силумина в каждый момент времени);
- 2) в твэле учитываются только радиальные перетечки тепла;
- 3) объемные соотношения металлического топлива (диоксида урана), силумина и пустот в ТК взяты соответствующими необлученному свежему топливу из представленных в [2] данных, исходя из максимально возможной доли силумина (55, 25 и 20 % соответственно);
- 4) теплофизические и механические свойства ТК после плавления силумина не меняются;
- 5) температуры плавления составляющих материалов твэла: силумина – 577 °С [2], диоксида урана – 2850 °С [3], оболочки твэла и вытеснителя – 1350 °С [4];
- 6) при достижении ТК температуры 577 °С последняя сохраняется постоянной для всей ТК в течении времени плавления силуминовой матрицы;
- 7) активная зона описывается десятью эквивалентизированными расчетными каналами с 16 высотными участками;

- 8) распределение нейтронных полей в переходном процессе по объему активной зоны постоянно (используется динамическая модель реактора с точечным описанием нейтронной кинетики);
- 9) доплеровский коэффициент реактивности описывается с учетом формулы Брейта–Вигнера для сечения радиационного захвата [5]: $\alpha_D \sim 1/\sqrt{T_{ТК}}$, где α_D – доплеровский коэффициент, $T_{ТК}$ – температура топливной композиции.

Оценка времени плавления силуминовой матрицы. В качестве времени плавления силумина принималась величина его тепловой инерционности, исходя из соотношения $\tau = \gamma c r^2 / \lambda$, где в числителе – плотность, теплоемкость и квадрат характерного размера материала соответственно, а в знаменателе – теплопроводность. Твэл моделируемой РУ представлялся в виде цилиндрического стержня с соосно ему расположенным цилиндрическим вытеснителем (рис. 1). ТК занимает объем между вытеснителем и оболочкой твэла.

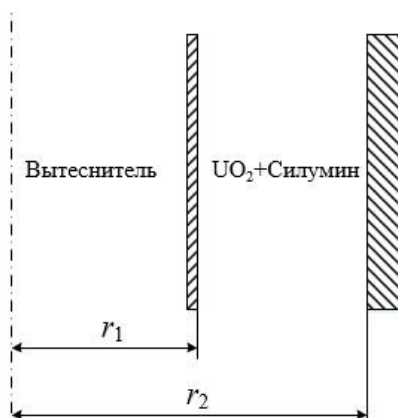


Рис. 1. Схема твэла в продольном сечении

Fig. 1. Diagram of fuel element in longitudinal section

Первый подход. Тепловая инерционность (и теплофизические характеристики) составляющих ТК оценивается пропорционально их объемной доле. Отсюда время плавления силумина рассчитывалось по формуле: $\tau_1 = \gamma c (r_{x_V})^2 / \lambda$, где γ , c , λ – усредненные теплофизические характеристики ТК, r – расстояние между вытеснителем и оболочкой (рис. 1), $x_V = 0,25$ отн.ед. – объемная доля силумина в ТК [2]. Оцененная величина времени плавления в данном подходе: $\tau_1 = 0,019$ с.

Второй подход. Инерционность оценивается исходя из характерного размера, пропорционального пути передачи тепла в силумине, огибающего гранулы диоксида урана. Линейный размер гранул принят равным минимальному из [6, 7] и составляющему 250 мкм. Рассматривалась модель, в соответствии с которой гранулы представляют собой одинаковые шары, расположенные в равносторонней треугольной решетке со стороной 320 мкм. Модель выбрана исходя из принятого диаметра гранул и объемного содержания урана в ТК (рис. 2). Области, занятые пустотами, считались находящимися вне огибающей.

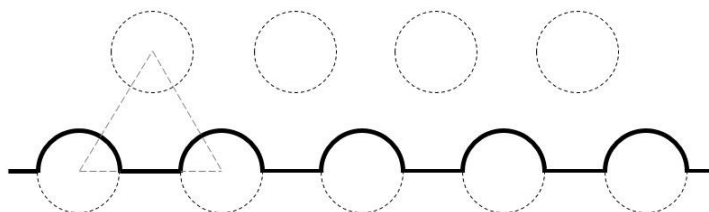


Рис. 2. Гипотетический путь передачи тепла по силумину от вытеснителя до оболочки

Fig. 2. Hypothetical route of heat transfer through silumin from the displacer to the shell

Время плавления силумина в ТК рассчитывалась по формуле: $\tau_2 = \rho c l^2 / \lambda$, где $\rho = 2680 \text{ кг/м}^3$, $c = 900 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$, $\lambda = 150 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ – теплофизические характеристики силумина [3], $l = 0,0023 \text{ м}$ – расчетный характерный размер, равный длине огибающей. Расчетное значение времени плавления в данном подходе: $\tau_2 = 0,085 \text{ с}$.

Результаты расчетов

На рис. 3 для временного интервала, ограниченного продолжительностью импульса мощности, приведена энергия, выделившаяся при учете плавления силуминовой матрицы (E), отнесенная к выделившейся энергии в традиционной, не учитывающей плавление, модели (E_0) в зависимости от объемной доли ТК, достигшей температуры 577 °C (отнесенной к объему ТК во всей активной зоне). При этом рассматривались вводимые скачком величины реактивности $\Delta\rho$ от 1,6 до 2,2 $\beta_{эф}$ с результирующей полушириной импульса $\Delta\tau$ от $5,3\cdot 10^{-5}$ до $2,7\cdot 10^{-5} \text{ с}$ соответственно ($\Delta\tau = 3,524 / (\Delta\rho - \beta_{эф})$) [8], $l = 10^{-5} \text{ с}$ – время жизни мгновенных нейтронов). Изменения величины $\Delta\rho$ в указанном интервале задавались от расчета к расчету с шагом 0,1 $\beta_{эф}$. Каждый расчет отмечен на графиках точкой.

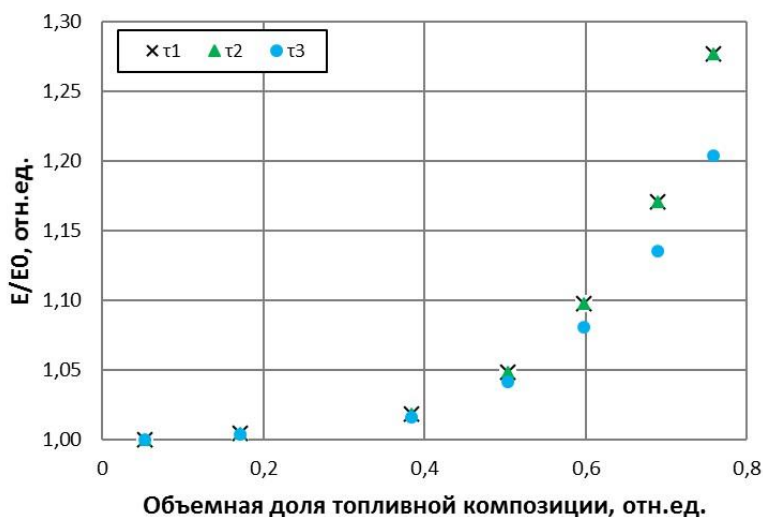


Рис. 3. Зависимость поправки к выделившейся энергии от объемной доли ТК, достигшей температуры плавления силумина

Fig. 3. Relation of correction to released energy on volume fraction of fuel composition reaching melting point of silumin

Существенно, что момент начала плавления силумина при всех рассмотренных скачках реактивности практически совпадал по времени с пиком мощности. Это означает, что для рассматриваемых характеристик активной зоны эффект от плавления не сказался на переднем фронте мощностного импульса.

Варьирование тепловой инерционности в пределах обоих подходов практически не повлияло на форму импульса. Это связано с тем, что длительность заднего фронта импульса оказалась сопоставимой с тепловой инерционностью τ_1 . Соответственно, вышедший первым в режим плавления силумина расчетный участок в первом подходе полностью расплавился практически к моменту окончания вспышки. Во втором подходе ($\tau = \tau_2$) к моменту окончания вспышки процесс расплавления еще не закончился, и в силу этого не скорректировал результат с временем плавления τ_1 (пробное снижение инерционности до $\tau_3 = 0,003 \text{ с}$ [путь передачи тепла через силумин по прямой] дало количественно значимое приближение к традиционной модели, подтверждая сохранение предельного перехода в расчете).

Используя известное соотношение Нордгейма-Фукса для выделившейся энергии, можно вычислить поправки к доплеровскому коэффициенту для традиционного модельного подхода (рис. 4). Под отношением α/α_0 понимается отношение доплеровского коэффициента с учетом плавления силумина к доплеровскому коэффициенту без учета плавления. Приняв во внимание подобную поправку в рамках использованных подходов, можно учесть исследуемый эффект от плавления без явного его моделирования.

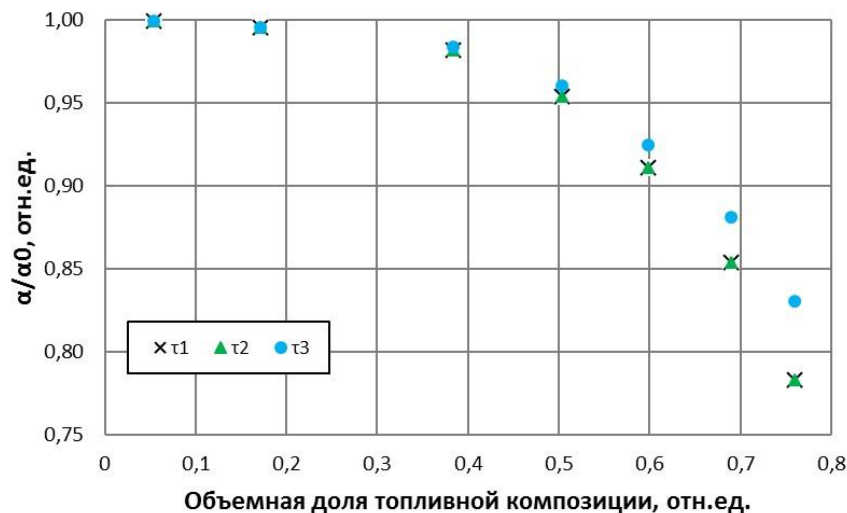


Рис. 4. Зависимость поправки к доплеровскому коэффициенту от объемной доли ТК, достигшей температуры плавления силумина

Fig. 4. Relation of correction to Doppler factor on volume fraction of fuel composition reaching melting point of silumin

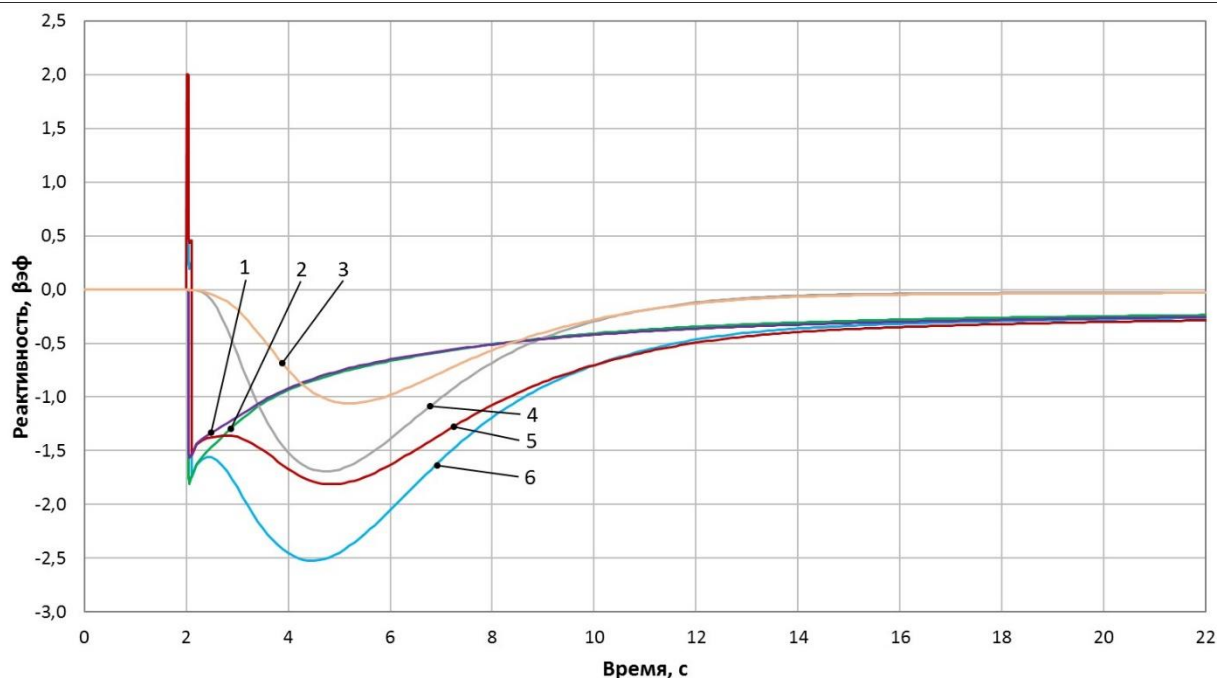


Рис. 5. Зависимость реактивных эффектов от времени:

1, 2 – доплеровский эффект; 3, 4 – эффект по теплоносителю; 5, 6 – суммарная реактивность; кривые 1, 3, 5 соответствуют $\tau = \tau_1$; кривые 2, 4, 6 соответствуют $\tau = 0$

Fig. 5. Relation of reactivity effects on time:

1, 2 – Doppler effect; 3, 4 – coolant T-effect; 5, 6 – total reactivity; curves 1, 3, 5 correspond to $\tau = \tau_1$; curves 2, 4, 6 correspond to $\tau = 0$

Моделирование последующего квазистатического этапа аварии показало, что, по крайней мере, при $\tau \geq \tau_1$ максимальная температура твэлов ограничивается температурой плавления силумина (ввод положительной реактивности и «вспышка» мощности закончились). При достижении отдельными участками твэлов температуры 577°C эффективность доплеровского эффекта снижается, приводя к замедлению спада мощности и, как следствие, к увеличению темпа разогрева ТК на сравнительно холодных участках зоны, однако с инерционным запаздыванием и до температуры, не выше 577°C .

На рис. 5 представлены временные зависимости реактивных эффектов при моделировании аварийной ситуации с релейным вводом положительной реактивности $2,0 \beta_{\text{эф}}$ в традиционном подходе ($\tau = 0$) и при $\tau = \tau_1$.

Полученные зависимости иллюстрируют снижение эффективности отрицательных обратных связей при учете плавления силуминовой матрицы. Ограничение темпа разогрева топлива активной зоны из-за потерь энергии на плавление приводит к ослаблению доплеровского эффекта и снижению энергии, передаваемой в теплоноситель из-за ограничения температурного перепада между оболочкой твэла и водой. В результате выделяющаяся в период «вспышки» энергия увеличивается с перекомпенсацией потерь на плавление и возрастанием импульсной нагрузки на твэл.

Заключение

Расчетные исследования подтвердили ожидаемый эффект снижения эффективности отрицательной обратной связи при учете эффекта от плавления силуминовой матрицы в дисперсионных твэлах. Полученная зависимость поправок к выделившейся энергии на этапе «вспышки» мощности аппроксимируется полиномиальной функцией четвертой степени. При этом для рассматриваемых условий поправка к выделившейся энергии (и доплеровскому коэффициенту) составила 5 % при выходе в режим плавления половины силумина, содержащегося в активной зоне, и около 20 % при расплавлении 75 % силумина.

При постоянной твэла, сопоставимой с полушириной импульса (или меньшей ее) [9] эффект от потери части энергии на плавление должен привести к дополнительной энергетической поправке из-за более ранней – в период вспышки – задержки передачи соответствующей части тепла в теплоноситель (кроме доплеровского «задержится» и T-эффект). В рассмотренных условиях снижение T-эффекта также имеет место, однако только на квазистатическом этапе процесса.

Моделирование ТК как однородного материала на этапе плавления силумина представляется сильно упрощенной посылкой: целесообразна проработка модели теплопередачи между урановой крупкой и расплавляющимся силумином, возможно с учетом динамики исчезновения пустот. Учет аксиальных перетечек тепла приведет к снижению температурных градиентов и в результате – к задержке роста доплеровского эффекта (возрастает с увеличением температуры $\rho_D \sim \int 1/\sqrt{T}dT \sim 2\sqrt{T}$) и более консолидированному в объеме твэла достижению температуры плавления матрицы. Учет динамики нейтронных полей также может внести поправки в эффект, однако знак и величина поправки будут зависеть, очевидно, от исходной конфигурации поглотителей и координаты извлекаемой решетки.

Неисследованный обратный процесс – кристаллизация расплавленного силумина с выделением в теплоноситель дополнительной энергии при остывании ТК – представляет интерес, например, в силу возможности образования или увеличения площади паровой пленки на поверхности твэлов. Возникающая при этом отрицательная обратная связь «снижение температуры – кристаллизация – выделение энергии – ухудшение теплоотдачи – повышение температуры» может стать предпосылкой к замедлению процесса остывания твэла.

С учетом полученной сильной функциональной зависимости (полином четвертой степени) энергетической поправки от доли расплавленного силумина, важны также оценки чувствительности результатов к имеющимся погрешностям и неопределенностям.

Изложенное позволяет сделать заключение о необходимости учета плавления силумина в слабо облученных дисперсионных твэлах (до взаимодействия компонентов топливной композиции с соответствующей убылью алюминиевого сплава [10] в процессе кампании) при моделировании инцидентов со значительным вводом положительной реактивности. Представляется необходимым продолжение исследований и развитие соответствующей методической базы в интересах повышения представительности обоснования безопасности.

Библиографический список

1. **Седов, А.А.** Некоторые безопасностные и феноменологические аспекты быстрых реактивностных аварий водоохлаждаемых реакторов. Методологические проблемы их моделирования // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. 1996. Вып. 3. С. 104-114.
2. **Савченко, А.М.** Испытания дисперсионных твэлов с жаропрочным сердечником с регулируемой пористостью для атомных станций малой мощности / А.М. Савченко, Ю.В. Коновалов, Г.В. Кулаков и др. // Атомная энергия. 2021. Т. 131. Вып. 6. С. 324-327.
3. **Чиркин, В.С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники: справочник / В.С. Чиркин. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.
4. **Карпюк, Л.А.** Сплав 42ХНМ и карбид кремния как материал оболочек твэлов, устойчивых к авариям / Л.А. Карпюк, В.В. Новиков, Г.В. Кулаков и др. // Атомная энергия. 2021. Т. 130, Вып. 4. С. 211-215.
5. **Бартоломей, Г.Г.** Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов / Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать, В.Д. Байбаков, М.С. Алтухов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
6. **Кулаков, Г.В.** Разработка твэлов плавучих энергоблоков и атомных станций малой мощности / Г.В. Кулаков, А.В. Ватулин, С.А. Ершов и др. // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2012. Вып. 1 (72). С. 14-25.
7. **Кулаков, Г.В.** Основные результаты разработки металлокерамического топлива дисперсионного типа для реакторов плавучих энергоблоков и атомных станций малой мощности / Г.В. Кулаков, А.В. Ватулин, С.А. Ершов // «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики», международная научно-техническая конференция: Москва, 27-29 ноября 2012. Сборник докладов. – М.: НИКИЭТ, 2012. С. 148-164.
8. **Хетрик, Д.** Динамика ядерных реакторов / Д. Хетрик : [перевод с английского]. – М.: Атомиздат, 1975. – 400 с. – Перевод изд.: Dynamics of nuclear reactors / David L. Hetrick. The University of Chicago Press, Chicago and London.
9. **Шмелев, А.Н.** О роли параметра времени жизни нейтронов реактора в разгонах на мгновенных нейтронах (модельное рассмотрение) / А.Н. Шмелев, Г.Г. Куликов, В.А. Апсэ и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2014. Т. 5. № 7-8. С. 578-592.
10. **Кулаков, Г.В.** Разработка тепловыделяющих элементов для атомных станций малой мощности / Г.В. Кулаков, А.В. Ватулин, С.А. Ершов и др. // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2021. Вып. 2 (108). С. 101-110.

*Дата поступления
в редакцию: 10.07.2024*

*Дата принятия
к публикации: 29.10.2024*

УДК 621.039.4

EDN: KUIFWX

ОЦЕНКА ЦЕЛОСТНОСТИ ТРЕТЬЕГО ФИЗИЧЕСКОГО БАРЬЕРА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПАДЕНИИ ВЕРХНЕГО БЛОКА НА РЕАКТОР

О.В. ГорюновORCID: 0000-0001-6414-8619 e-mail: ovgoriunov@mail.ru

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

*Санкт-Петербург, Россия***А.А. Семакова**ORCID: 0009-0002-0012-4831 e-mail: semakova_2000@mail.ru

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Санкт-Петербург, Россия

Представлена оценка целостности третьего физического барьера (корпуса реактора и главных циркуляционных трубопроводов (ГЦТ)) в рамках расчетного анализа динамического напряженно-деформированного состояния в упругой (консервативный подход) и упругопластической (реалистичный подход) постановках. Потеря целостности компонента постулируется по достижении предельного состояния кратковременного вязкого разрушения. В упругой постановке целостность главных циркуляционных трубопроводов нарушается, что приводит к исходному событию, вызывающему уменьшение расхода теплоносителя в первом контуре, однако работа систем безопасности позволяет компенсировать течь. В реалистичной постановке металл корпуса и главных циркуляционных трубопроводов сохраняет целостность, образование несплошностей не происходит, целостность сохраняется, нарушения пределов ядерной и радиационной безопасности отсутствуют.

Ключевые слова: ядерная и радиационная безопасность, атомная станция, запроектная авария, целостность, реактор.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Горюнов, О.В. Оценка целостности третьего физического барьера безопасности при падении верхнего блока на реактор / О.В. Горюнов, А.А. Семакова // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 4. С. 44-50. EDN: KUIFWX

ASSESSMENT OF THIRD PHYSICAL SAFETY BARRIER INTEGRITY IN THE EVENT OF UPPER BLOCK FALL ONTO THE REACTOR

O.V. GoryunovORCID: 0000-0001-6414-8619 e-mail: ovgoriunov@mail.ru

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

*Saint Petersburg, Russia***A.A. Semakova**ORCID: 0009-0002-0012-4831 e-mail: semakova_2000@mail.ru

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Saint Petersburg, Russia

Abstract. The article presents an assessment of the integrity of the third physical barrier (reactor vessel and main circulation pipelines) within the framework of the calculation analysis of the dynamic stress-strain state in elastic (conservative approach) and elastoplastic (realistic approach) formulations. The loss of integrity of the component is postulated upon reaching the limit state of short-term ductile fracture. In the elastic formulation, the integrity of the main circulation pipelines is violated, which leads to an initial event that causes a decrease in the coolant flow in the primary circuit, but the operation of the safety systems compensates the leak. In a realistic formulation, the metal of the vessel and main circulation pipelines remains intact, no discontinuities are formed, the integrity is maintained, and there are no violations of nuclear and radiation safety limits.

Key words: nuclear and radiation safety, nuclear power plant, beyond design basis accident, integrity, reactor.

FOR CITATION: O.V. Goryunov, A.A. Semakova. Assessment of third physical safety barrier integrity in the event of upper block fall onto the reactor. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 4. Pp. 44-50. EDN: KUIFWX

Введение

Стандарты безопасности РФ, Финляндии, Венгрии, Китая, США и других стран при обосновании безопасности объекта использования атомной энергии (ОИАЭ) требуют, в частности, учитывать в проектах систем, зданий и сооружений последствия падения тяжелых грузов при выполнении соответствующих мероприятий. Статистика инцидентов на атомных станциях (АС) показала, что операции, связанные с транспортировкой тяжелых грузов, могут оказать негативное влияние на безопасность атомных электростанций NEA/CNRA/R(2017) [1]. Одним из показательных сценариев с точки зрения влияния на ядерную и радиационную безопасность является падение верхнего блока (далее – ВБ) реактора ВВЭР при проведении планово-предупредительного ремонта на корпус реактора с высоты подъема, что может привести к повреждению физических барьеров безопасности. Оценка частоты указанного события, основанная на анализе надежности элементов систем полярного крана и учета организационно-технических мероприятий, показывает крайне малое значение: 10^{-9} 1/год и ниже. Данная частота события позволяет включить это событие в перечень запроектных аварий.

Федеральные нормы и правила НП-001-15 [2] и НП-006-16 [3] требуют представлять результаты анализа запроектных аварий в отчете по обоснованию безопасности (ООб) АС в реалистичной (неконсервативной) постановке. Сценарий падения ВБ должен быть включен в состав перечня исходных событий запроектных аварий при хранении и транспортировании топлива. До настоящего времени указанный сценарий не рассматривался в научно-технической литературе, что делает оценку последствий и уровня тяжести состояния АС после падения ВБ на корпус реактора актуальной задачей. Оценка последствий указанного события и влияния на РУ выполняется в рамках положений методики [4], основанной на опыте отечественного и международного проектирования АЭС.

Задачи и методика исследования

Сложность задачи требует рассмотреть последствия падения в рамках нескольких последовательных этапов. Целью первого этапа, представленного в настоящей работе, является верификация сохранения целостности третьего физического барьера безопасности: элементов корпуса реактора и главных циркуляционных трубопроводов (объекты расчетного исследования); оптимизация расчетных моделей и схем. Второй этап, связанный с моделированием внутрикорпусных устройств и активной зоны, будет рассмотрен в следующих работах. Методика верификации целостности объектов исследования реализуется в рамках численного моделирования динамического напряжённо-деформированного состояния и применения соответствующих критериев прочности. Расчётный анализ выполняется с применением программных комплексов *Abaqus CAE/Explicit* и *ANSYS*. Последовательно представлены начальное состояние РУ; соответствующие входные данные, используемые в расчетах; критерии потери целостности; краткое описание расчетной модели.

Расчеты напряженно-деформированного состояния выполнялись в упругой (консервативный подход) и упругопластической (реалистичный подход) постановках.

Исходное состояние РУ

Параметры исходного состояния РУ:

- режим эксплуатации – нормальная эксплуатация, планово-предупредительный ремонт (ППР);

- верхний блок снят с корпуса реактора;
- верхний блок находится на высоте 10 м от главного фланца корпуса реактора (при этом ось верхнего блока совпадает с осью корпуса реактора);
- температура воды в корпусе реактора не выше 70 °С;
- давление над уровнем теплоносителя в корпусе – атмосферное;
- система отвода остаточного тепла работоспособна;
- уровень теплоносителя в реакторе выше трубопровода холодных патрубков реактора.

Входные данные расчета

Входными данными для расчета являются [5-7]:

- 1) скорость ВБ в момент контакта ВБ с фланцем корпуса реактора – 14 м/с;
- 2) масса ВБ – 116 тонн;
- 3) масса корпуса реактора – 730 тонн.

Аналитическая оценка динамического поведения при ударных нагрузках

Для оценки ряда параметров, необходимых в качестве входных данных для расчета, а также с целью получения информации по оценке корректности результатов расчета, рассматривается упрощенная одномерная постановка задачи в приближении продольного удара телом конечной массы по упругому стержню с закрепленным концом. При этом поведение стержня описывается уравнением:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

где, u – поле перемещений; t – время; x – продольная координата; c – скорость волны сжатия. В рассматриваемом случае корпус реактора закрепляется по опорному бурту, выточенному на наружной поверхности опорной обечайки корпуса, его днище жестко не закреплено. В качестве характерного размера для оценки распределения напряжений по корпусу принимается расстояние от торца фланца корпуса до опорного бурта $l_{\text{бурт}}$ вместо длины всего корпуса.

Решая уравнение (1) в рамках указанных допущений, получаем следующие результаты:

- 1) напряжение в области контакта ВБ и фланца корпуса реактора ~ 568 МПа;
- 2) время контакта ~ 3,2 мс;
- 3) время прохождения волны сжатия от фланца до днища ~ 2 мс.

Указанные результаты были учтены при разработке расчетной модели.

Физико-механические свойства материалов

Физико-механические свойства материалов объектов расчетного исследования приняты в соответствии с [5-8]. Поскольку рассматриваемый сценарий относится к запроектным событиям, постольку в расчетах используются медианные значения механических свойств материалов. В связи с отсутствием паспортных данных по пределу текучести и временному сопротивлению, статистическое распределение используемых в расчете параметров было получено на основе следующих допущений:

- 1) принимается нормальный закон распределения;
- 2) гарантированное значение механической характеристики материала R (временное сопротивление или предел текучести) соответствует квантили нормального распределения $\alpha = 0,05$;
- 3) среднеквадратическое значение (СКЗ) составляет 10 % от значения математического ожидания для распределения предела текучести;

4) согласно ГОСТ 25.504-82 [9], среднее значение коэффициента вариации временного сопротивления металла на множестве всех плавов равно 0,07.

В табл. 1 представлены медианные значения механических свойств материалов компонентов реактора и ГЦТ.

Таблица 1.
Медианные значения механических характеристики
компонентов РУ при расчетной температуре

Table 1.
Median values of mechanical characteristics
of reactor plant components at design temperature

Компонент	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа
Корпус реактора	576	504
Опорная ферма	385	235
Опорная ферма	470	281
ГЦТ	556	387

Расчетная температура принята равной 100 °С (как максимально возможная температура корпуса РУ и его компонентов во время плановых профилактических работ).

Расчет с учетом пластических свойств материалов был выполнен на основе свойств сталей 10ГН2МФА и 15Х2НМФА в соответствии с [10, 11].

Критерии потери целостности

Потеря целостности элемента объекта исследования постулируется по достижению предельного состояния кратковременного вязкого разрушения [8]. Напряжения, характеризующие достижение предельного состояния основного металла и сварных соединений, определяются согласно п. 3.4 [8] и принимаются равными медианному значению временного сопротивления материала без учета коэффициентов запаса по номинальным напряжениям (поскольку в соответствии с НП-001-15 [2] сценарии ЗПА рассматриваются в рамках реалистического подхода). При этом постулируется полное разрушение расчетного элемента модели.

Расчетная модель

Расчетная модель представляет собой корпус реактора с опорным буртом для установки на опорную ферму, трубопроводы ГЦК. Трубопроводы смоделированы прямолинейными участками от места приварки к отливам в корпусе реактора до их крепления к главным циркуляционным насосам (ГЦН) и парогенераторам (ПГ). Опорная ферма для оптимизации расчета не моделируется, что не влияет на общую картину. Общий вид расчетной модели представлен на рис. 1.

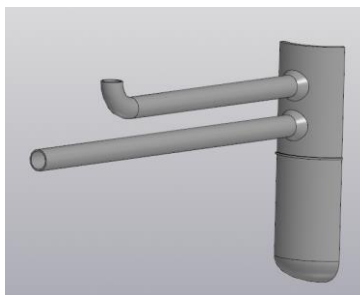


Рис. 1. Общий вид расчетной модели

Fig. 1. General view of the calculation model

В расчетной модели использовались следующие граничные условия:

- на опорном бурте наложен запрет на перемещение и вращение по всем осям;
- к концам трубопроводов ГЦК в местах крепления к ГЦН и ПГ наложен запрет на перемещение в поперечной плоскости трубопроводов.

Результаты расчета в упругой постановке

Напряжения, вызванные нагрузками, соответствующие исходному состоянию пренебрежимо малы и в дальнейших расчетах не учитываются. В результате выполнения численного моделирования получены поля напряжений, зависящие от времени. На основе указанных результатов был идентифицирован момент времени, при котором в локальных областях элементов корпуса реактора и трубопроводов приведенные напряжения превышали предельные значения.

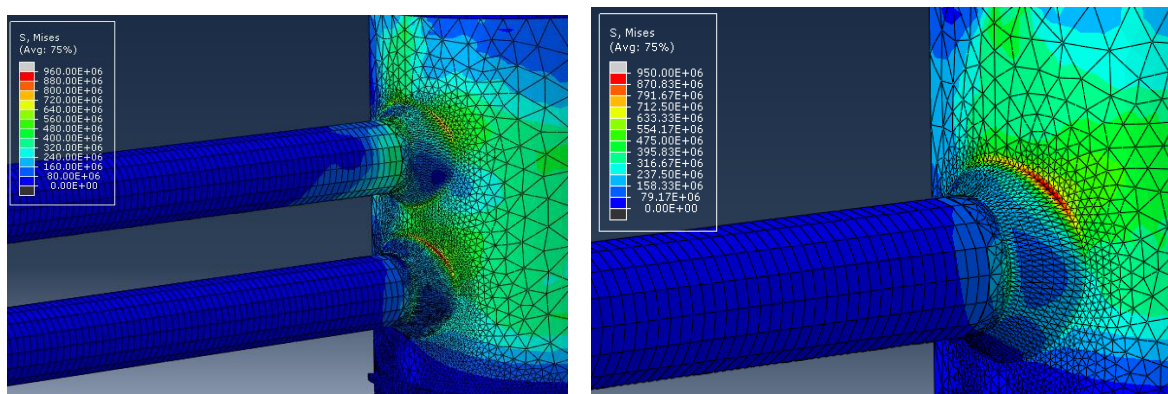


Рис. 2. Поля напряжений, соответствующие максимальным значениям приведенных напряжений

Fig. 2. Stress fields corresponding to maximum values of reduced stresses

Достижение предельного состояния характеризуется образованием *несплошностей* в материале, что, в свою очередь, ведет к релаксации напряжений в прилегающей области и остановке развития дефекта. На рис. 2 представлено поле напряжений, характеризующееся максимальными значениями. В области патрубков корпуса реактора напряжения превышают предельные значения, ведущее к образованию сквозных трещин. Приведенные выше результаты соответствуют результатам [5], где суммарная площадь образовавшейся течи имеет значение $0,063 \text{ м}^2$; расход – $1918 \text{ м}^3/\text{ч}$. В рамках представленного расчета следует отметить, что напряжения среза опорного бурта приводят к значению $\tau > 1000 \text{ МПа}$, что превосходит временное сопротивление и ведет к отказу (срезу) бурта.

Таким образом, по результатам консервативного расчета целостность элементов РУ нарушается – образуется течь в местах сварных соединений между корпусом реактора и трубопроводами ГЦК; динамические нагрузки приводят к срезу опорного бурта. Согласно [6, 7], бак приямков во время аварии способен компенсировать расход потока не более $2500 \text{ м}^3/\text{ч}$, соответственно расход течей с ГЦТ при падении ВБ приближается к критическому значению и создает дополнительную нагрузку на насосы системы расхолаживания реактора. Таким образом, результаты консервативного расчета неблагоприятны.

Результаты расчета в упругопластической постановке

Идентифицированные на основе результатов численного расчета максимальные напряжения на стыке трубопроводов ГЦК и корпуса реактора в реалистичной постановке показаны на рис. 3.

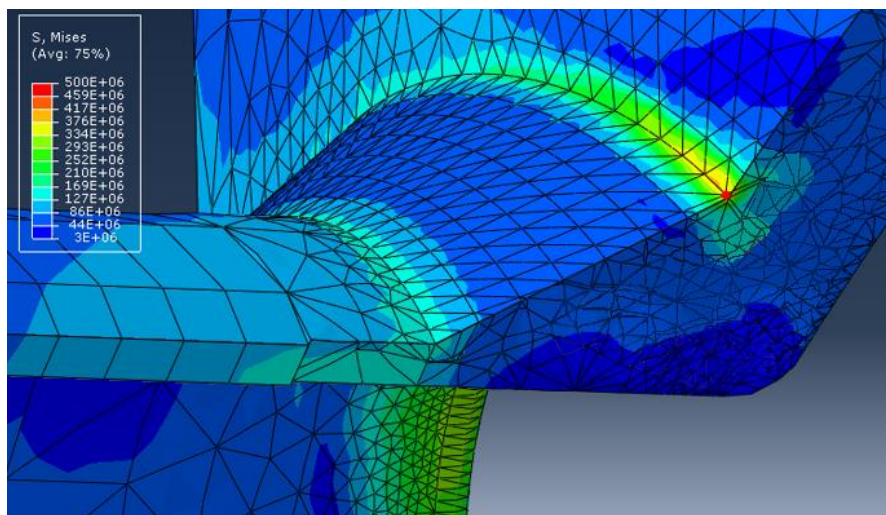


Рис. 3. Действующие напряжения труб ГЦТ (упругопластическое состояние)

Fig. 3. Effective stresses of pipes of main circulation pipelines (elastoplastic state)

Максимальные действующие напряжения составляют 446 МПа и не превышают предельные значения. Дополнительные касательные напряжения, также не приводят к достижению предела прочности в ГЦТ и корпусе реактора. Образование несплошностей не происходит, третий физический барьер безопасности сохраняет целостность, угроза нарушения пределов ядерной и радиационной безопасности отсутствует. Участие систем безопасности не требуется.

Заключение

В настоящей работе представлены методология и результаты оценки целостности элементов корпуса реактора и главных циркуляционных трубопроводов при падении верхнего блока с высоты на корпус реактора при ППР. Результаты расчетов показали следующее.

1. Напряжения на бурте корпуса достигают значений, превышающих временное сопротивление – борт «срезается» под воздействием динамических нагрузок (расчеты, выполненные для оценки напряжений, возникающих при отказе опорного бурта, показали, что продольные напряжения среза превышают временное сопротивление материала). Указанный результат актуален как для консервативной, так и для неконсервативной оценок.

2. Приведенные напряжения во всех сварных швах ГЦТ – корпус реактора в рамках консервативного расчета локально достигают значения предела прочности, что приводит к потере целостности – течи теплоносителя из корпуса реактора из всех восьми трубопроводов ГЦК. Течь первого контура приводит к снижению уровня теплоносителя в корпусе реактора и может привести к повреждению загруженных в реактор ТВС. Более реалистичная упругопластическая постановка решения задачи показывает, что приведенные напряжения достигают значений 446 МПа, что выше предела текучести, но ниже предела прочности. В зоне патрубков будут образовываться пластические деформации, не приводящие к потере целостности трубопроводов и корпуса реактора.

Библиографический список

1. NEA/CNRA/R(2017)4 Heavy Load Accidents in Nuclear Installations, 2018. – 76 p.
2. НП-001–15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. – М: НТЦ ЯРБ, 2016. – 56 с.
3. НП-006–16 Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности блока атомной станции с реакторами типа ВВЭР. – М.: НТЦ ЯРБ, 2017. – 408 с.

4. **Горюнов, О.В.** Методология анализа внутренних воздействий на безопасность АЭС / О.В. Горюнов, Ю.Л. Ермакович, И.Б. Кузьмина, Д.Г. Ланин // Электрические станции. 2021. № 5. С. 9-16.
5. **Горюнов, О.В.** Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики / О.В. Горюнов, А.С. Мозжухин, А.А. Вернер // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики. Сборник тезисов докладов. VI Международная научно-техническая конференция (14-17 ноября 2023 г., Москва). – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2023. С. 93-95.
6. **Андрушечко, С.А.** АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта / С.А. Андрушечко, А.М. Афронов, Б.Ю. Васильев и др. – М.: Логос, 2010. – 603 с.
7. **Котов, Ю.В.** Оборудование атомных электростанций / Ю.В. Котов, В.В. Кротов, Г.А. Филиппов. – М.: Машиностроение, 1982. – 375 с.
8. ПНАЭ Г-7-002 – 86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
9. ГОСТ 25.504–82 Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. – М.: Стандартиформ, 1972. – 131 с.
10. **Марголин, Б.З.** Прогнозирование трещиностойкости корпусной реакторной стали на основе концепции «Master curve» и вероятностной модели / Б.З. Марголин, В.А. Швецова, А.Г. Гуленко, А.В. Ильин, В.А. Николаев, В.И. Смирнов // Проблемы прочности. 2002. № 1. С. 5-21.
11. **Лебедев, А.А.** Исследование процессов деформирования и накопления повреждений в стали 10ГН2МФА при малоцикловом нагружении / А.А. Лебедев, И.В. Маковецкий, Н.Р. Музыка, В.П. Швец // Проблемы прочности. 2008. № 2. С. 5-10.

*Дата поступления
в редакцию: 11.06.2024*

*Дата принятия
к публикации: 25.10.2024*

УДК 621.039

EDN: ZXKJEK

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ
МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА
ДЛЯ СИСТЕМ ВОДОПОДГОТОВКИ ЯЭУ НА ОСНОВЕ
ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ CFD-КОДА**

А.Е. Соборнов

ORCID: 0000-0002-1146-3081 e-mail: wisestjedi@mail.ru

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

Р.Р. Рязанов

ORCID: 0000-0002-8777-4337 e-mail: riazapov.rr@nttu.ru

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

Н.В. Мацин

ORCID: 0000-0002-1599-957X e-mail: lebron.09@mail.ru

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

А.В. Котин

ORCID: 0000-0001-8539-8158 e-mail: an.kotin@yandex.ru

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

И.В. Воробьев

ORCID: 0000-0001-5060-5559 e-mail: flymoment@yandex.ru

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

А.Н. Терехин

ORCID: 0009-0002-5518-3687 e-mail: zamftf@nttu.ru

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

Представлены результаты исследования, продолжающего цикл расчетно-экспериментальных работ, направленных на разработку высокотемпературного магнитогидродинамического фильтра, предназначенного для систем водоподготовки ядерных энергетических установок. Приведены результаты численного моделирования трех вариантов конструкции модернизированной проточной части гидродинамического фильтра с применением постоянных магнитов из сплава железа, бора и неодима марки N42SH. Моделирование процессов гидродинамики в потоке вязкой несжимаемой жидкости осуществлялось в коммерческом расчетном коде с применением модели напряжений Рейнольдса (*Reynolds stress model*). Для данной модели характерно, что турбулентные напряжения в потоке жидкости нелинейно связаны с компонентами скорости, что обуславливает более точное решение в отношении пространственного распределения скорости в рамках RANS подхода. По результатам выполненного расчетного исследования определена высота магнитной системы, оптимальное значение которой составило 60 мм. Расчетная величина гидравлического сопротивления составила при максимальном расходе 52,94 кПа. В продолжение работы исследована задача выпрямления потока на выходном участке магнитогидродинамического фильтра с целью минимизации гидравлического сопротивления конструкции и обеспечения наиболее равномерного турбулентного профиля скорости. Представлены результаты численного моделирования семи вариантов

конструкции выпрямителя потока на основе применения различных вариантов оребрения, выполненного из прямых пластин, на внутренней образующей канала. Проведен анализ результатов расчетного исследования, и предложена наиболее эффективная и оптимальная с точки зрения надежности простоты изготовления конструкция выпрямителя.

Ключевые слова: закрученный поток, магнитогидродинамический фильтр, компьютерное моделирование, магнитное поле, постоянный магнит, магнитная сила, гидродинамика.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Соборнов, А.Е. Оптимизация проточной части магнитогидродинамического фильтра для систем водоподготовки ЯЭУ на основе численного моделирования с применением CFD-кода / А.Е. Соборнов, Р.Р. Рязанов, Н.В. Мацин, А.В. Котин, И.В. Воробьев, А.Н. Терехин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 4. С. 51-63. EDN: ZXXJEK

OPTIMIZATION OF MAGNETOHYDRODYNAMIC FILTER FLOW PART FOR WATER TREATMENT SYSTEMS OF NUCLEAR POWER PLANT BASED ON NUMERICAL SIMULATION USING CFD-CODE

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: **riazapov.rr@ntu.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

N.V. Matsin

ORCID: **0000-0002-1599-957X** e-mail: **lebron.09@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

I.V. Vorobyev

ORCID: **0000-0001-5060-5559** e-mail: **flymoment@yandex.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.N. Terekhin

ORCID: **0009-0002-5518-3687** e-mail: **zamftf@ntu.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article presents the results of a study that continues a cycle of calculation and experimental work aimed at developing a high-temperature magnetohydrodynamic filter designed for water treatment systems of nuclear power plants. The results of numerical modeling of three design variants of the modernized flow part of the hydrodynamic filter using permanent magnets made of an alloy of iron, boron and neodymium of the N42SH brand are presented. Modeling of hydrodynamic processes in a viscous incompressible fluid flow was carried out in a commercial calculation code using the Reynolds stress model. In this model, turbulent stresses in the fluid flow are nonlinearly related to the velocity components, which leads to a more accurate solution regarding the spatial distribution of velocity within the RANS approach. The optimal value of the magnetic system height, based on the results of the calculation study, was 60 mm. The

calculated value of hydraulic resistance at maximum flow rate was 52.94 kPa. The problem of straightening the flow at the outlet section of a magnetohydrodynamic filter in order to minimize the hydraulic resistance of the structure and ensure the most uniform turbulent velocity profile is also investigated. The results of numerical modeling of seven design variants of a flow straightener based on the use of various finning options made of straight plates on the inner generatrix of the channel are presented. The analysis of the results of the calculation study was carried out and the most effective and optimal design of the straightener from the point of view of reliability and ease of manufacture was proposed.

Key words: flow twisting, swirling flow, filtering device, computer modeling, magnetic field, permanent magnet, ferromagnetic particle, magnetic force, hydrodynamic forces.

FOR CITATION: A.E. Sobornov, R.R. Ryazapov, N.V. Matsin, A.V. Kotin, I.V. Vorobyev, A.N. Terekhin. Optimization of the flow part of a magnetohydrodynamic filter based on numerical simulation using CFD-code. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 4. Pp. 51-63. EDN: ZXXJEK

Введение

Поддержание нормативной чистоты рабочих сред теплообменного оборудования является важнейшим требованием, предъявляемым к эксплуатации объектов тепловой и атомной энергии. Несоблюдение регламентов поддержания химического режима технологических жидкостей может инициировать процессы разрушения конструкционных материалов теплообменных аппаратов и трубопроводов энергоустановок, обусловленные осаждением различного рода примесей на поверхностях теплообмена, ухудшением теплопередачи и последующим перегревом теплообменных стенок. Исходя из физико-химических свойств примесей, а также конструкционных материалов контуров энергоустановок, следует внимательно подходить к выбору способов очистки и снижения концентрации загрязняющих веществ. В частности, для соединений, обладающих ферромагнитными свойствами, эффективным является использование магнитного поля, под действием которого частицы изменяют траекторию и концентрируются в ловушке. На сегодняшний день можно выделить два основных варианта конструкции магнитных фильтрующих систем. В первом случае в качестве источника магнитного поля используются электромагниты. Такие конструкции имеют ряд недостатков, связанных со сложностью монтажа, дополнительными мерами безопасности и затратами электроэнергии. Альтернативным вариантом является использование постоянных магнитов. К положительным качествам фильтрующих аппаратов на их основе относят простоту конструкции, отсутствие дополнительных источников питания, а также возможность использования таких систем в более агрессивных средах.

Следует отметить, что эффективность магнитных фильтрующих систем можно увеличить за счет гидравлического профилирования проточной части фильтра. Совместное воздействие магнитного и гидродинамического эффектов повышает фильтрующую способность, однако требует тщательного подбора оптимальной геометрии проточной части фильтрующих устройств.

Описание принципа действия фильтра

В научно-исследовательской лаборатории НГТУ им. Р.Е. Алексеева разработан и запатентован действующий прототип циклонного магнитогидродинамического фильтра. Воздействие магнитного фильтрующего эффекта связано с использованием постоянных магнитов марки НМБ 250/160 ГОСТ Р 52956-2008 в составе конструкции фильтра [1]. Основным преимуществом данной разработки является специально подобранная конфигурация проточной части, которая способствует закрутке потока, увеличению времени нахождения примеси в зоне влияния магнитного поля и направлению частиц в застойные области, где происходит их накопление. При помощи CFD-моделирования была проведена оценка гидродинамических сил, получены траектории движения частиц в проточной части и проведен расчет гидравлических характеристик. Для валидации результатов, полученных с применением расчетных ко-

дов, а также подтверждения технических характеристик прототипа проведен ряд экспериментов на испытательном стенде. Исследования проводились при следующих режимных параметрах: давление фильтруемой среды 0,3 МПа; температура среды 40 °С, осредненная скорость потока 2 м/с. В ходе проведения экспериментов было установлено наличие устойчивого вихревого течения высокой интенсивности в выходном патрубке фильтра [2], что негативно сказывалось на гидравлической характеристике экспериментального участка. Следует отметить, что стабилизация турбулентного профиля скорости потока на выходном участке происходила на расстоянии, превышающем 20 гидравлических диаметров. Низкая рабочая температура фильтра, а также существенная длина участка стабилизации профиля скорости потока определили направления дальнейшего усовершенствования фильтра в части адаптации магнитной системы для работы при более высоких параметрах среды, а также сокращения длины стабилизационного участка после фильтра. Очевидно, что устранение данных конструктивных недостатков отвечает требованиям повышения технических характеристик фильтра и способствует повышению конкурентоспособности при внедрении разработки в состав гидравлических и тепловых систем предприятий тепловой и атомной энергетики. Таким образом, оптимизация конструкции фильтра осуществлялась поэтапно:

- модернизации проточной части фильтра в зоне установки магнитной системы (этап 1);
- сокращение зоны локализации устойчивых вихревых структур с применением устройств для выпрямления потока на выходном участке (этап 2).

Схема магнетогидродинамического фильтра с зонами проточной части, подвергшимися модернизации, приведена на рис. 1.

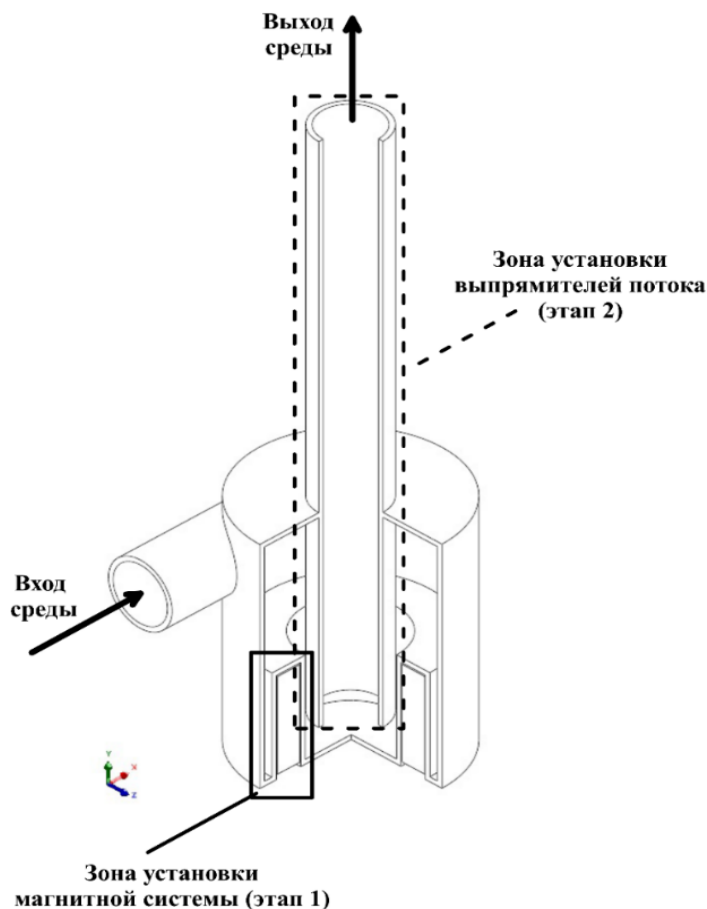


Рис. 1. Схема магнетогидродинамического фильтра

Fig. 1. Schematic diagram of a magnetohydrodynamic filter

Описание процесса модификации фильтра и результаты численного моделирования проточной части

К основным мероприятиям первого этапа модернизации модели магнитогидродинамического фильтра следует отнести выбор материала постоянного магнита и варьирование высоты магнитной системы, обеспечивающей необходимое расчетное усилие на ферромагнитную примесь различной дисперсности. В составе модернизированной конструкции фильтра в качестве магнитной системы рассмотрено применение комбинации кольцевых магнитов марки N42SH с внутренним и внешним диаметрами 67 мм и 97 мм соответственно, с различной высотой. Применение данного материала позволяет увеличить максимальную рабочую температуру магнитной системы с 50 до 120 °С. В работе рассмотрены конфигурации магнитной системы высотой 40, 60 и 80 мм, а именно: один магнит высотой 40 мм, комбинация из двух магнитов высотой 40 и 20 мм, комбинация одного магнита высотой 40 мм и двух магнитов высотой по 20 мм.

Варьирование высоты магнитной системы привело к необходимости внесения изменений в геометрию проточной части и корпуса фильтра. С помощью CFD-моделирования для каждой геометрии был определен перепад давления между входным и выходным сечениями фильтра. Моделирование процессов гидродинамики осуществлялось в рамках *RANS* подхода с применением модели турбулентности *Reynolds stress model (RSM)*. Модель напряжений Рейнольдса примечательна тем, что турбулентные напряжения в потоке имеют нелинейную связь с компонентами скорости, что позволяет получить более точное распределение скорости. Моделирование турбулентных течений несжимаемой жидкости с применением модели *RSM* базируется на решении системы уравнений Навье-Стокса осредненной по Рейнольдсу, которая включает в себя уравнение неразрывности (1) и движения (2):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \tau_{ij} \right), \quad (2)$$

где индексы: $i = 1, 2, 3$ и $j = 1, 2, 3$ указывают направления декартовой системы координат x_i ; u_i, u_j – компоненты скорости; ρ – плотность жидкости; μ – коэффициент молекулярной вязкости; P – давление; t – время.

Операция осреднения уравнений Навье-Стокса порождает тензор рейнольдсовых напряжений $\tau_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$, который должен быть смоделирован для замыкания системы уравнений. Модели семейства *RSM* для вычисления тензора τ_{ij} решают шесть уравнений переноса, получающихся из исходных уравнений Навье-Стокса путем математических преобразований [3]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) \\ &= - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + p (\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j) \right] + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] - \\ & - \rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) + p \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}, \end{aligned} \quad (3)$$

где δ_{kj}, δ_{ik} – единичный тензор.

Левая часть уравнения (3) равна полной производной от $\overline{u'_i u'_j}$. Слагаемые в правой части отвечают, соответственно, за турбулентный диффузионный перенос $D_{T,ij}$, молекулярный диффузионный перенос $D_{L,ij}$, генерацию рейнольдсовых напряжений P_{ij} , корреляцию пульсаций давления со скоростями деформации Φ_{ij} и вязкую диссипацию E_{ij} . Слагаемые, соответствующие

щие полной производной от $\overline{u'_i u'_j}$, $D_{L,ij}$ и P_{ij} могут быть вычислены без дополнительных предположений. Однако для расчета $D_{T,ij}$, Φ_{ij} и E_{ij} требуется введение замыкающих уравнение (3) предположений.

Для расчета турбулентного диффузионного переноса используется уравнение:

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right), \quad (4)$$

где σ_k – константа, значение которой задается при помощи весовой функции [4], принимает значение $\sigma_k = 2$ в пристенной области и $\sigma_k = 1$ в области основного потока; μ_t – турбулентная вязкость, вычисляется согласно BSL k - ω модели [4].

Выражение для расчета корреляции давления со скоростью деформации может быть представлено в виде:

$$\Phi_{ij} = \Phi_{ij,1} + \Phi_{ij,2}, \quad (5)$$

где $\Phi_{ij,1}$ – «медленный» член, отличен от нуля при условии анизотропности турбулентного поля и отвечает за перераспределение энергии турбулентности между компонентами реинольдсовых напряжений в направлении изотропии; $\Phi_{ij,2}$ – «быстрый» член, за счет флуктуаций давления, вызванных средней деформацией, приводит генерацию турбулентности из анизотропного в изотропное состояние.

В свою очередь, $\Phi_{ij,1}$ и $\Phi_{ij,2}$ вычисляются согласно следующим соотношениям:

$$\Phi_{ij,1} = 0,16\rho\omega \left(-\overline{u'_i u'_j} + \frac{2}{3}k\delta_{ij} \right), \quad (6)$$

$$\Phi_{ij,2} = -0,77 \left(P_{ij} - \frac{2}{3}P\delta_{ij} \right) - 0,2 \left(D_{ij} - \frac{2}{3}P\delta_{ij} \right) - 0,5\rho k \left(S_{ij} - \frac{1}{3}S_{kk}\delta_{ij} \right), \quad (7)$$

где ω – удельная скорость диссипации турбулентной энергии; k – кинетическая энергия турбулентности ($k = \frac{1}{2}\overline{u'_i u'_i}$); δ_{ij} – единичный тензор; S_{ij} – тензор скоростей деформации; S_{kk} – дивергенция поля скорости; D_{ij} и P определяются согласно выражениям (8) и (9) соответственно:

$$D_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_k} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_j u'_k} \frac{\partial u_k}{\partial x_i}, \quad (8)$$

$$P = -\overline{u'_j u'_k} \frac{\partial \overline{u_k}}{\partial x_j}. \quad (9)$$

Тензор вязкой диссипации E_{ij} моделируется согласно гипотезе локальной изотропности турбулентных напряжений и определяется выражением:

$$E_{ij} = 0,06\rho\omega k\delta_{ij}. \quad (10)$$

Конечный вид уравнения переноса (3) с учетом соотношений (4-7) и (10) примет вид:

$$\frac{\partial \rho \overline{u'_i u'_j}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (u_k \rho \overline{u'_i u'_j}) = P_{ij} - E_{ij} + \Phi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \rho \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right]. \quad (11)$$

Помимо шести уравнений переноса реинольдсовых напряжений, RSM BSL модель включает в себя уравнение для удельной скорости диссипации турбулентной энергии ω :

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \rho \omega) = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \quad (12)$$

где α , β , σ_ω , $\sigma_{\omega 2}$ – набор констант, значения которых меняются во внутренней области пограничного слоя и основном потоке [4]; F – весовая функция; P_k – член генерации турбулентности, определяется согласно уравнению:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right). \quad (13)$$

Расчетная область проточной части фильтра представлена тремя вариантами однородной гексаэдрической расчетной сетки размерностью около $18 \cdot 10^6$ конечных объемов. Общий вид объемной сетки и ее сечение для варианта исполнения фильтра с высотой магнитной системы 60 мм приведены на рис. 2. Результаты численного моделирования приведены в табл. 1.

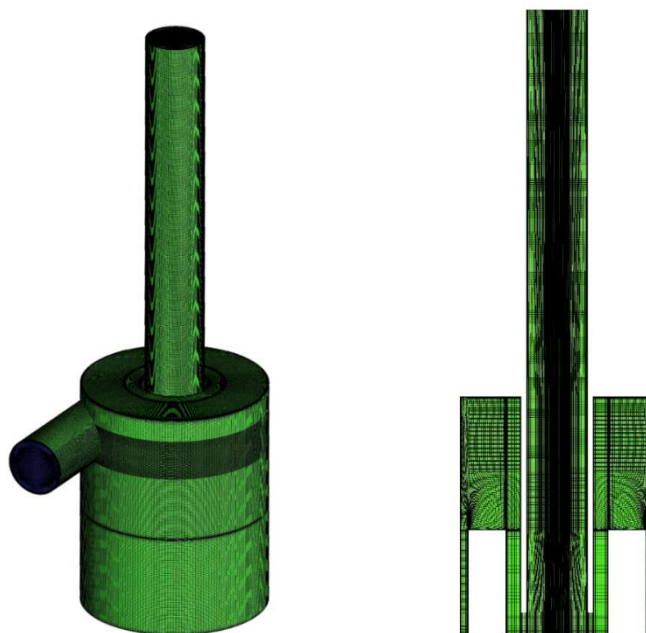


Рис. 2. Расчетная сетка проточной части фильтра с высотой магнитной системы 60 мм:
а – поверхностная сетка; б – разрез объемной сетки

Fig. 2. Calculated grid of the flow part of the filter with a magnetic system height of 60 mm:
a – surface mesh; б – sectional elevation of volumetric mesh

Таблица 1.
**Результаты численного моделирования
 возможных вариантов конструкции
 модернизированной проточной части фильтра**

Table 1.
**The results of numerical modeling of possible
 design options for the modernized flow part of the filter**

Высота магнитной системы, мм	40	60	80
Значение перепада давления, кПа	52,18	52,94	59,78

В результате проведения расчетного моделирования была определена оптимальная конструкция фильтра, высота магнитной системы которого составила 60 мм. Данный вариант исполнения проточной части магнитогидродинамического фильтра содержит значительную область, характеризующуюся интенсивным воздействием магнитного поля. При этом величина гидравлического сопротивления фильтра имеет относительно невысокое значение.

Модернизация выходного участка фильтра

На следующем этапе модернизации проточной части фильтра проводился анализ конструктивных решений, способствующих сокращению зоны образования вихревых структур на

выходном участке. Для этого запишем уравнение Бернулли (14) для центра тяжести входного 1 и выходного 2 сечений канала (рис. 3):

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V^2}{2g} + \Delta h, \quad (14)$$

где z_1, z_2 – расстояние входного и выходного сечений от дна фильтра, P_1, P_2 – давление на входном и выходном сечениях, ρ – плотность воды, V – среднерасходная скорость потока, α_1 – коэффициент Кориолиса для входного сечения, α_2 – коэффициент Кориолиса для выходного сечения, Δh – гидравлические потери между входным и выходным сечениями.

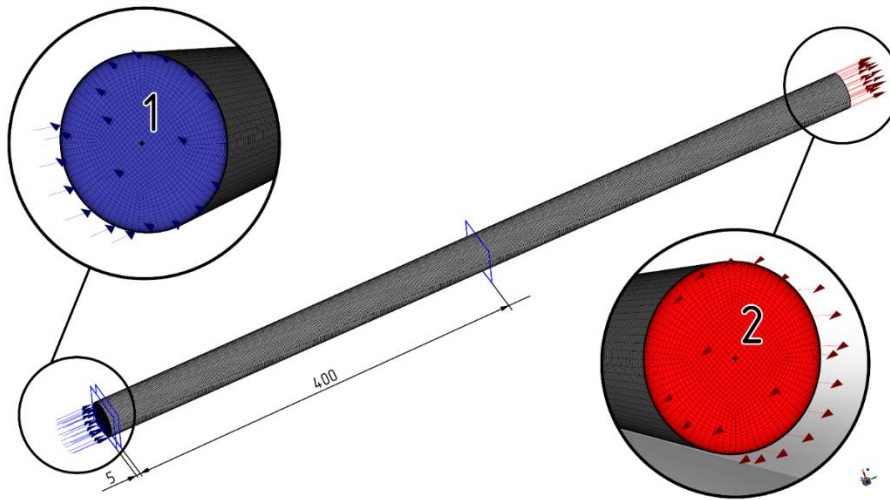


Рис. 3. Расчетная модель:

1 – центр тяжести входного сечения; 2 – центр тяжести выходного сечения

Fig. 3. Calculation model:

1 – center of gravity of the inlet section; 2 – center of gravity of the outlet section

Выразив перепад давления ΔP из (14):

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho g \left(z_2 - z_1 - \frac{\alpha_1 V^2}{2g} + \frac{\alpha_2 V^2}{2g} + \Delta \square \right), \quad (15)$$

и подставив вместо потери напора соотношение (16):

$$\Delta \square = \left(\xi + \lambda \frac{l}{d} \right) \frac{V^2}{2g} = \xi_{\text{э}} \frac{V^2}{2g}, \quad (16)$$

где ξ – общий коэффициент потерь, λ – коэффициент трения, l – длина трубы, d – диаметр трубы, $\xi_{\text{э}}$ – эквивалентный коэффициент потерь, получим:

$$\Delta P = \rho g \left(z_2 - z_1 - \frac{\alpha_1 V^2}{2g} \right) + (\alpha_2 + \xi_{\text{э}}) \frac{\rho V^2}{2} = \text{const} + (\alpha_2 + \xi_{\text{э}}) \frac{\rho V^2}{2}. \quad (17)$$

На основе анализа уравнения (17) можно сделать вывод о том, что при решении задачи оптимизации проточной части фильтра следует рассмотреть два основных направления: уменьшение величины $\xi_{\text{э}}$ и получение профиля скорости наиболее близкого к турбулентному, а именно, уменьшение α_2 до $\alpha_{\text{турб}} = 1,05 \div 1,1$. Как видно из рис. 3, расчетная модель представляет собой цилиндрический канал длиной 800 мм с диаметром 36 мм. При этом часть канала длиной 400 мм является составной частью фильтра, а оставшаяся представляет собой участок стабилизации. При проведении расчетного моделирования во входном сечении канала задавались поле скорости и турбулентные параметры, полученные в результате ранее проведенного расчетного исследования [5]. Это позволило значительно сократить количество расчетных узлов и, следовательно, времени проведения расчетов.

Необходимо отметить, что, наряду с минимизацией величины гидравлического сопротивления, к основным требованиям, предъявляемым к конструкции выпрямителя потока, были отнесены термоустойчивость, простота конструкции и низкая стоимость изготовления. По этой причине первоначально рассматривались следующие варианты исполнения выпрямителей потока (рис. 4 а-г): крестообразная вставка и три варианта оребрения, выполненного на внутренней образующей канала. Ребра выпрямителей данного типа представляют собой прямые пластины, расположенные под углом 90° друг к другу. Высота пластин (рис. 4 б-г) составила 13,5, 9 и 4,5 мм. Длина выпрямителей – 400 мм (рис. 4). Критерием выбора оптимальной конструкции выпрямителя являлось снижение интенсивности вихреобразования в выходном сечении канала.

Анализ поля скорости потока, полученного с применением крестообразной вставки, не позволил установить стабилизации профиля скорости потока в выходном сечении модели. Исходная вихревая структура при этом дробится на четыре независимых вихря (рис. 4а). Расчет оребренной модели с высотой ребра 13,5 мм выявил образование в центральной области потока наличие пяти вихревых структур меньшего размера, которые сохраняют свою устойчивость на всей длине канала (рис. 4б). Эффект разрушения вихревых структур в результате интенсивного переноса импульса в рассматриваемом сечении характерен для варианта выпрямителя с высотой ребра 9 мм (рис. 4в). При дальнейшем уменьшении высоты ребра данный эффект прослеживается менее выражено.

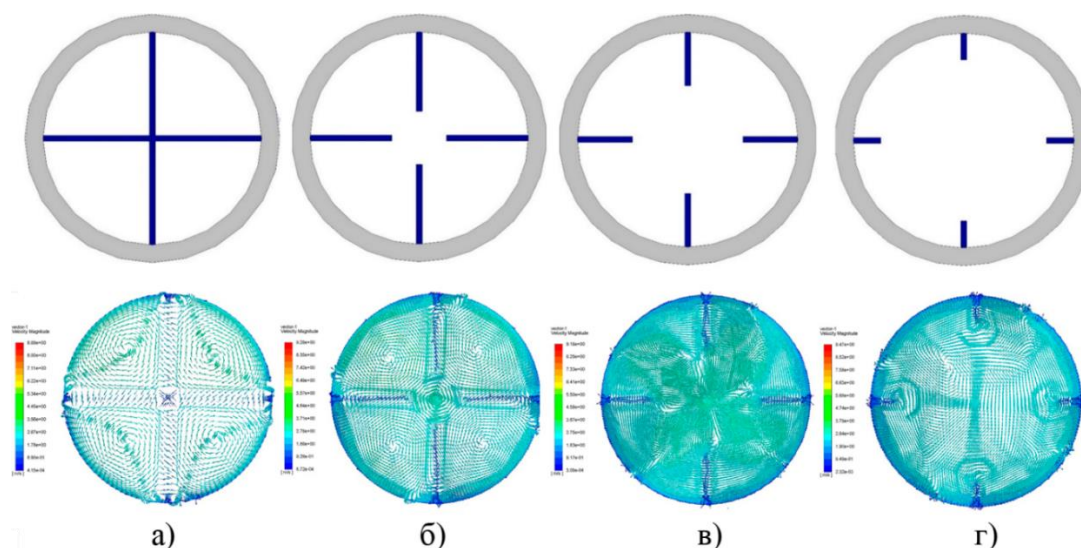


Рис. 4. Геометрия выпрямителей и поля скорости в характерном сечении для:

*а – крестообразной вставки; б – прямых ребер 13,5 мм;
в – прямых ребер 9 мм; г – прямых ребер 4,5 мм*

Fig. 4. Geometry of straightener and velocity fields in a typical section for:

*а – cross-shaped insert; б – straight ribs 13.5 mm;
в – straight ribs 9 mm; г – straight ribs 4.5 mm*

Снижение высокой степени неравномерности поля скорости на начальном участке выпрямителя за счет обеспечения «плавного входа» потока в область расположения выпрямителя определило дальнейшее направление оптимизации конструкции. В дополнение к конструкциям рассмотренным ранее были предложены следующие: модель со спиральной навивкой на внутренней образующей (рис. 5а); оребренная модель с «плавным входом» и шагом расположения ребер 90° (рис. 5б); оребренная модель с «плавным входом» и шагом расположения ребер 45° (рис. 5в). Высота ребер в обоих случаях составляла 9 мм. Угол наклона ребра в начальном сечении соответствовал углу закрутки потока (около 11°) для обеспечения безударного входа и снижения гидравлического сопротивления.

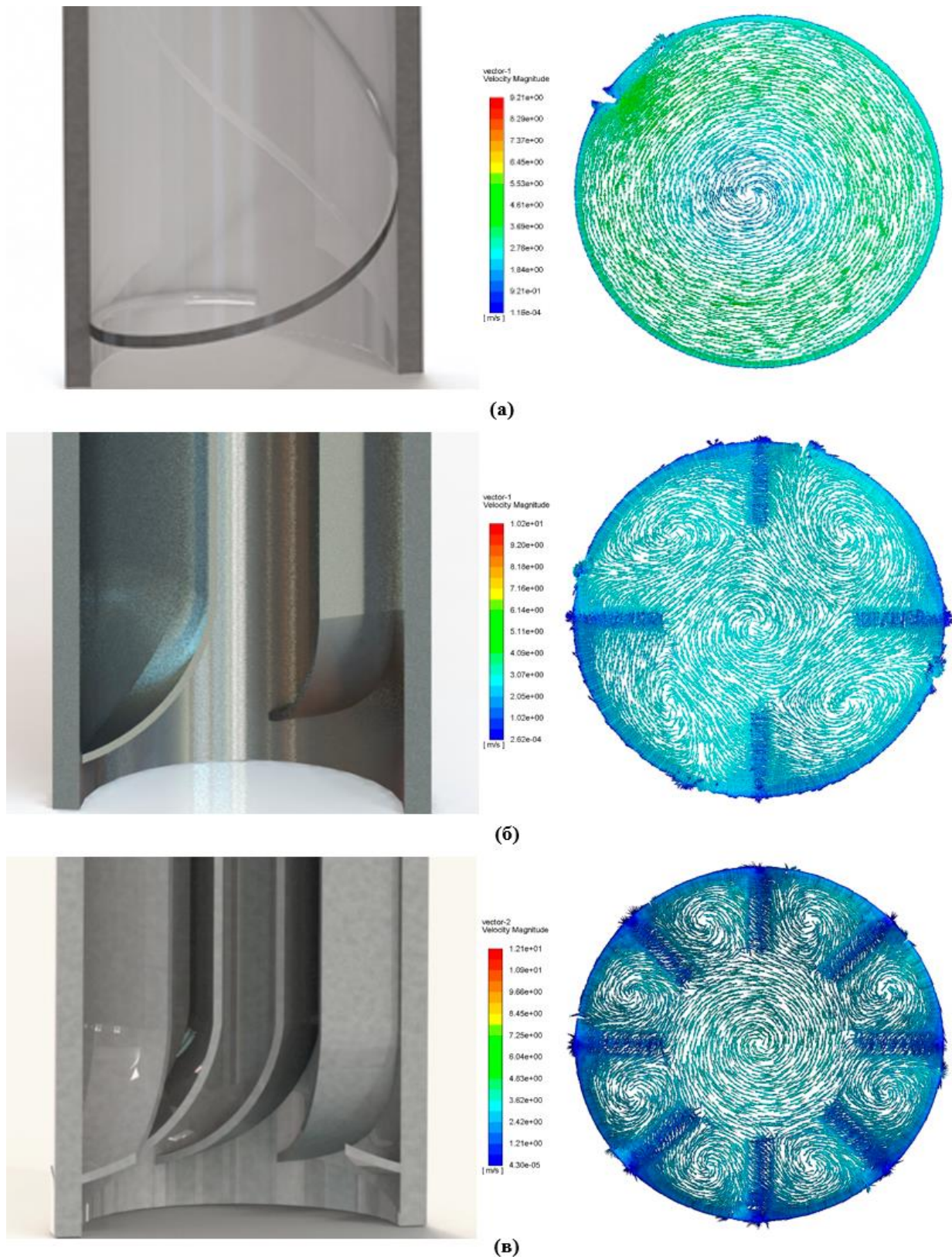


Рис. 5. Геометрия выпрямителей и поля скорости в характерном сечении:
а – спиральная навивка; б – ребрение с «плавным входом» и шагом 90°;
в – ребрение с «плавным входом» и шагом 45°

Fig. 5. Geometry of straightener and velocity fields in a typical section:
a – spiral winding; б – ribs with «smooth entry» and 90° pitch;
в – ribs with «smooth entry» and 45° pitch

Проведенные расчетные исследования показали низкую эффективность применения спиральной навивки. Поле скорости на выходе из такого канала практически идентично полю скорости на выходе из канала без вставки (рис. 5а). Использование моделей с «плавным входом» позволяет исключить образование области с интенсивным вихреобразованием на входном участке, однако с точки зрения стабилизации потока на выходе из канала, данное конструктивное решение показало худший результат по сравнению с моделями с прямыми ребрами (рис. 5б, 5в). Поток содержит вихри в сегментах, ограниченных ребрами, и в центральной части канала.

На заключительном этапе исследования проводилось сравнение профиля скорости в выходном сечении расчетной области, а также величины гидравлического сопротивления на всем расчетном участке. Результаты оценки профиля скорости представлены на рис. 6.

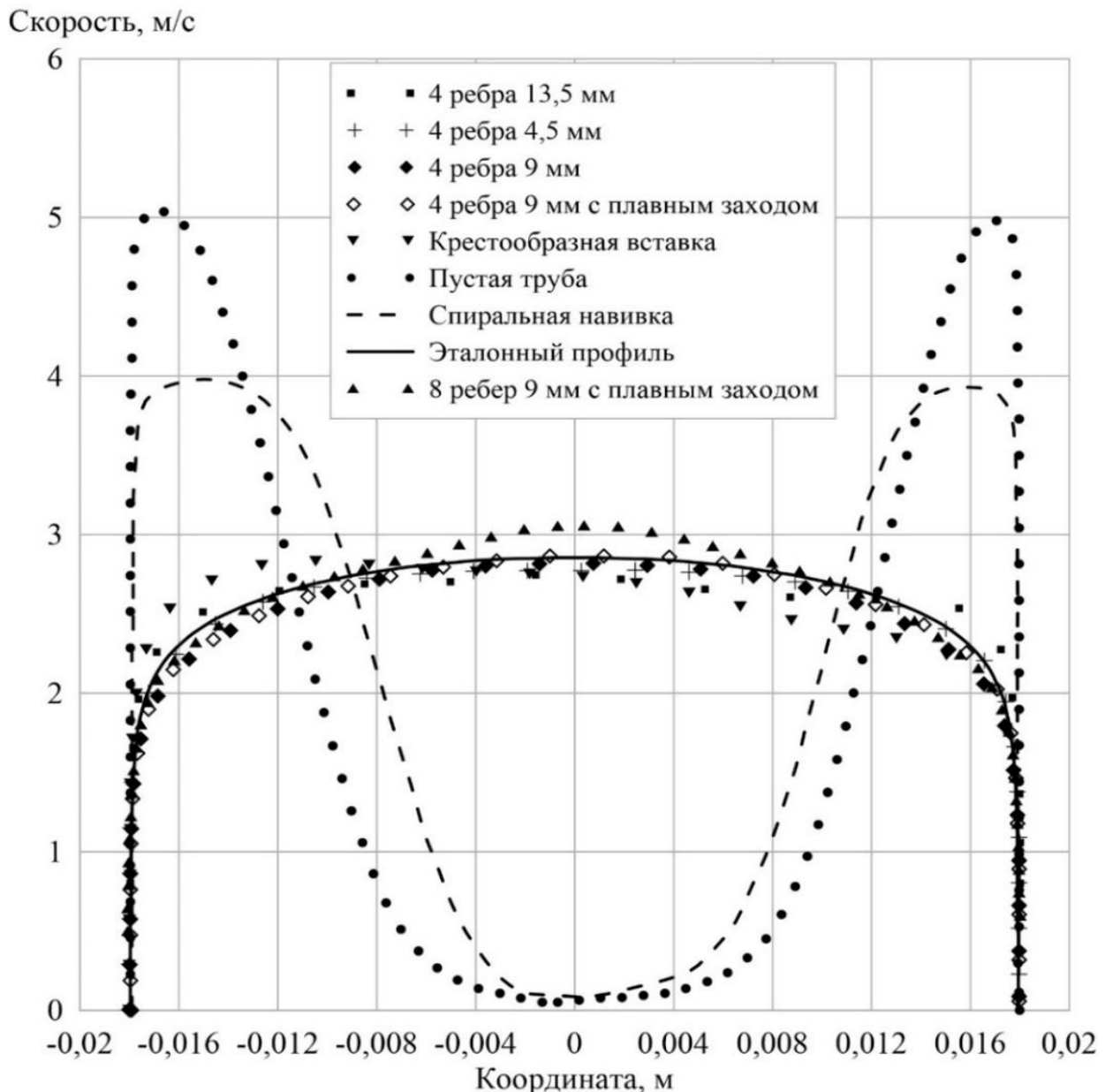


Рис. 6. Профили осевой составляющей скорости

Fig. 6. Axial velocity component profiles

В качестве «эталоны» на графике приведен профиль турбулентного потока в круглой трубе [6] при заданной средней скорости. Из графика видно, что профиль скорости в канале без вставки и в канале со спиральной навивкой существенно отличается от «эталонного» профиля. Применение других видов выпрямителей потока позволяет приблизить профиль скорости к «эталонному» виду, при этом наибольшую сходимость показывают модели с высотой ребра 9 мм, как с прямыми ребрами, так и с плавным входом.

Результаты расчета величины гидравлического сопротивления моделей с струевыпрямителями различного типа приведены в табл. 2. В качестве референсного приводится гидравлическое сопротивление трубы без вставки. Видно, что для снижения величины гидравлического сопротивления рациональным является применение выпрямителей, имеющих в своем составе прямые ребра с высотой 4,5 и 9 мм. Снижению гидравлического сопротивления способствует установка ребер с «плавным входом» и высотой 9 мм. Таким образом, предпочтительным является применение выпрямителя потока с прямыми ребрами высотой 9 мм. Его установка обеспечивает наилучшую стабилизацию потока и не приводит к существенному увеличению гидравлического сопротивления в рассмотренном диапазоне расходов. Кроме того, данная конструкция отличается простотой и низкой стоимостью изготовления.

Таблица 2.
Результаты расчета перепада давления

Table 2.
Results of pressure drop calculation

№ п/п	Модель выпрямителя	Значение перепада давления, кПа
1	Прямые ребра длиной 4,5 мм	12,32
2	Прямые ребра длиной 9 мм	12,79
3	Оребрение с «плавным входом» и шагом 90°	13,38
4	Труба без вставки	13,40
5	Прямые ребра длиной 13,5 мм	14,39
6	Спиральная навивка	14,69
7	Крестообразная вставка	15,28
8	Оребрение с «плавным входом» и шагом 45°	15,68

Заключение

В результате проведенного расчетного исследования определена оптимальная геометрия проточной части фильтра, предназначенного для систем водоподготовки ЯЭУ. Оптимизация проточной части проводилась с учетом габаритных характеристик магнитной системы, адаптированной для эксплуатации при высоких параметрах фильтруемой среды. Предложены варианты конструктивного исполнения выпрямителей потока, обеспечивающие снижение эффекта закрутки потока в выходном патрубке фильтра. Получены поля скорости и давления для каждой модели выпрямителя. Определены профили скорости в характерном сечении выходного патрубка, а также вычислены значения перепадов давления, связанные с конфигурацией выпрямляющего поток устройства. Выбрана наиболее эффективная модель выпрямителя, удовлетворяющая требованиям, предъявляемым к конструкции фильтра: простота изготовления, низкая стоимость, минимальная величина гидравлического сопротивления.

Библиографический список

1. **Дмитриев С.М.,** Треушников М.В., Соборнов А.Е., Рязанов Р.Р., Котин А.В., Мамаев А.В. Патент на полезную модель № 197879 U1 Российская Федерация, МПК В01D 35/06, В03С 1/02. Магнито-

- гидродинамический фильтр: № 2020109882 : заявл. 06.03.2020 : опубл. 03.06.2020; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ). – EDN VIRAYH.
2. **Дмитриев, С.М.** Результаты экспериментального исследования и численного моделирования циклонного фильтра с постоянными магнитами для систем спецводоочистки ЯЭУ / С.М. Дмитриев, А.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 (138). С. 54-65.
 3. **Белов, И.А.** Моделирование турбулентных течений / И.А. Белов, С.А. Исаев. – СПб: изд-во БГТУ, 2001. – 108 с.
 4. Ansys Fluent Theory Guide 19.0, 2018.
 5. **Воробьев, И.В.** Модернизация проточной части магнитогидродинамического фильтра с применением CFD-кода / И.В. Воробьев, В.П. Иванов, М.А. Налепин, Н.В. Мацин, Р.Р. Рязанов, А.Е. Соборнов // Будущее технической науки: сборник материалов XXII Всероссийской молодежной научно-технической конференции. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2023. С. 500-501.
 6. **Корневский, А.А.** Определение профиля скорости в круглой цилиндрической трубе при турбулентном режиме течения с использованием численных методов / А.А. Корневский, М.В. Рябинин // Экспозиция нефть газ. 2016. № 3 (49). С. 64-70.

*Дата поступления
в редакцию: 06.07.2024*

*Дата принятия
к публикации: 20.09.2024*

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.3.01

EDN: EOCDLB

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗРАБОТАННОГО ОБТЕКАТЕЛЯ ДЛЯ ЛЕГКОГО КОММЕРЧЕСКОГО АВТОМОБИЛЯ

А.С. Вашурин

ORCID: 0000-0001-8843-9488 e-mail: vashurin@nntu.ru

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

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

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

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

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

ORCID: 0009-0003-0245-0638 e-mail: sergmanian@yandex.ru

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

Представлен анализ мероприятий по снижению аэродинамического сопротивления легкого коммерческого автомобиля. На основе обзора существующих практик установлено, что наиболее перспективным методом снижения аэродинамического сопротивления при переходе с бортовой версии на версию с тентом является установка обтекателя на крышу автомобиля. Проведена оценка влияния обтекателя на показатели потребляемого топлива. Объектом исследования выступает базовая модель автомобиля ГАЗ – А21R23, оснащенная бензиновым двигателем внутреннего сгорания. Оценка расхода топлива выполнена по результатам испытаний на постоянных скоростях: 60, 80 и 100 км/ч в ездовом цикле NEDC. Установлено, что у автомобиля с тентом расход топлива увеличивается на 7 %. Применение покупного обтекателя дало незначительный результат в экономии расхода топлива, показав необходимость разработки собственного аналога. Методом компьютерного моделирования доказано, что при установке разработанного обтекателя коэффициент аэродинамического сопротивления может быть снижен на 21 %, а экономия топлива в цикле NEDC составляет 5 %.

Ключевые слова: легкий коммерческий автомобиль, расход топлива, обтекатель, коэффициент аэродинамического сопротивления.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Вашурин, А.С. Оценка эффективности применения разработанного обтекателя для легкого коммерческого автомобиля / А.С. Вашурин, А.А. Колин, Л.Н. Орлов, В.Ф. Кулепов, С.Е. Манянин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 4. С. 64-70. EDN: EOCDLB

EFFICIENCY EVALUATION OF DEVELOPED FAIRING FOR LIGHT COMMERCIAL VEHICLE

A.S. Vashurin

ORCID: **0000-0001-8843-9488** e-mail: **vashurin@nntu.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

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

L.N. Orlov

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

V.F. Kulepov

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

S.E. Manyanin

ORCID: **0009-0003-0245-0638** e-mail: **sergmanian@yandex.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article analyzes measures to reduce the aerodynamic drag of a light commercial vehicle. A review of existing solutions showed that the most promising method of reducing aerodynamic drag when transition from an airborne version to a version with an awning is to install a fairing on the roof of the vehicle. The effect of the fairing on fuel consumption indicators was assessed. The object of study is the basic model of the GAZ vehicle – A21R23, equipped with a gasoline internal combustion engine. Its fuel consumption is estimated based on the results of tests carried out at constant speeds: 60, 80 and 100 km/h, in the NEDC driving cycle. It has been established that a vehicle with an awning has a 7% increase in fuel consumption. The use of a purchased fairing showed insignificant results in saving fuel consumption, so this led to the development of our own fairing. The obtained computer modeling data proved that installation of the developed fairing can reduced the aerodynamic drag coefficient by 21 %, and fuel savings in the NEDC cycle will be 5 %.

Key words: light commercial vehicle, fuel consumption, fairing, aerodynamic drag coefficient.

FOR CITATION: A.S. Vashurin, A.A. Kolin, L.N. Orlov, V.N. Naumov, V.F. Kulepov, S.E. Manyanin. Efficiency evaluation of developed fairing for light commercial vehicle. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 4. Pp. 64-70. EDN: EOCDLB

Введение

Одним из основных требований к наземным транспортным средствам является ограничение выбросов в атмосферу вредных веществ. Правилами ЕС 2019/63 на 2020 г. установлено предельное значение выброса CO₂ в размере 147 г/км для легкого коммерческого автомобиля. Требуемое снижение данного показателя к 2025 г. запланировано на 15 %, к 2030 г. – на 31 %. Можно сказать, что в ближайшее время энергия от двигателя внутреннего сгорания будет доминировать. Несомненно, для потребителя одним из важных показателей является расход топлива. В перечне характеристик транспортных средств он обычно указывался на

постоянной скорости, что в целом не отражает расходы топлива в городских условиях. С введением ГОСТ Р 58554-2019 автопроизводителю необходимо информировать потребителей о расходе топлива в л/100 км и выделяемых выбросах CO₂ (г/км) в городе и за городом. Снижение расхода топлива может благоприятно отразиться на выбросах CO₂ в г/км, а также повысить конкурентные преимущества автомобиля. Поэтому работы, направленные на снижение расхода топлива и повышение энергоэффективности, являются весьма актуальными, что отражено в Распоряжениях Правительства РФ № 831-р, № 3052-р по Стратегии развития автомобилестроения.

Существующие подходы к снижению расхода топлива в целом основаны на оптимизации ДВС и его режимов работы, а также на конструктивных параметров автомобиля. Одним из популярных направлений по изменению конструктивных параметров является снижение аэродинамического сопротивления [1-10]. Успешные работы в этом направлении можно отметить у автопроизводителей. Так, для цельнометаллических фургонов *Volkswagen Crafter*, *Mercedes-Benz Sprinter* получили распространение измененные в плане аэродинамики кузова (передний бампер, скос крыши, задняя зауженная часть, формы наружных зеркал). Наружная поверхность днища для автомобилей с передним приводом делается как можно более гладкой. У автомобиля *FIAT Ducato* большой угол наклона передних стоек обеспечивает одно из лучших значений коэффициента аэродинамического сопротивления в своем классе. У автомобиля *Iveco Daily* за счет изменения дизайна снижен коэффициент аэродинамического сопротивления на 6 %. Для автомобиля *Ford Transit* применяются автоматические жалюзи радиатора, снижающие аэродинамическое сопротивление при движении. Для модификаций автомобиля с тентами автопроизводители устанавливают обтекатели на крыше и по бокам.

Исследования показывают, что применение лобового обтекателя позволяет снизить аэродинамическое сопротивление C_x легкового автопоезда на 25-30 %, что эквивалентно уменьшению расхода топлива на 5-6 % [10]. Увеличение угла наклона лобового стекла кабины от 0 до 22° позволяет снизить значение C_x на 10 % [2]. Применение обтекаемых кабин, одинаковых по высоте и ширине с кузовом, уменьшает коэффициент аэродинамического сопротивления на 35 % [1]. За счет дополнительных аэродинамических элементов возможно снижение коэффициента C_x автомобилей ВАЗ на 10-15 % [9]. О снижении коэффициента аэродинамического сопротивления от установки аэродинамических элементов на легковом автомобиле говорится в работе [8]. В работе [13] приводится количественная оценка коэффициента C_x без изменения внешней формы автомобиля. Проводится оценка уменьшения коэффициента C_x в зависимости от дорожного просвета, установки боковых зеркал, опускания боковых стекол. В работе [5] отмечается, что при снижении аэродинамического сопротивления на 4 % расход топлива автотранспортным средством уменьшается примерно на 1 %. На основе результатов проведенного компьютерного моделирования [11] установлено, что при снижении аэродинамического сопротивления на 5 % наблюдается снижение расхода топлива в цикле *NEDC* в пределах 0,9 %.

В данной работе рассмотрено применение обтекателя для легкого коммерческого автомобиля с целью снижения расхода топлива. Учитывая опыт ранее проведенных исследований, достаточным результатом применения обтекателя может быть снижение аэродинамического коэффициента на 15 % при примерном снижении расхода топлива в районе 3-4 %.

Результаты исследования

Чтобы оценить влияние обтекателя на расход топлива, было предложено воспользоваться уже готовым обтекателем. В качестве объекта исследования был выбран автомобиль *A21R23* с бензиновым двигателем внутреннего сгорания. Для него были выбраны режимы движения на постоянных скоростях 60, 80 и 100 км/ч и движение по новому европейскому циклу вождения *NEDC*, в соответствии с правилами ООН № 101.

Дорожные испытания были выполнены специалистами НГТУ совместно с инженерами Горьковского автозавода при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей *GAZель Next* с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 г. (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года № 218). Испытания проходили три варианта автомобиля (рис. 1): с грузовой платформой (вариант № 1), с тентом (вариант № 2), с тентом и обтекателем (вариант № 3).

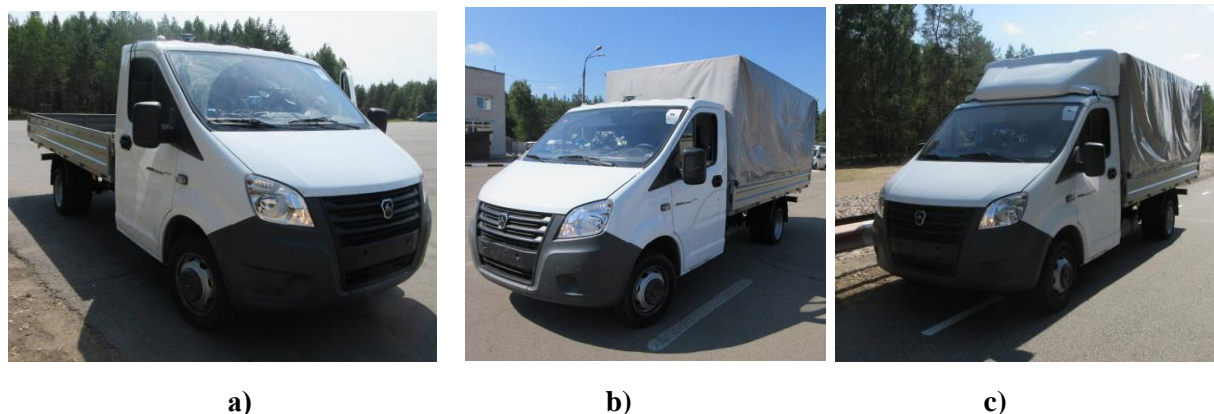


Рис. 1. Объект испытаний:
a) вариант № 1, b) вариант № 2, c) вариант № 3

Fig. 1. Test object:
a) option No.1, b) option No.2, c) option No.3

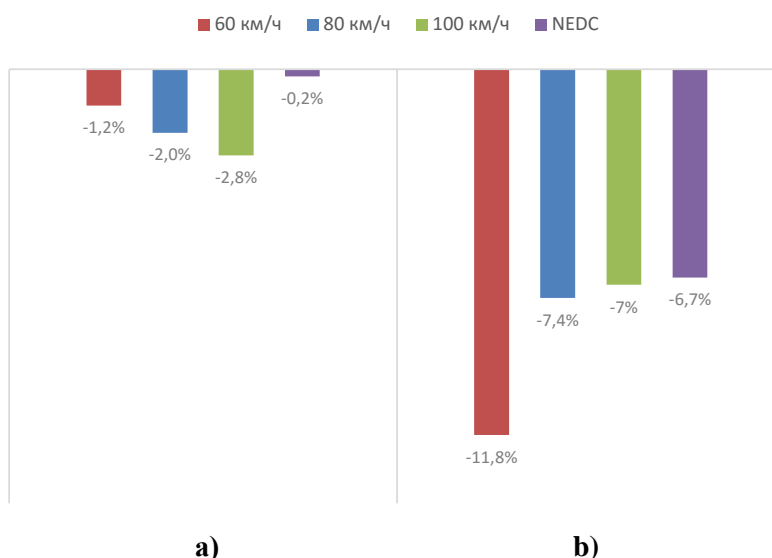


Рис. 2. Изменение расхода топлива на разных режимах движения, в %:
a) сравнение варианта № 2 с вариантом № 3; b) сравнение варианта № 2 с вариантом № 1

Fig. 2. Change in fuel consumption in different driving modes (%):
a) comparison of option No.2 with option No.3; b) comparison of option No.2 with option No.1

Натурные испытания по определению расхода топлива на постоянных скоростях и в ездовом цикле *NEDC* показали результаты, приведенные на рис. 2. За базовый вариант принят вариант № 2, от которого показано процентное изменение величины расхода топлива. Отрицательные значения указывают на снижение расхода топлива при сравнении вариантов. По результатам можно сказать, что установка тента создает увеличение силы сопротивления воздуха и, как следствие, приводит к увеличению расхода топлива в цикле *NEDC* на 7 %.

Установка покупного обтекателя в цикле *NEDC* приводит к снижению расхода топлива на 0,04 л/100 км (-0,2 %). Это не приводит к ощутимому снижению расхода топлива. Поэтому целевые показатели в снижении расхода топлива в пределах 3 % не были достигнуты. Необходимо отметить, что покупная модель обтекателя имела недостатки по способу крепления; было предложено разработать собственный обтекатель и конструкцию его крепления, отвечающую требованиям заказчика.

При разработке учтены следующие требования ОИЦ:

- унифицированное крепежное соединение без использования дверных проемов автомобиля;
- возможность установки обтекателя на кабину автомобиля при наличии фургона;
- стилистические пожелания в отношении формы обтекателя и места крепления габаритных огней.

Также необходимо обеспечить соблюдение Правил ООН № 48 в отношении расположения габаритных огней. Разработанный обтекатель представлен на рис. 3.

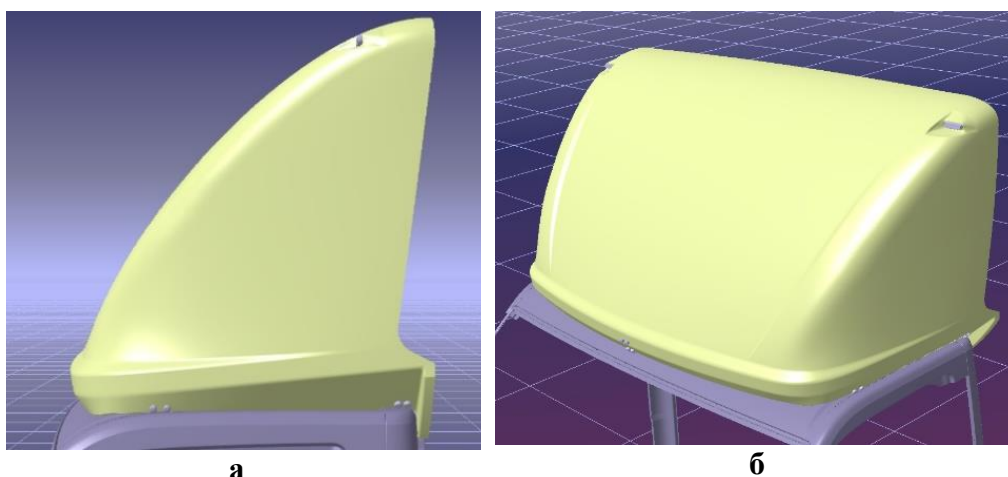


Рис. 3. Модель разработанного обтекателя:

а) вид сбоку, б) изометрический вид

Fig. 3. Model of the developed fairing:

a) side view, b) isometric view

CFD-расчеты, выполненные инженерами Горьковского автозавода, показали, что применение разработанного обтекателя снизило коэффициент аэродинамического сопротивления на 21 %. С учетом работ [5, 10, 11] можно спрогнозировать снижение расхода топлива в пределах 4 %. Для подтверждения этого было предложено проверить снижение коэффициента аэродинамического сопротивления на уже отлаженной и проверенной результатами натурных испытаний имитационной модели [12]. В расчете использовались два варианта автомобиля: с тентом и с тентом и обтекателем. Для простоты расчетов не была учтена масса самого обтекателя, и принималась в расчет полная масса действующего автомобиля. Выбраны такие же режимы, что и при натурных испытаниях, рассмотренных выше. Результаты компьютерного моделирования представлены на рис. 4. В соответствии с ними установлено, что при применении обтекателя снижение расхода топлива на 10 % наблюдается на постоянных скоростях и на - 5,3 % в цикле *NEDC*. Полученные результаты советуют целям исследования.

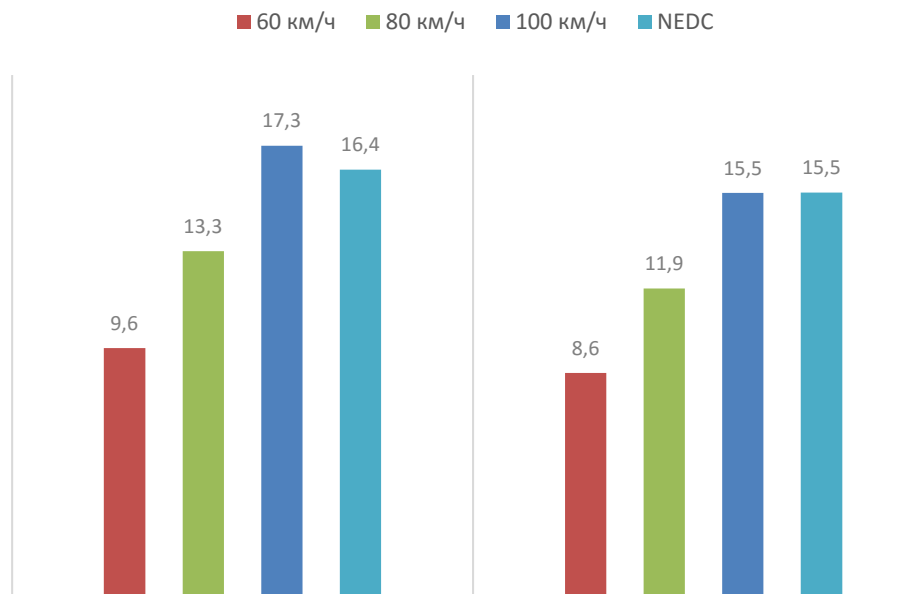


Рис. 4. Расчетные значения расхода топлива, л/100 км:
 а) автомобиль с тентом, б) автомобиль с тентом и обтекателем

Fig. 4. Estimated fuel consumption values, l/100 km:
 a) vehicle with an awning, b) vehicle with an awning and fairing

Выводы

Установка тента на бортовой автомобиль без обтекателя приводит к увеличению расхода топлива в пределах 7 % в ездовом цикле *NEDC*. Установка покупного обтекателя незначительно снижает расхода топлива на 0,2 %. Разработанный обтекатель позволяет снизить коэффициент аэродинамического сопротивления на 21 %. При этом результаты компьютерного моделирования показывают, что на постоянных скоростях наблюдается снижение расхода топлива на 10 %, а в цикле *NEDC* – на 5,3 %.

Решение о применении разработанного обтекателя требует его конструкторской доработки и проведения дополнительных натурных испытаний автомобиля.

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. **Гостев, К.А.** Совершенствование аэродинамических свойств магистрального автопоезда: автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 1997. – 21 с. – EDN ZJVUTF.
2. **Безверхий, А.С.** Разработка и освоение технологии испытаний автомобилей в аэродинамической трубе научно-исследовательского центра по испытаниям и доводке автотехники (НИЦИАМТ): автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 1997. – 28 с.
3. **Ватолин, А.К.** Пути снижения лобового сопротивления большегрузных автомобилей на основе исследований моделей в аэродинамических трубах: дисс. канд. техн. наук. – Казань, 1983. – 178 с. – EDN NPMСMP.
4. **Евграфов, А.Н.** Снижение аэродинамических потерь в подкапотном пространстве и поднищевой зоне легкового автомобиля / А.Н. Евграфов, А.И. Бурвцов, В.А. Мамедов // Совершенствование технико-экономических показателей автомобильной техники. М.: НАМИ, 1987. С. 98-101.

5. **Евграфов, А.Н.** Взаимосвязь коэффициента S_x с параметрами автомобильного кузова / А.Н. Евграфов, А.В. Кутяев, С.Б. Переверзев // Сб. науч. Труды МГИУ. – М., 2004. С. 93-98.
6. **Евграфов, А.Н.** Аэродинамическое сопротивление автомобилей и пути его снижения / А.Н. Евграфов, Е.Ф. Медведев, В.В. Московкин // Научные труды ВЗПИ. М.: 1982. С. 74-86.
7. **Евграфов, А.Н.** Некоторые результаты научно-исследовательских работ по снижению аэродинамического сопротивления автомобилей и автопоездов / А.Н. Евграфов, Е.Ф. Медведев, В.В. Московкин, В.А. Петрушов // Труды НАШ. Вып. 181, 1980. С. 52-61.
8. **Кутяев, А.В.** Влияние аэродинамики на формообразование кузова при проектировании автомобиля: дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2009. – 137 с. – EDN NQPMZN.
9. **Переверзев, С.Б.** Улучшение обтекаемости легкового автомобиля путем совершенствования параметров кузова: дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2005. – 19 с. – EDN NINXTH.
10. **Шведов, С.Б.** Совершенствование аэродинамики легкового автопоезда с высоким прицепом: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2016. – 140 с. – EDN YTGMMKU.
11. **Колин, А.А.** Влияние основных параметров автомобиля на расход топлива в ездовых циклах / А.А. Колин, С.Э. Силантьев, П.С. Рогов, С.А. Сергиевский // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 1(84). С. 149-156. – DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-1-149-156. – EDN MJNFFR.
12. **Колин, А.А.** Применение имитационной модели для определения динамических и топливно-экономических свойств автомобиля / А.А. Колин, С.Э. Силантьев, П.С. Рогов, С.А. Сергиевский // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. № 4(131). С. 101-108. DOI 10.46960/1816-210X_2020_4_101. EDN OEXIDU.
13. **Королев, Е.В.** Влияние параметров положения на аэродинамику легкового автомобиля / Е.В. Королев, А.В. Балыкин, С.И. Корженовский // Вестник НГИЭИ. 2011. Т. 2. № 6(7). С. 60-65. – EDN PIYCCX.

*Дата поступления
в редакцию: 13.03.2024*

*Дата принятия
к публикации: 24.10.2024*

УДК 629.3

EDN: YEMREG

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА, ОБУСЛОВЛЕННОЕ СНЕЖНЫМ ПОКРОВОМ, ВЫВЕТРИВАНИЕМ, ТАЯНИЕМ, ДЕФОРМАЦИЕЙ ОПОРНОГО ОСНОВАНИЯ, СГЛАЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ КОЛЕСА И ПРОЧИМИ ПРОЦЕССАМИ

П.Е. Дмитриев

ORCID: 0009-0007-6344-963X e-mail: pavel-9524755555@yandex.ru

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

А.А. Аникин

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

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

Ю.И. Молев

ORCID: 0000-0002-0429-4590 e-mail: moleff@yandex.ru

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

У.Ш. Вахидов

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

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

С.А. Коростелев

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

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

Исследованы возможности моделирования процессов взаимодействия движителя с опорным основанием. Нелинейное уравнение в частных производных первого порядка применено к исследованию изменения профиля поверхности движения, которое может быть вызвано различными причинами. Приведенная модель позволяет описать траекторию центра колеса, движущегося по неровному профилю дороги при длинах неровностей, сопоставимых с радиусом колеса. Рассмотрены примеры качения колеса по неровному профилю опорного основания; рост поверхности за счет падающего снега при отсутствии и наличии ветра; таяние (спадание) профиля. Приведен качественный анализ полученных решений нелинейного уравнения в частных производных, и показаны дальнейшие направления развития теории. Указаны основные проблемы, которые могут возникнуть с «градиентной катастрофой» и областью многозначного решения. Показаны некоторые пути преодоления этих трудностей, а также способы физической интерпретации неоднозначных решений уравнения в частных производных. Показано, что нелинейное уравнение в частных производных позволяет описать широкий круг физических явлений. Данное уравнение может быть включено в более общую модель транспортного средства, например, при рассмотрении движения колебательной системы по неровному профилю.

Ключевые слова: неровный профиль дороги; заснеженный профиль дороги; наземный транспорт.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дмитриев, П.Е. Изменение профиля поверхности движения транспортного средства, обусловленное снежным покровом, выветриванием, таянием, деформацией опорного основания, сглаживающей способностью колеса и прочими процессами / П.Е. Дмитриев, А.А. Аникин, Ю.И. Молев, У.Ш. Вахидов, С.А. Коростелев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 4. С. 71-81. EDN: YEMREG

CHANGES IN VEHICLE'S MOVEMENT SURFACE PROFILE DUE TO SNOW COVER, WEATHERING, MELTING, DEFORMATION OF THE SUPPORTING BASE, WHEEL SMOOTHING ABILITY AND OTHER PROCESSES

P.E. Dmitriev

ORCID: **0009-0007-6344-963X** e-mail: **pavel-9524755555@yandex.ru**

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

Nizhny Novgorod, Russia

A.A. Anikin

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

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

Nizhny Novgorod, Russia

Y.I. Molev

ORCID: **0000-0002-0429-4590** e-mail: **moleff@yandex.ru**

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

Nizhny Novgorod, Russia

U.Sh. Vakhidov

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

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

Nizhny Novgorod, Russia

S.A. Korostelev

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

Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov

Barnaul, Russia

Abstract. The article explores the possibilities of modeling the processes of interaction between a propulsion unit and a supporting base. A first order nonlinear partial differential equation is used to study the change in the profile of the movement surface, which can be caused by various reasons. The given model allows to describe the trajectory of the center of a wheel moving along an uneven road profile with the lengths of the unevenness comparable to the radius of the wheel. Examples of wheel rolling on an uneven profile of a supporting base; surface growth due to falling snow without wind and with wind; profile melting. A qualitative analysis of the obtained solutions of a nonlinear partial differential equation is given, and further directions for the development of the theory are shown. The main problems that can arise with the «gradient catastrophe» and the multi-valued solution domain are indicated. Some ways of overcoming these difficulties are shown, as well as methods of physical interpretation of ambiguous solutions of partial differential equations. A nonlinear partial differential equation can be used to describe a wide range of physical phenomena. This equation can be included in a more general model of a vehicle, for example, when considering the motion of an oscillating system along an uneven profile.

Key words: uneven road profile; snowy road profile; ground transportation.

FOR CITATION: P.E. Dmitriev, A.A. Anikin, Y.I. Molev, U.Sh. Vakhidov, S.A. Korostelev. Changes in vehicle's movement surface profile due to snow cover, weathering, melting, deformation of the supporting base, wheel smoothing ability and other processes. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 4. Pp. 71-81. EDN: YEMREG

Проблема описания поверхностей движения остается одной из важных задач наземных транспортных средств, что обусловлено большим разнообразием их физико-механических свойств, сложным характером взаимодействия движителя с неровной деформируемой поверхностью. Изучение поверхностей движения проводятся в разных аспектах: с точки зрения не-

сущей способности; сцепных качеств; микро и макропрофиля, и др. В отличие от предшествующих исследований, в данной работе внимание уделено математическим моделям поверхностей движения, определяющим аналитические зависимости тех или иных характеристик полотна пути и позволяющим в явном виде оценить их взаимосвязь.

В статье показано приложение аналитических методов, подробно изложенных в [1-3], к исследованию изменения профиля поверхности движения, которое может быть вызвано различными причинами: ростом снежного покрова, деформацией под нагрузкой, износом, выветриванием и др. Кроме того, приведенная модель позволяет описывать траекторию центра колеса, движущегося по неровному профилю дороги при длинах неровностей, сопоставимых с радиусом колеса. Последняя задача является наименее разработанной ввиду сложности ее формализации и описания: при движении колеса по неровному профилю возникают положения, когда колесо имеет двухточечный контакт (перекатывается через яму), что приводит к потере гладкости решений. Наиболее близкими исследованиями в рамках данного аспекта изучения поверхности движения являются работы Барахтанова Л.В., Аникина А.А. [4], Кулешова А.П., Молева Ю.И., Жилейкина М.М. [5]. В работах Барахтанова Л.В. и Аникина А.А. применяется вероятностный подход к изучению заснеженных поверхностей движения; в работе Жилейкина М.М. используется кусочно-линейная аппроксимация поверхности движения. Предлагаемая в настоящей работе математическая модель носит более общий характер по сравнению с перечисленными исследованиями, а также позволяет учитывать такие эффекты, как скорость роста поверхности, неравномерность роста поверхности (в зависимости от направления нормали); изменение профиля в ветреную погоду со снегом, когда наблюдается продольное движение профиля и т.п.

Будем считать, что в начальный момент t_0 ординаты профиля дороги описываются (начальной) функцией:

$$z = z(x, t_0) = z_0.$$

С течением времени t происходит эволюция профиля дороги, причины которого на данном этапе не требуют конкретизации (рост снежного покрова; деформация основания; сглаживающая способность шины и пр.). Предполагается только, что изменение профиля дороги происходит перпендикулярно начальному профилю со скоростью w . Причем скорость w может быть как положительная, так и отрицательная – в зависимости от физической постановки задачи (рост поверхности или ее спад). Рассмотрим произвольную точку (т.Р) на начальной поверхности с координатами $\{x_p, z_p\}$, ее эволюция будет происходить по траектории, перпендикулярной – в каждый момент времени t – к текущему профилю дороги $z = z(x, t)$.

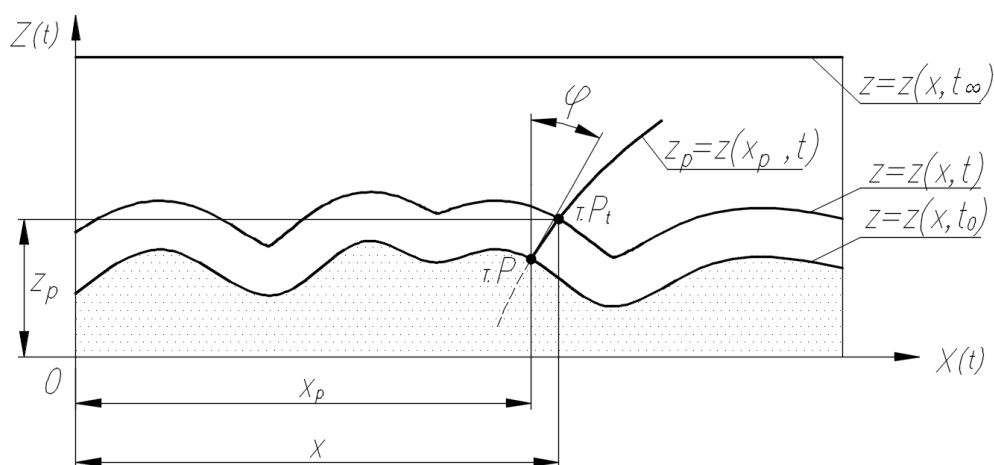


Рис. 1. Кинематика роста профиля поверхности

Fig. 1. Kinematics of surface profile growth

Будем обозначать траекторию эволюции точки Р функцией вида:

$$z_p = \xi(x_p, t). \quad (1)$$

Назовем траекторию точки «ростком». Координаты точки, принадлежащей «ростку», должны удовлетворять уравнениям:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_p}{dt} &= w \cdot \sin \varphi \\ \frac{dz_p}{dt} &= w \cdot \cos \varphi \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

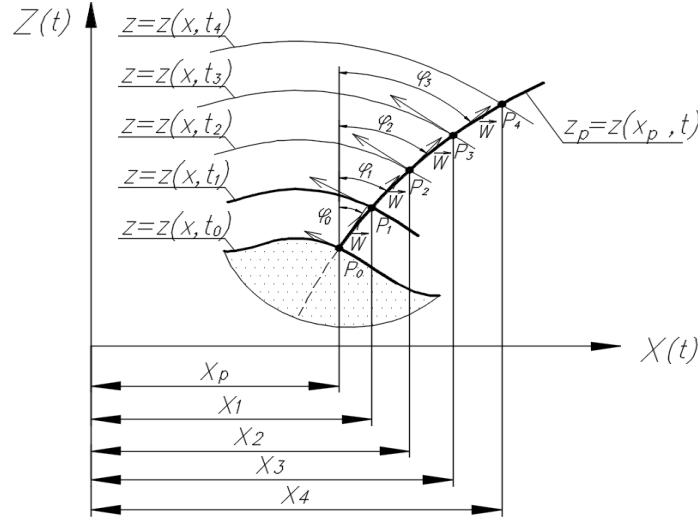


Рис. 2. «Росток» в точке P

Fig. 2. «Sprout» at point P

При рассмотрении эволюции координат точки P $\{x_p(t), z_p(t)\}$ должно выполняться также условие:

$$z_p(t) = z(x_p(t), t) = \xi(x_p, t). \quad (3)$$

Тогда второе уравнение системы примет вид:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial x} \frac{dx_p}{dt} = w \cdot \cos \varphi \quad (4)$$

Подставляя в последнее уравнение (4) первое уравнение системы (2), получим:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial x} w \cdot \sin \varphi = w \cdot \cos \varphi. \quad (5)$$

Учтем еще две зависимости из элементарной тригонометрии, которые позволят последнее уравнение выразить от одной неизвестной переменной (замкнуть):

$$\frac{\partial z}{\partial x} = -\operatorname{tg} \varphi; \quad \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1+(\operatorname{tg} \varphi)^2}}. \quad (6)$$

Таким образом, получаем уравнение в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial t} - \operatorname{tg} \varphi \cdot w \cdot \sin \varphi &= w \cdot \cos \varphi; \\ \cos \varphi \frac{\partial z}{\partial t} &= w(\sin \varphi)^2 + w(\cos \varphi)^2 = w; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{w}{\cos \varphi}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = w \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2}. \quad (8)$$

Рассмотрим ограничение уравнения (8) на вид начального профиля опорной поверхности, т.е. будем считать, что углы φ являются малыми. В этом случае справедливы приближенные равенства:

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial x} &= -\operatorname{tg} \varphi \approx -\varphi; \\ \sqrt{1 + (\operatorname{tg} \varphi)^2} &\approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \dots \end{aligned}$$

Тогда уравнение (8) приведет к виду:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = w + \frac{w}{2} \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2. \quad (9)$$

Из уравнения видно, что одно из решений, которому это уравнение удовлетворяет, является решение вида:

$$z(x, t) = wt \quad (10)$$

Уравнение (10) описывает рост поверхности движения как поступательное движение неизменяемого профиля (трансляцию). Если абсолютное положение поверхности движения не представляет интереса в рамках конкретной задачи, а исследуется лишь деформация ее профиля, можно перейти к другой переменной:

$$z'(x, t) = z(x, t) - wt.$$

Тогда уравнение (10) примет вид:

$$\frac{\partial z'}{\partial t} = \frac{w}{2} \left(\frac{\partial z'}{\partial x} \right)^2.$$

Вернемся к общему уравнению (8) и обобщим его на случай анизотропного роста, т.е. учтем зависимость скорости роста w от направления нормали. Введем новую функцию $u(x, t) = \frac{\partial z}{\partial x}$, смысл которой – тангенс угла наклона ростка. Тогда уравнение (8) представится в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial t} &= w(u) \sqrt{1 + u(x, t)^2}, \text{ или} \\ \frac{\partial z}{\partial t} &= \Phi(u). \end{aligned} \quad (11)$$

Продифференцируем (11) по x , получим уравнение для поля наклонов $u(x, t)$:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + C(u) \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (12)$$

где $C(u) = \frac{d\Phi(u)}{du} = \frac{d}{du} (w(u) \sqrt{1 + u^2})$.

Последнее уравнение (12) является уравнением Римана или уравнением простой волны, решения которого методом характеристик приводятся в [2, 3].

Пример 1. Рассмотрим случай, когда поверхность растет с разной скоростью в различных направлениях. Анизотропию роста учтем, полагая скорость w зависящей от u .

Пусть в безветренную зимнюю погоду снег вертикально осаждается на поверхность движения. При этом на элемент поверхности площадью ds , находящейся под углом φ к зениту, за единицу времени выпадает количество снега, пропорциональное $ds \cos \varphi$. Соответствующая скорость роста снежной поверхности в направлении φ определяется равенством:

$$w(u) = w \cos \varphi = \frac{w}{\sqrt{1+u^2}}.$$

Подставив полученное выражение в уравнение (9), получим:

$$\Phi(u) = w(u) \sqrt{1 + u^2} = w;$$

откуда следует, что уравнение роста (9) имеет тривиальное решение:

$$z(x, t) = z_0 + wt,$$

согласно которому форма заснеженной поверхности движения меняться не будет.

Пример 2. Рассмотрим более общий случай, когда на поверхность движения осаждается частицы снега, падающие с разных направлений. Пусть функция $D(\varphi)$ – диаграмма направленности, задающая интенсивность потока падающих частиц снега под углом φ к вертикальной оси z . Тогда полная интенсивность частиц, падающих на площадку поверхности, наклоненную под углом φ к оси z определяется выражением

$$w(\varphi) = \int_{\varphi_-}^{\varphi_+} D(\tau) \cos(\varphi - \tau) d\tau. \quad (13)$$

Первый пример, соответствующий вертикально падающему снегу, является частным случаем (13) с сингулярной диаграммой направленности:

$$D(\varphi) = w\delta(\varphi).$$

Пределы интегрирования в (13) учитывают эффекты затенения рассматриваемого элемента профиля опорной поверхности $z = z(x, t)$ остальной ее частью, т.е. являются ее функциями:

$$\varphi_+ = \varphi_+(z), \varphi_- = \varphi_-(z).$$

Иллюстрация, поясняющая зависимость пределов интегрирования от вида опорной поверхности в окрестности рассматриваемой точки, показана на рис. 3.

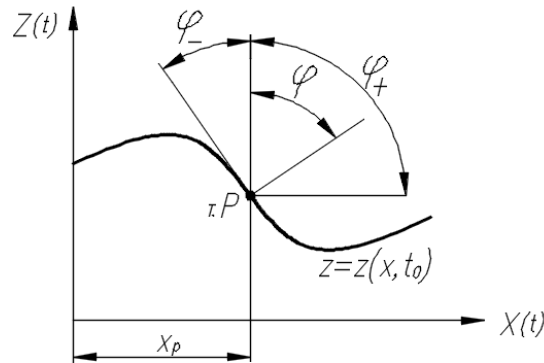


Рис. 3. Зависимость пределов интегрирования диаграммы направленности осаждаемых частиц снега на опорную поверхность

Fig. 3. Dependence of the integration limits of the directional diagram of snow particles deposited on the supporting surface

На рис. 3 для определенности показана область рассматриваемой точки профиля поверхности, с углом нормали к вертикальной линии $\varphi > 0$. При этом пределы интегрирования определяются из условия возможности попадания частиц снега на поверхность: слева – угол падения ограничен касательной к поверхности; справа – горизонтальной прямой, проходящей через рассматриваемую точку.

В рамках данного примера рассмотрим изотропный поток $D(\varphi) = const$ и отсутствие затенения ($\varphi_+ = \pi/2, \varphi_- = \varphi - \pi/2$):

$$w(\varphi) = \int_{\varphi-\pi/2}^{\pi/2} D \cos(\varphi - \tau) d\tau = D(1 + \cos \varphi).$$

Пример 3. Рассмотрим случай, когда снегопад сопровождается ветром, а снег падает под углом $\varphi_0 \neq 0$ к зениту. Начальный профиль дороги $z = z(x, t_0) = z_0$ имеет ограниченные углы наклона нормалей:

$$|\varphi - \varphi_0| < \frac{\pi}{2}.$$

Определим эволюцию профиля заснеженной поверхности движения. В этом случае диаграмма направленности имеет вид:

$$D(\tau) = w\delta(\tau - \varphi_0).$$

Ограничение на углы нормалей гарантирует, что для любой точки исходного профиля $z(x, t_0)$ δ -функция не выйдет за пределы интегрирования. Следовательно, скорость прилипания снега на участок поверхности дороги, нормаль к которому составляет угол φ с вертикалью, определяется выражением:

$$w = w \cos(\varphi - \varphi_0) = w(\cos \varphi \cos \varphi_0 + \sin \varphi \sin \varphi_0).$$

Подставив это выражение в (13), перейдя от φ к u и введя обозначения $w_1 = \cos \varphi_0; w_2 = \sin \varphi_0$, запишем уравнение в терминах $z(x, t)$:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = w_1 + w_2 u \text{ или}$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} - w_1 \frac{\partial z}{\partial x} = w_2, z(x, t_0) = z_0.$$

Последнее уравнение является линейным и имеет решение в виде:

$$z(x, t) = z_0(x - w_2 t) + w_1 t.$$

Вид решения показывает, что профиль заснеженного основания не меняет формы, а смещается в сторону ветра (рис. 4).

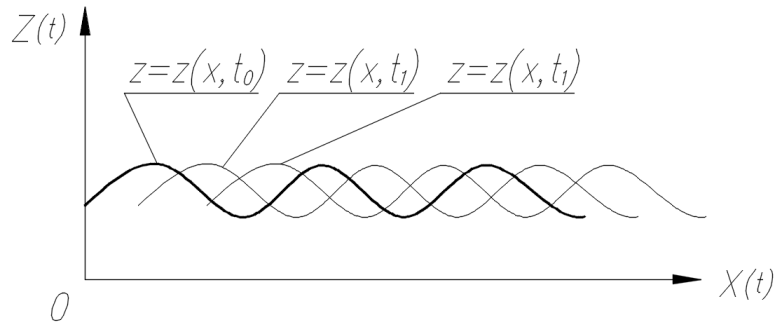


Рис. 4. Продольное смещение профиля опорной поверхности при снегопаде, сопровождающемся ветром

Fig. 4. Longitudinal displacement of the supporting surface profile during snowfall accompanied by wind

Пример 4. Рассмотрим случай роста с изотропной скоростью, т.е. скоростью не зависящей от угла φ наклона нормали $w(u) = w = const$. В этом случае $C(u) = \frac{wu}{\sqrt{1+u^2}} = w \sin \varphi$, ростки являются прямыми и скорость роста поверхности вдоль прямого ростка является постоянной. Рост профиля поверхности при этом задается параметрически [1]:

$$x = y + \frac{u_0(y)}{\sqrt{1+u_0^2(y)}} wt, \quad z = z_0(y) + \frac{wt}{\sqrt{1+u_0^2(y)}}. \quad (14)$$

Если рассмотреть в качестве исходного профиля кривой $z = z(x, t)$ синусоиду, получим:

$$z_0(x) = z_0 \cos kx; \quad u_0(x) = z_0 k \sin kx.$$

Тогда параметрическое уравнение линии $z = z(x, t)$ имеет вид:

$$z = \mu + \frac{\varepsilon \tau \sin \mu}{\sqrt{1+\varepsilon^2 \sin^2 \mu}}, \quad \eta = \varepsilon \cos \mu + \frac{\tau}{\sqrt{1+\varepsilon^2 \sin^2 \mu}},$$

где введены безразмерные переменные $kx = z$; $ky = \mu$; $ckt = \tau$; $kz = \eta$ и безразмерный параметр $kz_0 = \varepsilon$.

Профиль опорного основания $z = z(x, t)$, построенный по приведенным выше параметрическим формулам (при $\varepsilon = 0,5$, для различных t), показан на рис. 5.



Рис. 5. Рост профиля поверхности $z = z(x, t)$

Fig. 5. Surface profile growth $z = z(x, t)$

Как видно из рис. 5, в процессе роста поверхности вершины со временем уплощаются, а впадины заостряются. При критическом значении параметра (времени) начинают

образовываться «ласточкины хвосты». Подобная кривая соответствует волновому фронту оптической волны в изотропной среде.

Пример 5. Приведенные в предыдущем примере параметрические зависимости, описывающие рост поверхности, применимы и для описания выветриваемых или тающих поверхностей движения, если применить отрицательную скорость роста $w < 0$. Профили тающей поверхности приведены на рис. 6. С ростом параметра (времени), вершины начинают заостряться, а впадины, наоборот – уплощаются.

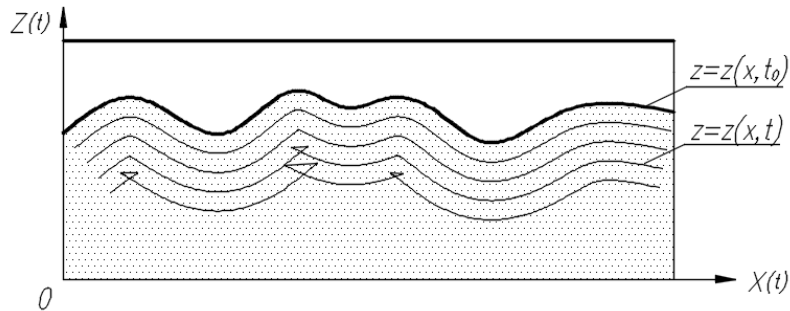


Рис. 6. Таяние профиля поверхности $z = z(x, t)$

Fig. 6. Surface profile melting $z = z(x, t)$

Рассмотренные примеры показывают универсальность математической модели (12), позволяющей описывать широкий круг явлений, связанных с изменением профиля опорного основания транспортных средств.

Особо следует отметить пример 4: одной из важных интерпретаций решений (14) графиков рис. 5 является их соответствие кривой, описываемой центром колеса при качении по неровному профилю дороги [6]. Однако данная интерпретация осложняется нарушением гладкости решений уравнения (12): при малом радиусе колеса R относительно кривизны профиля опорной поверхности, решения (14) соответствуют уравнениям эквидистанты к кривой, заданной параметрически, которые выводятся из элементарных соображений дифференциальной геометрии; при увеличении радиуса колеса (или увеличении кривизны профиля) возникает так называемая градиентная катастрофа, которая характеризуется потерей гладкости и однозначности решения. Градиентная катастрофа, в интерпретации качения колеса по неровному профилю, означает критическое значение радиуса колеса R^* , когда возникает двухточечный контакт при перекачивании через яму (лауну). При значениях радиуса колеса R , больших критического значения, имеет место неоднозначность в решении уравнения (12), из-за появления «ласточкиных хвостов» (рис. 7).

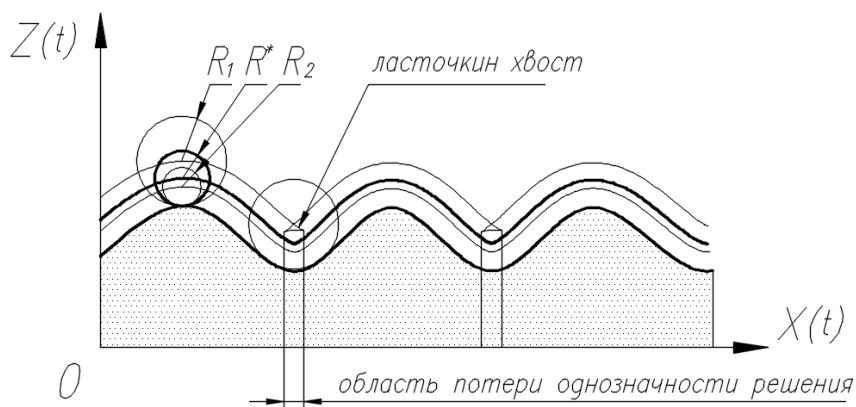


Рис. 7. Потеря однозначности решений уравнения (12) при качении колеса по неровному профилю

Fig. 7. Loss of uniqueness of solutions of equation (12) when a wheel rolls on an uneven profile

С математической точки зрения, градиентная катастрофа наступает в момент потери однозначности эйлерового описания координат. Как следует из (1), на ростке $z_p = \xi(x_p, t)$ имеет место постоянство лагранжевой координаты (т.е. росток является траекторией точки с координатой (x_p, z_p)). Обычно рассмотрение изменения профиля проводится в неподвижной системе координат, в частности, в конкретных фиксированных точках с декартовыми координатами. Такой более естественный способ наблюдения суть эйлерово описание.

Связь эйлеровых и лагранжевых координат дается уравнением, вытекающим из (3):

$$z_p(t) = z(x_p(t), t).$$

Потеря однозначности возникает в том случае, когда происходит пересечение ростков: тогда одной точке с эйлеровыми координатами (центр колеса) соответствуют две лагранжевые координаты (рис. 8). Таким образом, решения уравнения (12) разбиваются на две области: однозначное решение – градиентная катастрофа – многозначное решение.

Многозначное решение имеет смысл не во всех задачах, а только при описании невзаимодействующих потоков частиц и полей, например, оптических волн. В таких задачах, как описание фронта лесного пожара, одномерного движения частиц, качения колеса по неровному профилю и др., многозначность решения не имеет физического смысла. В случае задачи о качении колеса по неровному профилю многозначность решений находит отражение в появлении «ласточкиных» хвостов. Понятно, что такая кривая не может быть траекторией центра колеса.

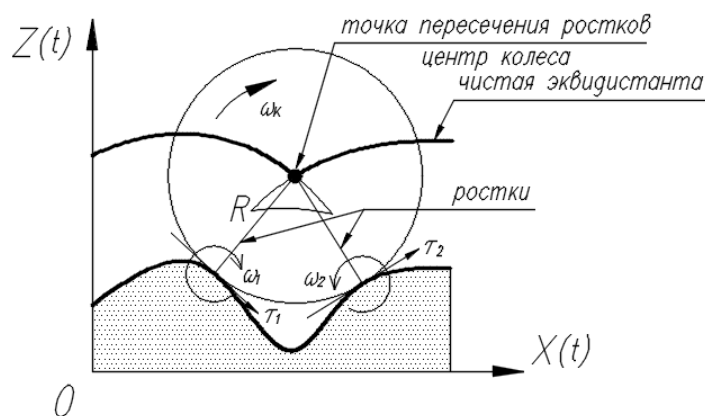


Рис. 8. Возникновение неоднозначности эйлерова и лагранжева описаний

Fig. 8. The emergence of ambiguity of Eulerian and Lagrangian descriptions

Очевидно также, что траекторией центра колеса должна быть, так называемая, «чистая» или усеченная эквидистанта (без «ласточкиных хвостов»). Даже в случае отсутствия физического смысла многозначного решения не исключается возможность конструировать из разных решений, как из подручного материала, нужные обобщенные решения и проверять их соответствие смыслу конкретной прикладной задачи. При этом находят применение различные алгоритмы конструирования обобщенных решений: накладыванием ограничений; условий экстремума; средневзвешанной суммы и т.п. Поскольку одно и то же дифференциальное уравнение в частных производных при одинаковых начальных и граничных условиях может иметь различные обобщенные решения, накладывая некоторый ряд ограничений, класс обобщенных решений возможно сузить до одного. Указанные алгоритмы конструирования обобщенных решений, помимо физического смысла, должны удовлетворять некоторым общим интегральным законам, следствием которых является само дифференциальное уравнение. Иными словами, если дифференциальное уравнение удовлетворяет некоторым общим интегральным законам сохранения, то и обобщенное решение должно согласовываться с этими законами сохранения даже в том случае, когда классические решения дифференциального уравнения уже не существуют.

Например, в случае качения колеса по неровному профилю в области многозначности решения, получить нужное обобщенное решение можно, накладывая дополнительные ограничения: 1) требование однозначности решения; 2) требование максимальности решения.

Рассмотрим, следствием какого интегрального инварианта является дифференциальное уравнение (12), описывающее, в том числе, траекторию центра колеса, катящегося по неровному профилю дороги. Для этого умножим уравнение (12):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + C(u) \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

на величину $\frac{dC(u)}{dt}$, тогда уравнение допускает вид:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad (15)$$

где $v(x, t) = C(u(x, t))$.

Уравнение (15) является уравнением Римана в стандартной форме, которое выражает в дифференциальной форме более общий интегральный закон сохранения. Определить закон сохранения дифференциального уравнения – значит найти инвариант этого уравнения. Для этого представим (15) в дивергентной форме:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2} \right) = 0.$$

Интегрируя последнее уравнение по x в бесконечных пределах, считая $v(x, t)$ стремящемся к нулю при $x \rightarrow \pm\infty$, приходим к выражению:

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} v(x, t) dx = 0.$$

Откуда следует, что инвариантом является выражение:

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} v(x, t) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} v(x, 0) dx = const. \quad (16)$$

В области многозначного решения, обобщенное решение, соответствующее траектории центра колеса, катящегося по неровному профилю, должно удовлетворять приведенному выше инварианту. Указанное требование находит отражение в структуре разрывов обобщенного решения (рис. 9).

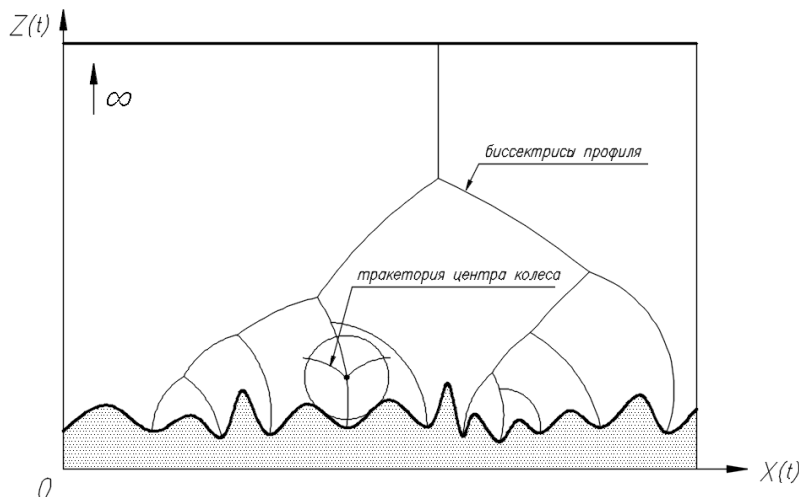


Рис. 9. Структура разрывов гладкости траекторий центра колеса в области многозначности

Рис. 9. Structure of discontinuities of smoothness of wheel center trajectories in the domain of ambiguity

На рис. 9 показаны биссектрисы, соответствующие профилю опорной поверхности. Согласно определению [6], биссектрисой $L(M)$ множества M (область ограниченная сверху профилем опорной поверхности) называется совокупность всех точек из дополнения множества M до плоскости $(R^2 \setminus M)$, которая имеет не менее двух проекций на M . Как следует

из определения, биссектриссы профиля являются теми кривыми, на которых траектории центра колеса (при различных радиусах колеса R) терпят разрыв гладкости (оставаясь непрерывными). На рис. 9 показана качественная картина поведения биссекторных кривых (перевернутое дерево): биссектрисы с ростом радиуса катящегося колеса попарно сливаются между собой и в пределе при $R \rightarrow \infty$ вырождаются в одну единственную биссектрису. Предельный случай $R \rightarrow \infty$ можно переформулировать как качение колеса с конечным радиусом, но по микропрофилю, неровностями которого можно пренебречь.

Рассматривают другой тип решений нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка, так называемые «слабые» решения [7]. Слабыми решениями называют функции, удовлетворяющие упомянутым уравнениям всюду, где существуют производные данных функций, и имеющие разрывы (самих функций или их производных) вдоль кривых (биссекторных кривых рис. 9), которые определяются из дополнительных соображений.

В заключение отметим, что приведенное в статье уравнение, описывающее изменение профиля поверхности движения и связанные с ним частные примеры, открывает дополнительные возможности в моделировании, исследовании процессов взаимодействия движителя с опорным основанием. Приведенное уравнение допускает включение в более общие математические модели транспортного средства, например, модели, описывающие движение колебательной системы по неровному профилю.

Данная работа проведена как продолжение исследований «Нижегородской научно-практической школы транспортного снеговедения».

Библиографический список

1. **Арнольд, В. И.** Волновые фронты и топология кривых / В.И. Арнольд. – М.: МЦНМО, 2018. – 116 с.
2. **Арнольд, В.И.** Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений / В.И. Арнольд. – М.: Наука, 1978. – 304 с.
3. **Весницкий, А.И.** Волны в системах с движущимися границами и нагрузками / А.И. Весницкий. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
4. **Аникин, А.А.** Проходимость гусеничных машин по снегу / А.А. Аникин, Л.В. Барахтанов, И.О. Донато. – Н. Новгород: Омега, 2009. – 362 с.
5. **Жилейкин, М.М.** Математическая модель качения эластичного колеса по неровностям недеформируемого опорного основания / М.М. Жилейкин, Б.В. Падалкин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 3 (672). С. 24-29.
6. **Зельдович, Я.Б.** Элементы математической физики / Я.Б. Зельдович. – М.: Наука, 1973. – 351 с.
7. **Лебедев, П.Д.** Геометрия и асимптотика волновых фронтов / П.Д. Лебедев, А.А. Успенский // Известия высших учебных заведений. Математика. 2008. № 3. С. 27-37.

*Дата поступления
в редакцию: 12.03.2024*

*Дата принятия
к публикации: 24.10.2024*

УДК 629.3.033

EDN: LDHONZ

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОДВИЖНОСТИ ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ТРЕХКАТКОВЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ

А.С. ДьяковORCID: 0009-0005-7787-2354 e-mail: Diakov_as@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***Д.С. Федоров**ORCID: 0009-0006-6141-7864 e-mail: dfedorov@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***Н.Е. Рахимжанов**ORCID: 0009-0003-7877-767X e-mail: nurjanrakimjanov@mail.ruВоенная академия материально-технического обеспечения
Омск, Россия

Разработан алгоритм обеспечения заданного уровня подвижности на этапе проектирования псевдошагающего робота с трехкатковым движителем. Оценка ходовых качеств исследуемого робота производится на основании имитационного математического моделирования его движения с использованием программных комплексов исследования динамики систем твердых тел. Требования к подвижности сформулированы в виде препятствий виртуального полигона, представлены результаты моделирования преодоления этих препятствий – нагрузки, действующие на движитель. Выбраны параметры приводов и движителя, обеспечивающие прохождение роботом всех препятствий. Определен отклик конструкции на изменение управляющего сигнала: время разгона до максимальной скорости, время торможения до полной остановки, максимальная скорость робота. Спрогнозировано отклонение робота от прямого курса при движении по косоугору. Получена картина нагрузок и прогноз проходимости робота, сделан вывод о соответствии робота предъявленным к нему требованиям.

Ключевые слова: мобильный робот, движитель, ходовая система, проходимость, подвижность, виртуальные испытания, прогнозирование, моделирование, препятствие, виртуальный полигон.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дьяков, А.С. Комплексная оценка подвижности виртуальной модели мобильного робота с трехкатковым движителем / А.С. Дьяков, Д.С. Федоров, Н.Е. Рахимжанов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 4. С. 82-93. EDN: LDHONZ

INTEGRATED TECHNOLOGY FOR ENSURING STABILITY OF A ROBOT MODEL WITH A THREE-WHEEL PROPULSION

A.S. DyakovORCID: 0009-0005-7787-2354 e-mail: Diakov_as@bmstu.ruBauman Moscow State Technical University
*Moscow, Russia***D.S. Fedorov**ORCID: 0009-0006-6141-7864 e-mail: dfedorov@bmstu.ruBauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

N.E. Rakimzhanov
ORCID: **0009-0003-7877-767X** e-mail: **nurjanrakimjanov@mail.ru**
Branch of VA MTO in Omsk
Omsk, Russia

Abstract. The article presents an algorithm for ensuring a given level of mobility of a pseudo-walking robot with a three-roller propulsion unit at the design stage. The driving performance of the robot under study is assessed on the basis of mathematical simulation of its movement using software packages for studying the dynamics of rigid body systems. The mobility requirements are formulated in the form of obstacles of a virtual test site. The results of modeling the overcoming of these obstacles – the loads acting on the propulsion unit are presented. The parameters of the drives and propulsion unit were selected to ensure that the robot passes all obstacles. The response of the structure to a change in the control signal is determined: acceleration time to maximum speed, braking time to a complete stop, maximum speed of the robot. The robot's deviation from the straight course when moving along a slope was predicted. A picture of the loads and a forecast of the robot's cross-country ability were obtained, and it was concluded that the robot meets the stated requirements.

Key words: mobile robot, propulsion system, cross-country ability, mobility, virtual testing, forecasting, modeling, obstacle, virtual test site.

FOR CITATION: A.S. Dyakov D.S. Fedorov N.E. Rakimzhanov. Integrated technology for ensuring stability of a robot model with a three-wheel propulsion. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 4. Pp. 82-93. EDN: LDHONZ

Введение

Количество роботов, вовлеченных во все сферы деятельности, растет ежегодно. Отдельную нишу в этом многообразии занимают подвижные роботы, предназначенные для автоматизации труда, связанного с транспортировкой некоторой полезной нагрузки, а также для выполнения задач в непригодных или опасных для человека условиях. Зачастую выполнение таких задач сопряжено с передвижением по разноуровневому городскому пространству или пересеченной природной местности. Таким образом, условия работы и рельеф местности «под ногами» каждого робототехнического комплекса уникальны. Исходя из этой уникальной комбинации условий работы и рельефа, назначается наиболее подходящая конструкция движителя для конкретного мобильного робота. Зачастую, особенно для тяжелых машин, предпочтение в выборе ходовой системы отдается традиционным колесному и гусеничному движителю. При этом гусеничный движитель выбирается для более сложных условий движения. Роботы оснащаются шагающими движителями в тех случаях, когда для робота достаточна совсем небольшая скорость передвижения, и основным требованием является высокая проходимость; характерные условия работы: завалы, скалы, курумы, большой уклон. В отдельных отраслях применяются колесно-шагающие роботы, способные передвигаться по сложному ландшафту, что характерно для шагающих машин, и развивающие высокую скорость, присущую традиционным движителям. Сочетание этих качеств в одном изделии достигается за счет усложнения и удорожания конструкции. Существует также группа псевдошагающих движителей и некоторое количество разработок, оборудованных ими. Такие движители обеспечивают роботу проходимость сравнимую с проходимостью шагающих машин и быстроходность, которая приближается к колесным аналогам. Конструкция же и управление такими движителями проще, чем колесно-шагающими: «псевдошаг» осуществляется исключительно вращением кривошипа; основное передвижение осуществляется или посредством опоры на внешний край этого кривошипа или за счет качения колеса, зафиксированного на конце кривошипа.

Среди псевдошагающих роботов возможно выделить: группу с однозвенным движителем-кривошипом (WHege, RHex [1], модель робота, разработанная Федоровым, Дьяковым и Евсеевым [2]); группу роботов с движителем-трансформером (TurboQuad, α -WaLTR, STEP [1]); роботы с «лыжей», соединяющей концы двух кривошипов (ПрОП-М [3]); роботов с колесом на конце кривошипа (исследуются в этой статье). Выделенные группы представлены на рис. 1.

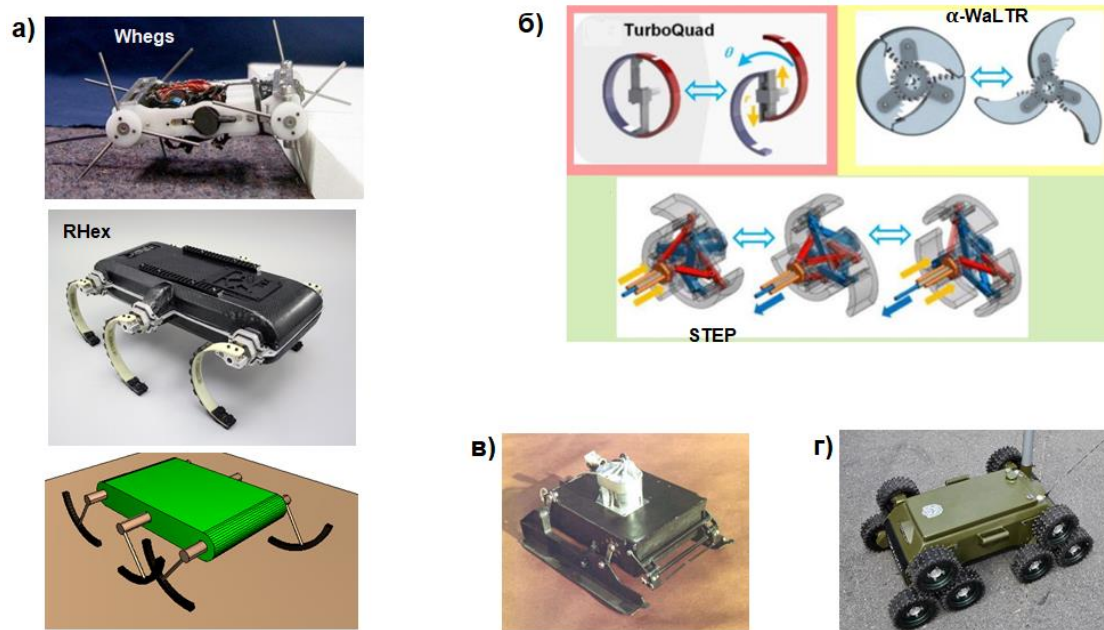


Рис. 1. Классификация псевдошагающих роботов по типу движителя:

- а – группа роботов с однозвенным движителем-кривошипом;*
- б – группа движителей-трансформеров, которыми оборудуются роботы;*
- в – группа роботов со звеном, соединяющим концы двух кривошипов;*
- г – группа роботов с колесом на конце кривошипа*

Fig. 1. Classification of pseudo-walking robots by type of propulsion unit:

- a – group of robots with a single-link crank propulsion;*
- б – group of transforming propulsion for robots;*
- в – group of robots with a link connecting the ends of two cranks;*
- г – group of robots with a wheel at the end of a crank*

Движитель с колесом на конце кривошипа, которым оснащена исследуемая модель робота, впервые разработан в 1967 г. фирмой *Lockheed* для их вездехода *Terrastar*. В 1970 г. на базе этого движителя для нужд министерства обороны США была разработана самоходная 105-мм гаубица M101 [4]. В дальнейшем транспортные комплексы подобным движителем не оснащались. Позднее были созданы мобильные роботы *MSRox* [1] Витязь-ПУК [5] и другие, оснащенные подобной ходовой системой, которая подходит для городского и сельского ландшафта. Математическое моделирование динамики безэкипажного транспортного средства, оснащенного движителем с тремя катками на конце кривошипа производилось А.С. Дьяковым, В.И. Рязанцевым и Г.Г. Анкиновичем [6]. При грамотном подборе размеров и характеристик такого движителя робот сможет преодолевать бордюры, водостоки, барьеры, лестницы, ямы, подъемы, спуски и косогоры.

Исходной точкой описываемого исследования являются предъявленные к роботу требования: заранее определенные масса робота и полезной нагрузки, перечень и размеры типовых препятствий, которые роботу необходимо преодолевать.

1. Описание конструкции робота

Наиболее важные характеристики робота представлены в табл. 1. Внешний вид динамической модели, структуры робота и движителя представлены на рис. 2. Полезная нагрузка крепится к верхней крышке корпуса робота. Привод каждого движителя осуществляется от отдельного электродвигателя, подключаемого через волновой редуктор к ведущей шестерне движителя.

Таблица 1.
Основные параметры модели робота

Table 1.
Basic parameters of the robot model

Параметр	Значение
Снаряженная масса робота, кг	120
Полная масса робота, кг	165
Ширина колеи, мм	725
Расстояние между передней и задней осями движителей, мм	525
Габаритная длина робота, мм	1000
Номинальная мощность электродвигателя, Вт	400
Максимальный момент, Н·м	1.5

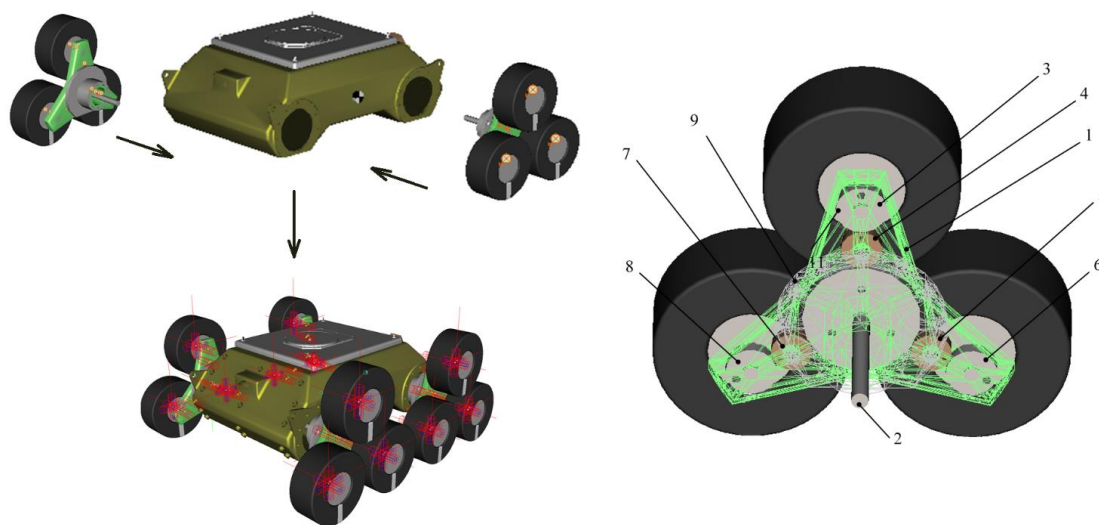


Рис. 2. Структура модели робота и модели движителя

Fig. 2. Structure of the robot model and propulsion model

Ключевой конструктивной особенностью исследуемого робота является использование трехкатковых псевдошагающих движителей. Оси катков жестко соединены с шестернями, обозначенными на рис. 2 цифрами 3, 6, 8, которые соединены через промежуточные шестерни 4, 5, 7 с ведущей шестерней и ее валом 2. Треугольное водило, на котором закреплены эти шестерни, обозначено цифрой 1, опорой является ступица 9. Движитель работает следующим образом: момент подводится к ведущей шестерне 2; через промежуточные шестерни 4, 5, 7 момент передается на шестерни 3, 6, 8, тем самым приводя во вращение катки. При движении по ровному, твердому основанию момент передается только на те катки, которые находятся в контакте с опорной поверхностью. Преодоление ступеней, высота которых больше радиуса катка, происходит за счет реализации продольных реакций при взаимодействии катка с опорной поверхностью: треугольное водило вращается вокруг остановленного препятствием катка.

2. Описание математической модели

Создание компьютерных моделей для определения эксплуатационных показателей робота проводилось в программном комплексе анализа динамики систем тел «Универсальный Механизм» [7]. Уравнения движения системы тел в нем строятся с использованием формализма Ньютона-Эйлера и имеют вид дифференциально-алгебраических уравнений. Уравнения движения систем тел в общем случае можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} M(q, t) \cdot \ddot{q} + k(q, \dot{q}, t) = Q(q, \dot{q}, t) + G^T(q) \cdot \lambda, \\ h(q, p) = 0 \end{cases}$$

где q – основные координаты объекта, p – вспомогательные координаты (локальные координаты в разрезанных шарнирах); M – матрица масс, k , Q – столбцы сил инерции и обобщенных сил соответственно; λ – множители Лагранжа, соответствующие силам реакций в разрезанных шарнирах; второе уравнение системы – алгебраические уравнения связей или условия замыкания разрезанных шарниров. Матрица G является матрицей Якоби уравнений связей после исключения из них вспомогательных координат. Анализ уравнений движения производится путем численного решения методом Парка с автоматическим контролем точности.

2.1. Математическая модель корпуса

Модель подрессоренной части состоит из невесомой геометрической модели и массово-инерционной модели, представляющей собой точечную массу, расположенную в центре масс кузова, и тензор инерции. Масса и положение центра масс подрессоренной части подбирались из условия обеспечения требуемой общей массы робота в сборе и требуемого положения центра масс робота в сборе. Моменты инерции определялись по геометрической модели кузова из условия равномерного распределения массы по внутреннему объему. Плотность материала отдельных элементов подбиралась для обеспечения требуемых масс агрегатов. Приводы моделируются в виде скалярных моментов между опорами в корпусе и ведущими шестернями движителей.

2.2. Математическая модель взаимодействия шин с опорной поверхностью

Вычисление сил и моментов, действующих на колесо со стороны опорной поверхности, производится при помощи различных математических моделей шины: для плоской твердой опорной поверхности и для неровной твердой опорной поверхности. Модель взаимодействия с плоской поверхностью реализована средствами программного комплекса «Универсальный Механизм», математически эта модель соответствует описанной В.А. Гореловым, А.И. Комиссаровым и Б.Б. Косицыным [8]. Модель взаимодействия шины с неровной поверхностью реализована в пакете *Matlab Simulink* и скомпилирована в подключаемую динамическую библиотеку, такая модель была представлена в работе В.А. Горелова и А.И. Комиссарова [9].

2.3. Регулятор продольной скорости робота

Для управления продольной скоростью движения при моделировании испытаний использовались пропорциональные регуляторы угловых скоростей выходных валов электродвигателей. Управляющий сигнал регулятора s определялся по формуле:

$$s = \min(1, \max(-1, k_{\pi} \cdot e))$$

где k_{π} – коэффициент усиления пропорционального регулятора; e – ошибка регулирования для соответствующего выходного вала. Ошибка регулирования вычислялась как разность требуемого значения угловой скорости выходного вала и текущего значения скорости соответствующего выходного вала. Требуемое значение угловой скорости выходного вала электродвигателя рассчитывалось через требуемую продольную скорость робота V_0 :

$$\omega_0 = \frac{V_0}{r} \cdot \frac{U_{\text{ред}}}{U_1 \cdot U_2}$$

где r – статический радиус колеса; $U_{\text{ред}}$ – передаточное число волнового редуктора; U_1 , U_2 – передаточные числа ступеней редуктора движителя.

3. Описание численных экспериментов

Для верификации распределения масс между элементами модели было проведено уравновешивание модели в поле гравитации на ровной горизонтальной дороге. Верификация была выполнена как для ненагруженного робота, так и для робота с полезной нагрузкой 45 кг.

3.1. Выбор передаточных чисел волновых редукторов двигателей

Подбор передаточных чисел волновых редукторов двигателей производился на основе моделирования движения робота на подъеме в 30° . Изначально передаточное отношение волновых редукторов, обеспечивающих поворот треугольного водила и смену опорных катков было выбрано исходя из обеспечения въезда робота без нагрузки на лестницу ($U_{ред1} = U_{ред2} = 50$). Виртуальные испытания заезда робота с полезной нагрузкой в подъем 30° с подобранными для лестницы передаточными числами показали, что происходит застревание робота. Для гарантированного преодоления подъема передаточное число $U_{ред2}$ для задних волновых редукторов выбраны из условия обеспечения динамического фактора робота превышающим 0,8 (это больше, чем необходимо для равномерного движения на данный подъем и обеспечивает некоторый запас по тяге):

$$U_{ред2} = \frac{0,8 \cdot r \cdot M_{робота} \cdot g \cdot U_p - M_{э.д.мах} \cdot \eta \cdot U_{ред1}}{M_{э.д.мах} \cdot \eta}$$

где $M_{робота}$ – масса робота; g – ускорение свободного падения; $U_p = 2,65$ – передаточное число внутреннего редуктора двигателя; $M_{э.д.мах}$ – максимальный момент электродвигателя; $\eta = 0,75$ – коэффициент полезного действия волнового редуктора.

После подстановки значений всех параметров получено значение $U_{ред2} = 257$.

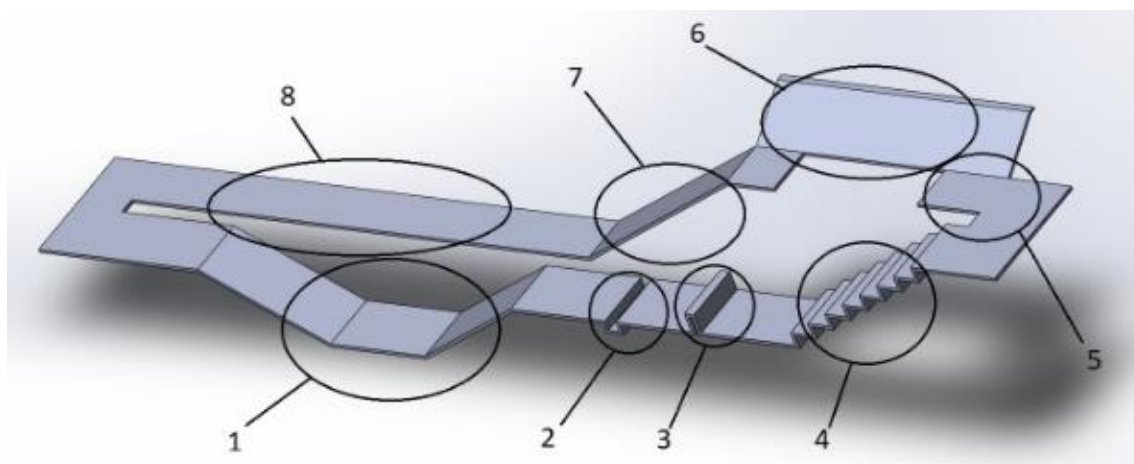


Рис. 3. Виртуальный полигон:

1 – ров (угол спуска и подъема 30°); 2 – открытый водосток; 3 – бордюр; 4 – лестница;
5 – лифтовая зона (разворот на месте); 6 – косогор 30° ; 7 – спуск 30° ;
8 – участок разгона-торможения

Fig. 3. Virtual test site:

1 – ditch (angle of descent and ascent 30°); 2 – open drain; 3 – curb; 4 – stairs;
5 – lift zone (U-turn on the spot); 6 – slope 30° ; 7 – descent 30° ; 8 – acceleration-braking section

3.2. Моделирование движения по виртуальному полигону

Комплексная оценка подвижности мобильного робота основывается на представлении ландшафта, по которому будет передвигаться робот, в виде виртуального полигона, объединяющего в себе ряд типовых препятствий, габариты которых определяются характером рельефа, и на последующем моделировании передвижения робота по этому полигону. В целях облегчения моделирования целесообразно провести виртуальные испытания по преодолению препятствий отдельно друг от друга и делать вывод о подвижности робота по совокупности этих испытаний. Также были определены нагрузки, действующие на бортовые редукторы, для всех препятствий виртуального полигона. Эти нагрузки являются определяющими на последующих этапах проектирования приводов робота и именно они определяют конструктивный облик приводов. На рис. 3 представлен виртуальный полигон, с помощью которого производится дальнейшая оценка подвижности исследуемого робота.

3.3. Движение на спуске 30°

При исследовании движения на спуск 30° робот изначально располагался на горизонтальном участке, затем начинал движение с последующим съездом на наклонный участок. При этом регуляторы стремились поддерживать продольную скорость робота на уровне 0,5 км/ч. Моделирование проводилось на поверхности с коэффициентом сцепления 0,7. Результаты моделирования (рис. 4) свидетельствуют о том, что на спуске 30° происходит разгон робота, поскольку его электродвигатели не обеспечивают компенсации скатывающей составляющей силы тяжести. Максимальным углом спуска, на котором обеспечивается поддержание равномерной скорости робота за счет торможения электродвигателями является угол 20°.

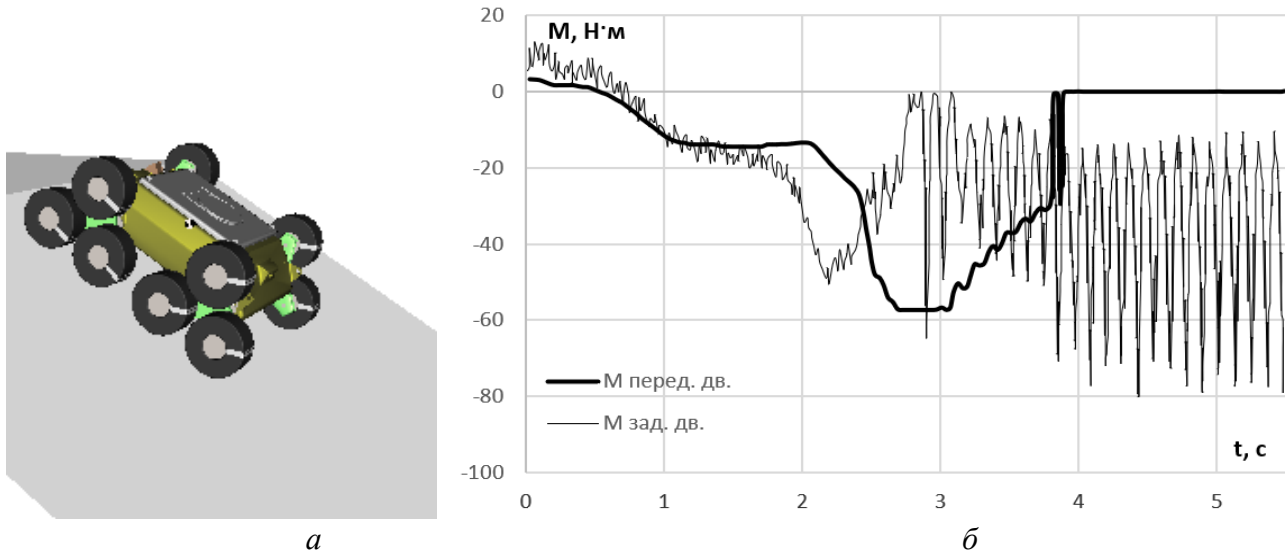


Рис. 4. Движение на спуске 30°:

*а – моделирование спуска;
б – моменты на входе в бортовые редукторы движителей левого борта робота*

Fig. 4. Movement downhill at 30°:

*а – robot descending simulation;
б – moments at the input to the onboard gearboxes of the propulsions of the robot's left side*

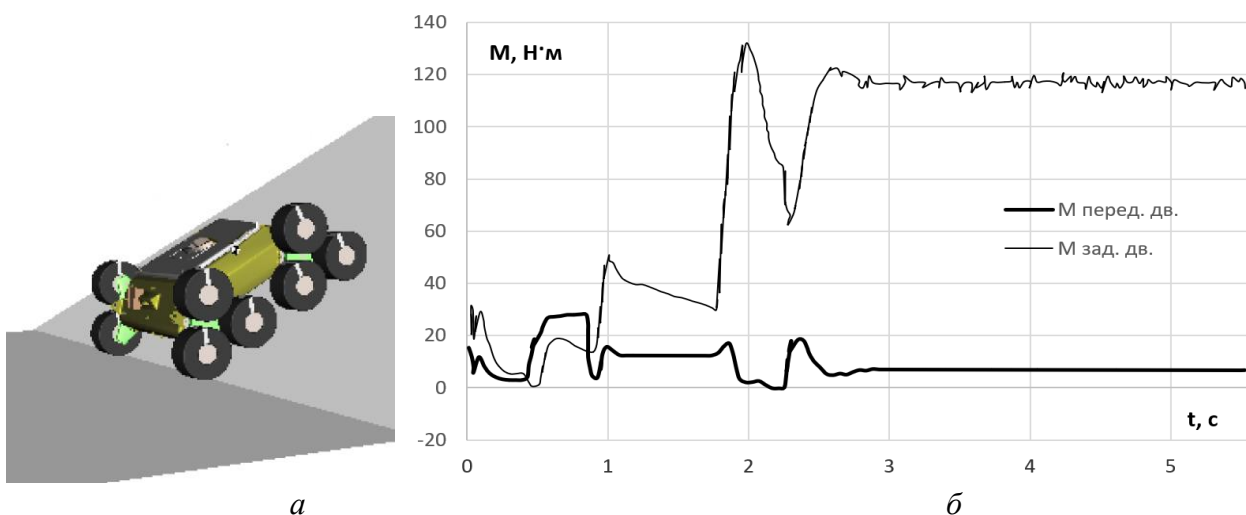


Рис. 5. Движение на подъеме 30°:

*а – моделирование подъема;
б – моменты на входе в бортовые редукторы движителей левого борта робота*

Fig. 5. Movement uphill 30°:

*а – robot climbing simulation;
б – moments at the input to the onboard gearboxes of the propulsions of the robot's left side*

3.4. Преодоление подъема 30°

Робот изначально располагался на горизонтальном участке, а затем начиналось его движение с последующим въездом на наклонный участок (рис. 5). При этом регуляторы стремились поддерживать продольную скорость робота на уровне 2 км/ч. Моделирование проводилось на поверхности с коэффициентом сцепления 0,7. Моделирование показало, что робот с полезной нагрузкой способен преодолеть подъем 30° при принятых параметрах трансмиссии.

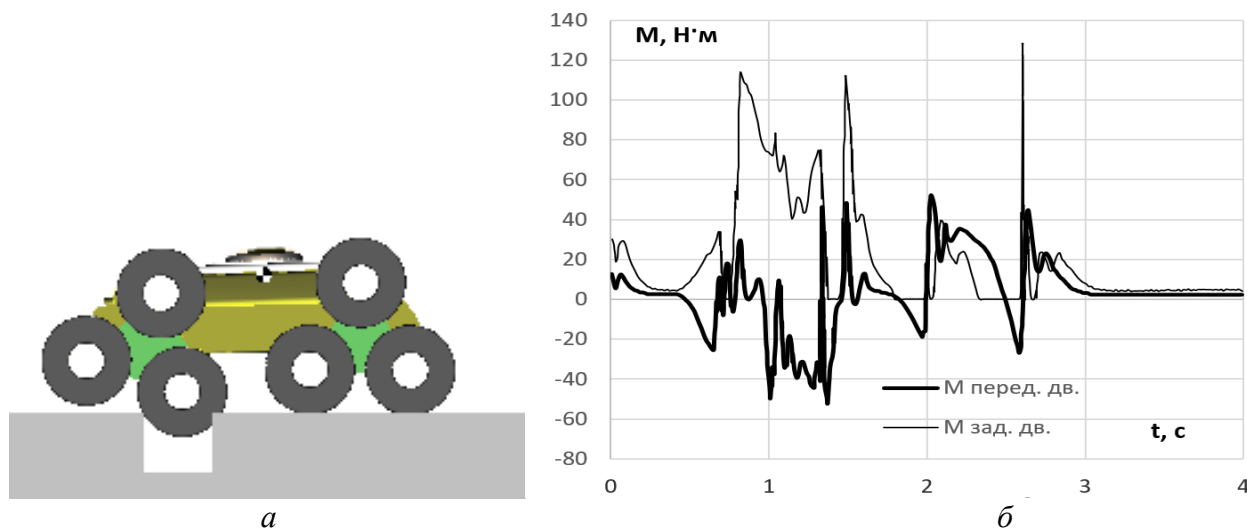


Рис. 6. Преодоление водостока:

а – преодоление водостока задними движителями;

б – моменты на входе в бортовые редукторы движителей левого борта робота

Fig. 6. Overcoming the drain:

a – simulation of overcoming the drain with rear propulsions;

б – moments at the input to the onboard gearboxes of the propulsions of the robot's left side

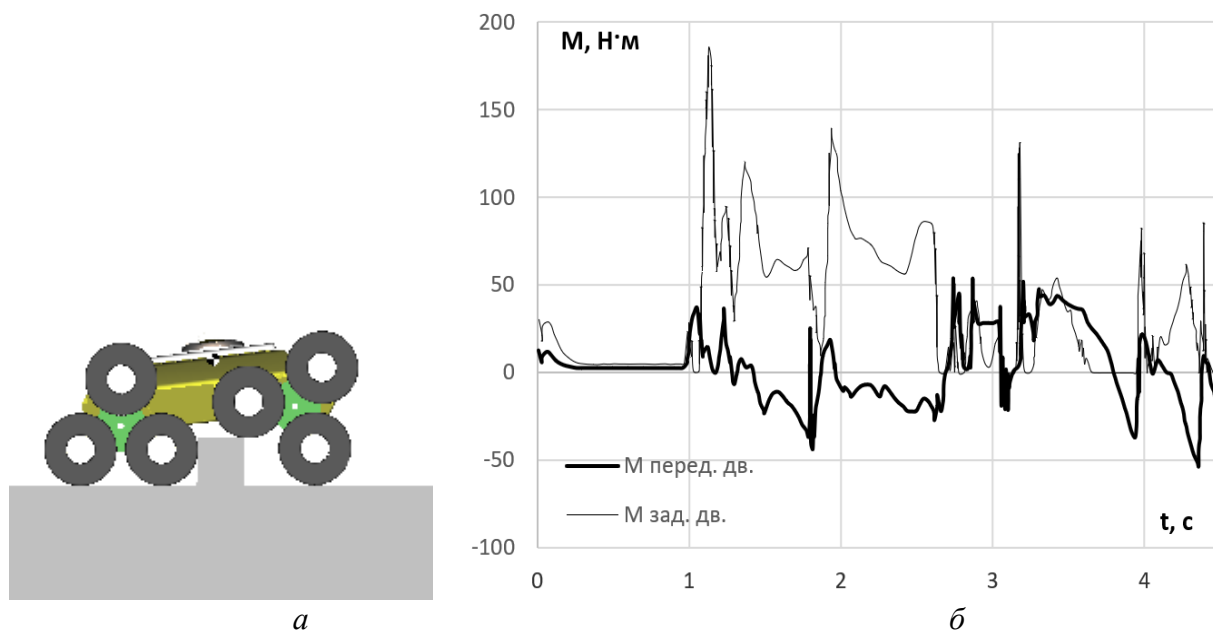


Рис. 7. Преодоление бордюра:

а – моделирование преодоления бордюра;

б – моменты на входе в бортовые редукторы движителей левого борта робота

Fig. 7. Overcoming the curb:

a – curb overcoming simulation;

б – moments at the input to the onboard gearboxes of the propulsions of the robot's left side

3.5. Преодоление водостока

При моделировании движения через водосток шириной 175 мм и высотой 150 мм (рис. 6) поддерживались угловые скорости входных валов редукторов двигателей робота для обеспечения постоянной продольной скорости центра масс робота 2 км/ч.

3.6. Преодоление бордюра

При моделировании движения через бордюр высотой 150 мм и шириной 150 мм (рис. 7) поддерживались угловые скорости входных валов редукторов двигателей робота для обеспечения постоянной продольной скорости центра масс робота 2 км/ч.

3.7. Преодоление лестницы

При моделировании робот изначально располагался на горизонтальном участке, затем начинал движение со скоростью 2 км/ч и производил въезд на неровность (рис. 8). высота ступени которой равна 200 мм и ширина ступени – 400 мм. В процессе подъема регуляторы стремились поддерживать скорость робота. Моделирование проводилось на поверхности с коэффициентом сцепления 0,7.

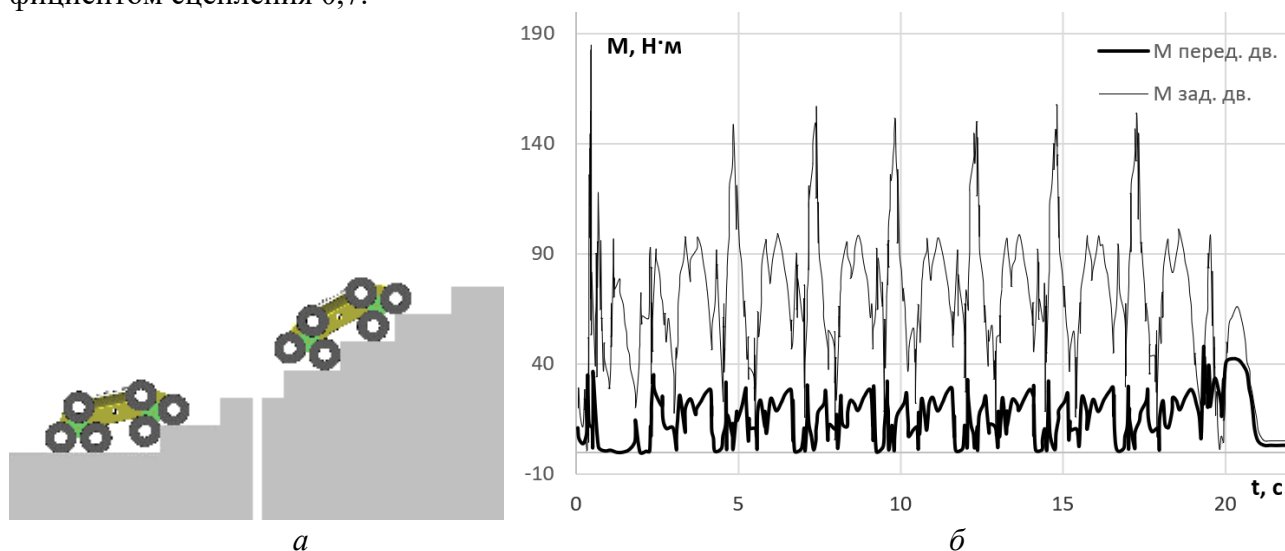


Рис. 8. Преодоление лестницы:

а – моделирование подъема по лестнице;

б – моменты на входе в бортовые редукторы двигателей левого борта робота

Fig. 8. Overcoming the stairs:

a – stair climbing simulation;

б – moments at the input to the onboard gearboxes of the propulsions of the robot's left side

3.8. Разворот на месте

Моделирование разворота проводилось на ровной горизонтальной поверхности с коэффициентом сцепления 0,7. В процессе расчета регуляторы стремились поддерживать постоянные угловые скорости на входе в редукторы двигателей, соответствующие продольной скорости 2 км/ч. На правом и левом бортах угловые скорости имели противоположные направления. Робот способен выполнять разворот на месте вокруг геометрического центра верхней проекции, на рис. 9 показаны траектории его деталей при повороте.

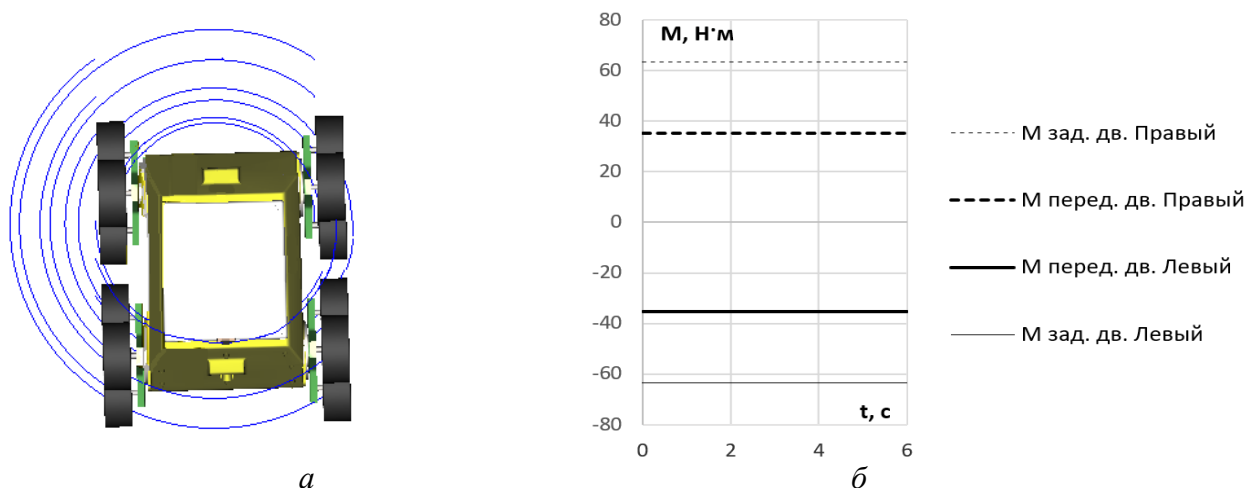


Рис. 9. Разворот на месте:
a – траектории деталей робота при развороте;
б – моменты на входе в бортовые редукторы движителей

Fig. 9. U-turn on the spot:
a – trajectories of robot parts during rotation;
б – moments at the input to the onboard gearboxes of the propulsions

3.9. Движение на косогоре 30°

Робот изначально располагался на наклонном участке, а затем начиналось его движение с начальной скоростью $V_0 = 2$ км/ч (рис. 10) с поддержанием продольной скорости без регулирования курса.

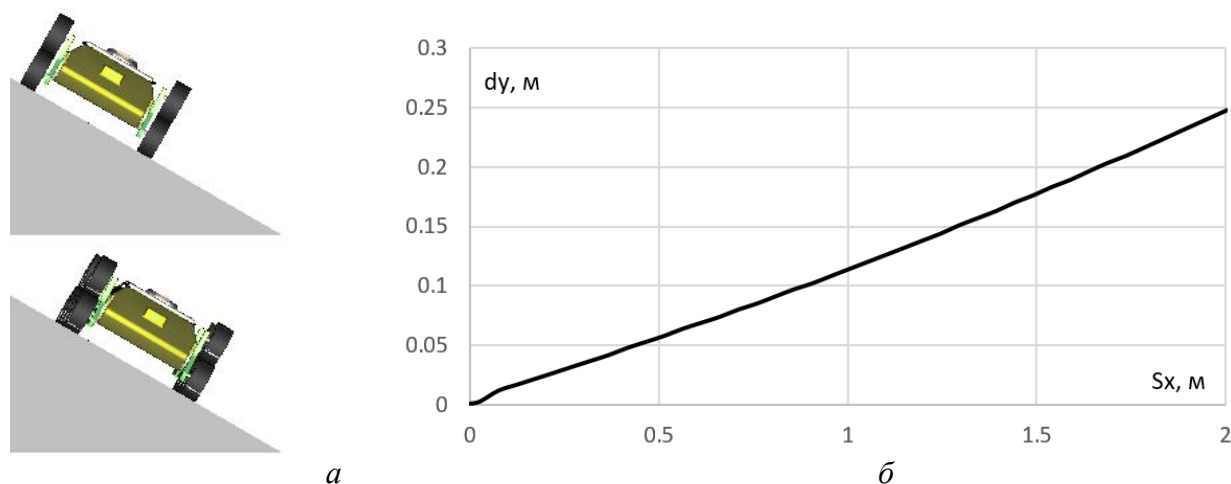


Рис. 10. Движение на косогоре:
a – моделирование движения на косогоре;
б – зависимость бокового смещения робота от пройденного им пути

Fig. 10. Movement on a hillside:
a – simulation of movement on a slope;
б – dependence of the lateral displacement of the robot on the path it has traveled

Проведенные испытания свидетельствуют, что робот смещает в боковом направлении к низу косогора. Величина бокового смещения равна 12 % от пройденного по косогору расстояния (рис. 10). Данное отклонение вызвано неравномерностью распределения нагрузок между движителями и может быть устранено за счет введения регулирования курса робота. На основании результатов моделирования можно сделать вывод о способности робота с полезной нагрузкой двигаться по косогору 30°.

3.10. Разгон-торможение

На данном горизонтальном участке полигона производился разгон робота с места до максимальной скорости, а затем осуществлялось резкое торможение до полной остановки (рис. 11а). При этом управляющие сигналы электродвигателей формировались по функции (рис. 11с) без обратной связи по скорости вала редуктора.

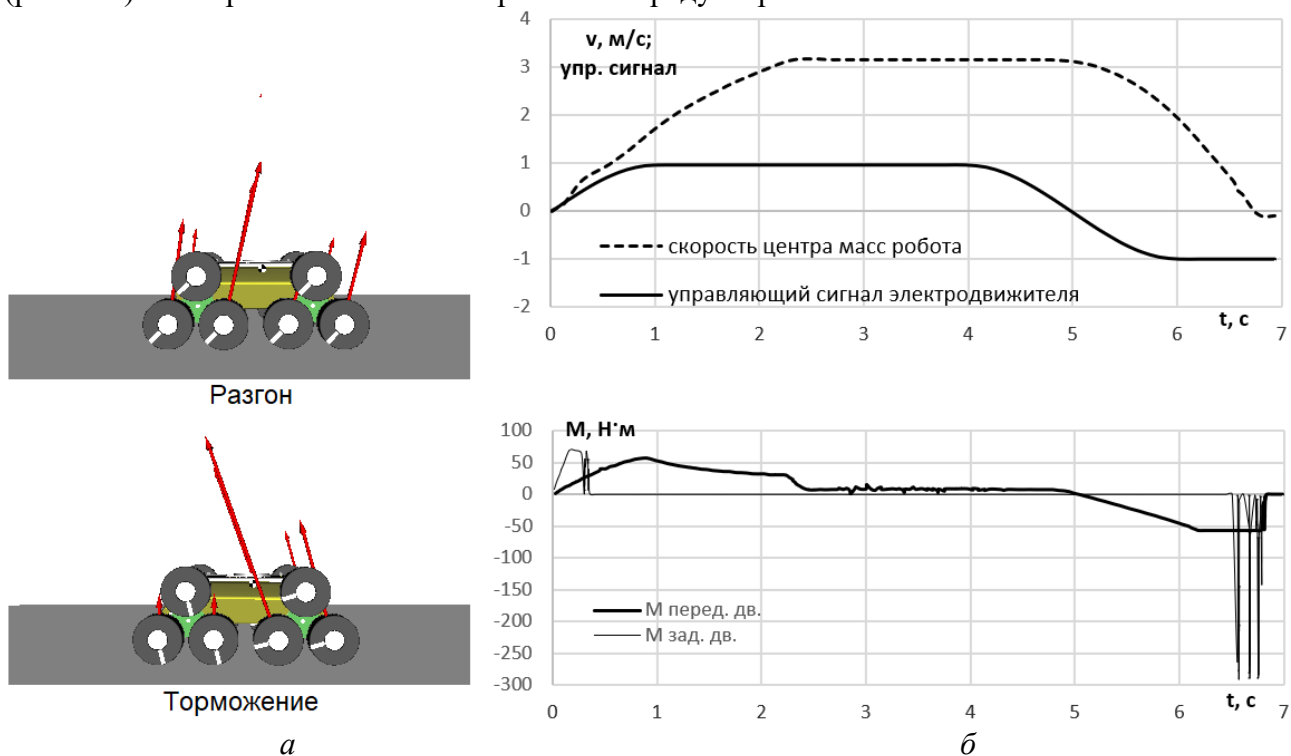


Рис. 11. Разгон-торможение:

a – векторы сил, действующие на шестерни колес при моделировании;
б – изменение скорости робота и моментов на входе в бортовые редукторы движителей при изменении закона управления

Fig. 11. Acceleration-braking:

a – vectors of forces acting on the gear wheels during simulation;
б – change in robot speed and moments at the input to the onboard gearboxes of the propulsions when changing the control law

В результате моделирования при выбранном законе управления электродвигателями установлено следующее:

- 1) разгон до максимальной скорости обеспечивается за 2,4 с;
- 2) величина максимальной скорости составила 3,157 м/с (11.37 км/ч);
- 3) полная остановка с максимальной скорости осуществляется за 2 с.

Заключение

Изложен метод проверки соответствия подвижности мобильного робота заданным требованиям на этапе проектирования. Зачастую к мобильному роботу выдвигается требование повышенной проходимости, вследствие чего использование нетрадиционного движителя становится необходимостью. В таких условиях проектирование ведется при отсутствии уже разработанных методик и ходовых макетов. Описанный в статье алгоритм может использоваться не только для оценки ходовых качеств конкретного движителя на конкретном виртуальном полигоне, но и для обоснованного выбора наиболее подходящего движителя для конкретной местности.

Для псевдошагающего робота с трехкатковым двигателем был проведен выбор оптимальных передаточных чисел приводов. При моделировании преодоления препятствий моменты на входе в задние бортовые редукторы не превышали 200 Н·м, в передние – 150 Н·м. При моделировании резкого разгона-торможения моменты на входе в задние бортовые редукторы не превышали 300 Н·м, в передние – 75 Н·м. Также наблюдается отклонение робота от курса при движении по косоугору. Вышеописанные явления являются прогнозируемыми – они вызваны разницей передаточных отношений передних и задних приводов. Результаты проведенных виртуальных испытаний свидетельствуют о соответствии подвижности робота заданному уровню и могут быть использованы в качестве расчетных нагрузок при дальнейшем проектировании.

Библиографический список

1. **Seo, T.** Stair-climbing Robots: A review on mechanism, sensing, and performance evaluation / T. Seo, S. Ryu, J.H. Won et al. // IEEE Access. 2023. Vol. 11. Pp. 60539-60561. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3286871.
2. **Дьяков, А.С.** Разработка и исследование модели псевдошагающего робота / А.С. Дьяков, К.Б. Евсеев, Д.С. Федоров // Известия МГТУ «МАМИ». 2023. Т. 17, № 4. С. х-у. DOI: 10.17816/2074-0530-623720.
3. **Кемурджиан, А.Л.** Планетоходы / А.Л. Кемурджиан. – М.: Машиностроение, 1993. – 400 с.
4. **Кочнев, Е.Д.** Армейские автомобили НАТО 1946-1991 / Е.Д. Кочнев. – М.: Яуза; Эксмо, 2012. – 603 с.
5. **Зубов, В.Н.** Мобильные вооруженные роботы разработки НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана // Инновационная наука. 2015. № 11-2. С. 59-61.
6. **Дьяков, А.С.** Решение задач профильной проходимости робототехнического комплекса с колесношагающим двигателем с помощью математического моделирования / А.С. Дьяков, В.И. Рязанцев, Г.Г. Анкинович // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 12. С. 291-307. DOI: 10.7463/1214.0747961.
7. Универсальный механизм 9. Руководство пользователя [Электронный ресурс] URL: <http://www.umlabor.ru/pages/index.php?id=3> (дата обращения: 15.02.2024)
8. **Горелов, В.А.** Исследование движения автомобиля в программном комплексе автоматизированного моделирования динамики систем тел / В.А. Горелов, А.И. Комиссаров, Б.Б. Косицын // Журнал автомобильных инженеров. 2016. № 1(96). С. 18-23.
9. **Горелов, В.А.** Математическая модель взаимодействия шины с твердыми неровностями опорной поверхности для случая прямолинейного качения колеса / В.А. Горелов, А.И. Комиссаров // ПРОМ-ИНЖИНИРИНГ. Труды II Междунар. науч.-техн. конф. Южно-Уральского государственного университета. – Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2016. С. 129-133.

*Дата поступления
в редакцию: 22.03.2024*

*Дата принятия
к публикации: 23.10.2024*

УДК 629.3

EDN: TCGMPA

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ОЦЕНКУ ВОДИТЕЛЕМ ДОРОЖНОЙ ОБСТАНОВКИ

А.И. Марковнина

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

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

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

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

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

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

Рассматривается влияние внешних и внутренних факторов на водителя транспортно-технологической машины (ТТМ), а также способность принимать рациональные решения при выборе пути и режиме движения. Проанализирована зависимость поведения от внешних факторов окружающей среды и личностных характеристик водителя. Снижение видимости, и, как следствие, нарушение зрительного восприятия водителем дорожной обстановки, происходят по различным причинам. В условиях сниженной видимости снижается также проходимость машины; от опытности и обученности водителя зависит его приспособляемость к любым дорожным или метеорологическим условиям. При вождении в трудных дорожных условиях, в том числе, по бездорожью, решающее значение будет иметь критическое мышление водителя в процессе преодоления препятствий. Проанализирована зависимость скорости движения от условий обзорности и опытности водителя, сделан вывод о взаимосвязи влияния внешней информации и психофизической готовности водителя к ее анализу.

Ключевые слова: видимость, принятие решений, рельеф, препятствия, скорость реакции.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Марковнина, А.И. Влияние различных факторов на оценку водителем дорожной обстановки / А.И. Марковнина, А.Г. Капустин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 4. С. 94-102. EDN: TCGMPA

INFLUENCE OF VARIOUS FACTORS ON THE DRIVER'S ASSESSMENT OF ROAD CONDITION

A.I. Markovnina

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

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

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

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

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

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

Abstract. The article examines the influence of external and internal factors on the driver of a transport and technological vehicle and his ability to make rational decisions when choosing a route and driving mode. The dependence of behavior on external environmental factors and personal characteristics of the driver is analyzed. The study of factors was carried out using specific examples. A decrease in visibility, and as a result, a violation of the driver's visual perception of the road situation, occurs for various reasons and depends on a number of factors. In conditions of reduced visibility, the vehicle's maneuverability also decreases; the driver's adaptability to any road or meteorological conditions depends on the experience and training of the driver. The driver's persistence in overcoming obstacles and critical thinking will be crucial when driving in difficult road conditions, including off-road, to ensure that the movement remains stable and safe. The relationships between the influence of external information and the psychological and psychophysical readiness of the driver to analyze it are revealed.

Key words: visibility, decision making, terrain, obstacles, reaction speed.

FOR CITATION: A.I. Markovkina, A.G. Kapustin, V.S. Makarov Influence of various factors on the driver's assessment of road condition. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 4. Pp. 94-102. EDN: TCGMPA

Транспортно-технологические машины используются в различных условиях, среди которых можно выделить две основные группы: эксплуатация с движением по дорогам общего пользования с различными типами покрытий и эксплуатация в условиях бездорожья. Повышенное внимание водителя требуется на потенциально опасных участках, к которым можно отнести следующие виды. На первых резко снижается скорость движения в связи с недостаточной/ограниченной видимостью. У вторых элементы дороги соответствуют низким скоростям движения (например, кривые малого радиуса, сужение дороги, скользкие обочины). Третий – низины, овраги, в которых чаще проявляются природные явления, снижающие видимость или снижающие сцепные свойства покрытия дороги (туман, гололед). Четвертый – затяжные прямые участки дорог без разнообразия ориентиров вдоль дороги, из-за чего водитель может непроизвольно превысить безопасную скорость движения. Пятый – участки с ограниченной видимостью и резким изменением направления дороги. Шестой – участки пересечения большого количества транспортных потоков. Седьмой – дороги, на которых увеличена вероятность внезапного появления на дороге пешехода. Восьмой – участки с очень короткой полосой отвода, отсутствие обочин, например, участки с близким расположением к дороге лесного массива [1]. На подобных участках при большой интенсивности движения и больших скоростях повышается вероятность наезда на другие транспортные средства, опрокидывания или съезда дороги.

Во время движения по бездорожью отпадает необходимость водителя следить за транспортными и пешеходными потоками вокруг машины, но при этом на маршруте следования могут встречаться другие препятствия – специфическая форма рельефа и наличие сторонних объектов, которые препятствуют стабильному безопасному движению с установившейся скоростью [2]. Рельеф и дискретные препятствия (рис. 1) либо сами по себе являются непреодолимыми, либо снижают видимость других препятствий.



а)



б)

Рис. 1. Примеры препятствий, снижающие видимость:

а – сложный рельеф местности (холм); б – дискретные препятствия (куст)

Fig. 1. Examples of obstacles that reduce visibility:

a – difficult terrain (hill); b – discrete obstacles (bush)

Факторами, оказывающими значительное влияние на видимость, являются также погодные явления. На рис. 2 и 3 представлены схемы с описанием видов препятствий и явлений, влияющих на ограниченность или недостаточность видимости. При бездорожье основным фактором является распределение неровных поверхностей на маршруте движения [3, 4].



Рис. 2. Снижение видимости и ограничение видимости

Fig. 2. Reduced visibility and limited visibility

Только при наличии достаточной видимости водитель способен поддерживать стабильное и безопасное движение машины как по дорогам, так и в ухудшенных дорожных условиях. На дорогах общего пользования достаточная видимость необходима для контроля действий других водителей, что особенно важно во время опережения или обгона для предотвращения аварий. Недостаточная видимость в продольном профиле в гораздо большей степени влияет на количество аварий, чем недостаточная видимость в плане. Большегрузная техника ограничивает видимость преимущественно на загородных трассах, в городе чаще всего на видимость влияют конструкции дорог, развязок, наличие тоннелей и иных объектов, создающих стесненные условия. Данная проблема может быть решена грамотным проектированием улиц и развязок.

Исходя из расчетов [5], выявлено, что для разных скоростей должна обеспечиваться достаточная видимость на весьма продолжительных прямых участках дорог. При движении со скоростью 100 км/ч водитель должен видеть не менее 50 % общей протяженности участка, в том числе – не менее, чем 650 м впереди. При движении со скоростью 80 км/ч водитель должен четко видеть не менее 35 % протяженности участка, но не менее 525 м перед автомобилем. Данное условие гораздо сложнее выполнить, если машина подъезжает к повороту.

Особенно критична видимость на участке перед резким поворотом, около которого располагаются густые зеленые насаждения, высокие заборы или строения. При скорости движения 60 км/ч он должен видеть не менее 25 % участка дороги, видимость впереди должна быть не менее 400 м [5].

В городских условиях снижение скорости проще организовать путем обычного ограничения в 60 км/ч. За городом заблаговременное снижение возможно организовать заблаговременной установкой знаков, ограничивающих скорость и знаков, предупреждающих об опасности. Однако водители, которые изначально нарушают правила дорожного движения, на высоких скоростях не смогут заметить знаки. Их видимость также значительно снижается в темное время суток. Эта проблема решается установкой модернизированных знаков со светоотражающими элементами или подсветкой, что пока реализовано не на всех дорогах. На рис. 4 даны графики зависимости количества ДТП ($K_{ав}$) от расстояния видимости (S , м), по которым видно, что со снижением видимости вероятность ДТП возрастает.

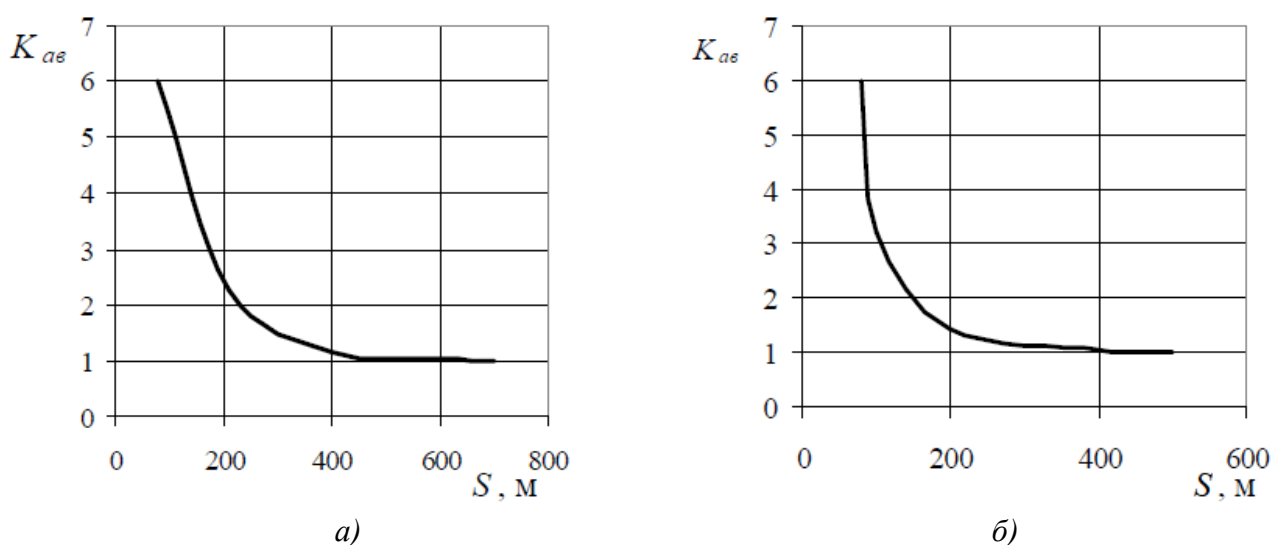


Рис. 3. Зависимость относительного количества ДТП от расстояния видимости:

а – в плане; б – в продольном профиле

Fig. 3. Dependence of the relative number of accidents on visibility distance:

a – in plan; b – in a longitudinal profile

На бездорожье знаки не устанавливаются, и выбор скоростного режима полностью зависит от оценки водителем окружающей обстановки. В светлое время суток и при благоприятных погодных условиях водитель ясно видит обстановку и, соответственно, может полностью контролировать маршрут и скорость движения. Ситуация может ухудшиться из-за недостаточной освещенности и недостаточной видимости. В этом случае водитель может правильно оценить обстановку, только если дополнительно изучал аналогичную местность или имел опыт передвижения по аналогичным участкам: тогда он, по крайней мере, имеет общее представление об особенностях рельефа и физико-механических свойствах материала полотна пути, по которому движется. Но дискретные препятствия не являются такими же стабильными, как климат или грунт в данной местности. Упавшие деревья, небольшие промоины, ямы и выступы, скрытые за другими объектами, за тенью от этих объектов или под водой, – все это может значительно снизить скорость или повредить какие-либо детали ходовой части, т.е. полностью снизить проходимость машины и возможность поддерживать дальнейшее стабильное движение.

Во время движения по бездорожью наиболее опасны участки, на которых машина может полностью потерять возможность передвижения в связи с застреванием, буксованием или выходом из строя каких-либо систем и агрегатов.

Еще на этапе проектирования транспортно-технологических машин необходимо предусматривать улучшенную обзорность для техники, эксплуатирующейся в ухудшенных дорожных условиях. Обзорность определяет степень восприятия водителем окружающего пространства, соответственно, больше обзорность, больше количество полученной водителем информации. Обзорность – это один из критериев оценки любой ТТМ, которое определяет объективную возможность водителя свободно видеть и оценивать весь маршрут следования и объекты, которые могут помешать безопасному движению [6]. На данное свойство влияют конструкционные параметры кузова автомобиля, в том числе конфигурация окон и зеркал и их количество. От скорости удаления загрязнений и лишней влаги с лобового и заднего стекол зависит количество информации, которую водитель не получит, пока автомобиль движется, а обстановка все так же меняется. Конструкция стекол и зеркал должна также предотвращать налипание снега. Для возникновения аварийной ситуации достаточно одной секунды, в то время как на скорость в 60 км/ч за секунду автомобиль проезжает несколько метров. Во время движения водитель постоянно получает информацию, ему необходимо уметь разделять основные факторы (связаны и непосредственно влияют на прямолинейное и предсказуемое движение автомобиля) и дополнительные (непосредственного влияния эти параметры не оказывают ни на машину, ни на водителя, а только являются источником дополнительной информации). Навык выделения наиболее важной информации развивается только на практике, соответственно, любое обучение должно включать езду по сложному рельефу, в том числе и на специальных полигонах.

Водитель для обеспечения стабильного и безопасного движения с оптимальным уровнем адаптивности к изменяющимся условиям должен обладать соответствующим уровнем некоторых психофизиологических характеристик. Окружающую среду водитель воспринимает при помощи ощущения и восприятие. Ощущение – отражение в сознании человека отдельных свойств предметов и явлений, в значительной степени зависит от состояния здоровья. Восприятие – способность не только ощутить, заметить что-либо, но и осознать это воздействие, мысленно определить источник и особенности ощущения. После того, как водитель воспринял какую-либо информацию, он может или сосредоточить на ней внимание, или переключиться на новый объект. Внимательность – качество личности, заключающееся в способности сосредоточить внимание на определенном объекте, концентрироваться на этом объекте, несмотря на отвлекающие факторы, сделать полный внешний анализ объекта и оценить ситуацию в целом. Чем выше скорость машины, тем на меньшем количестве объектов водитель способен концентрировать внимание, поэтому совместно с внимательностью у него должен быть развит навык быстро переключать внимание. Наблюдательность и внимательность крайне важны для предотвращения аварий или уменьшения негативных последствий.

Если некое явление или объект смогли привлечь достаточно сильное внимание водителя, следом за этим наступает его реакция – психомоторная, волевая, эмоциональная. Психомоторные реакции напрямую зависят от скорости реакции водителя, его способности переключать внимание между различными объектами, анализировать изменяющуюся обстановку и четко координировать действия. Эмоционально-волевая реакция – стойкость, высокий уровень самообладания, неподверженности панике, настойчивость при выполнении действий по избеганию или выхода из критической ситуации. В соответствии с особенностями психики, водитель или поддается эмоциям и теряет сосредоточенность на объекте и на поиске рационального решения, или сохраняет стойкость воли и предпринимает какие-либо действия, чтобы предотвратить (в специфике автомобильного транспорта) ДТП или хотя бы уменьшить последствия ДТП, если его все же невозможно предотвратить.

Безопасность движения автомобиля обеспечивает скорость реакции водителя. Если скорость реакции водителя снижается, то в разы увеличивается вероятность возникновения ДТП, поскольку водитель не успевает вовремя снизить скорость или изменить направление движения. Реакция водителя – закономерный ответ организма на изменение дорожных условий. Стандартную реакцию человека на внешний раздражитель можно разделить на три фа-

зы: оценка новой обстановки, принятия наиболее подходящего решения и выполнение необходимых действий. Время реакции водителя при управлении автомобилем отсчитывается от момента обнаружения опасности до начала совершения действий, направленных на ее устранение [8]. Время реакции зависит от ее вида – сложной, простой и в опасной зоне, как правило находится в пределах 0,8-2 с. В иных расчетах может применяться другое значение, зависящая не только от внутреннего состояния водителя, но и учитывающая как установленные системы помощи водителю, так и конструкционные особенности рулевой и тормозной систем. Внутреннее состояние водителя также зависит от многих факторов: усталость из-за несоблюдения режима труда и отдыха, неудовлетворительное состояние здоровья, стрессы и негативное влияние условий труда (шум, вибрации во время движения). Для адекватной реакции на опасность и предотвращения аварии, водитель воспринимает, оценивает обстановку и принимает решение о последующих действиях: остановка, маневрирование, ускорение. За время оценивания обстановки водителю необходимо просчитать варианты развития событий и выбрать наиболее безопасный. Данная оценка и выбор способа действия являются сложной реакцией. Время реакции на неожиданно возникшее препятствие в условиях недостаточной видимости в среднем увеличивается на 0,6-0,7 с, что связано с затруднением в распознавании. Вероятность принятия адекватного решения зависит не только от того, сколько информации может дойти до водителя из окружающей среды, но и от того, сколько этой информации водитель может воспринять. Во-первых, восприятие зависит от внутреннего состояния водителя, его сосредоточенности, готовности воспринимать информацию извне, здоровья – физического и психического. Во-вторых, на восприятие влияет отсутствие или наличие мешающих органам чувств объектов, шумов или вибраций машины, т.е., техническое состояние машины. После восприятия информации начинается процесс мышления – переработка поступившей информации и принятие решения. От правильности прогноза зависит правильность предполагаемых действий, которые водитель намерен совершить для изменения дорожной ситуации или выхода из нее с наименьшими негативными последствиями. Более опытный и обученный водитель имеет больше шансов принять правильное адекватное решение, а более стойкий водитель легче приспосабливается к новым условиям. Изменчивость дорожной обстановки существенно влияет на водителя, повышая уровень усталости, поэтому от водителя требуется хорошая выносливость и натренированность для своевременного принятия решений.

На количество информации, поступающей извне, значительно влияет поле зрения водителя, которое, в первую очередь, зависит от скорости движения. Так как на бездорожье скорость обычно не превышает 60 км/ч, данный фактор значим на дорогах общего пользования. На рис. 4 наглядна прямая зависимость сужения поля зрения водителя при увеличении скорости. Увеличение скорости сужает поле зрения и уменьшает количество информации, воспринимаемой водителем во время движения.

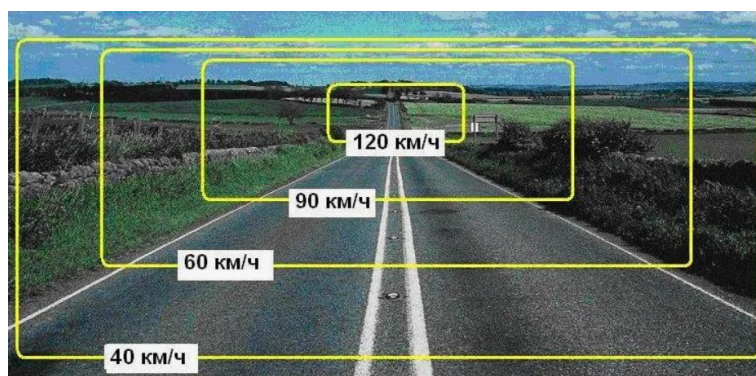


Рис. 4. Сужение поля зрения водителя в зависимости от скорости движения

Fig. 4. Narrowing of the driver's field of vision depending on driving speed

Для безопасного движения по дороге следует: обеспечить достаточную видимость; избегать резкого изменения кривых в плане или, наоборот, протяженных прямых участков; организовать своевременное и полное информирование водителя с помощью знаков и разметки; использовать материалы, повышающие заметность информирующих или опасных объектов. Примеры приведены на рис. 5. Только при наличии достаточного количества информации возможно обеспечить стабильное и безопасное движение.

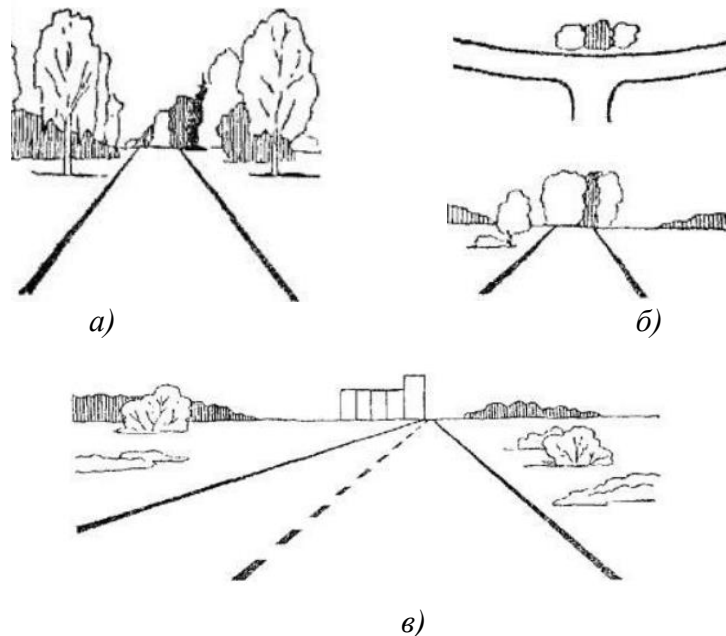


Рис. 5. Повышение информативности дороги:
а, б – использование деревьев для подчеркивания направления дороги;
в – ориентирование длинных прямых участков дороги на возвышающиеся предметы

Fig. 5. Increasing the information content of the road:
a, b – using trees to emphasize the direction of the road;
c – orienting long straight sections of road towards towering objects

Для безопасного движения по бездорожью необходимы: полный анализ маршрута, разработка наиболее безопасных, предсказуемых маршрутов; отслеживание метеорологических условий. Один из методов обеспечения безопасности – построение карт подвижности [9-12], один из примеров которых представлен на рис. 7. Распределение по областям следующее: Б1, В3, Г3, Б4, В4, Г4 – движение возможно с максимальной скоростью; А2, В2 – скорость составляет 50-75 % от максимально возможной; А1, Б2 – скорость составляет от 25 до 50 %; В1, Г1, Г2, А3, Б3, А4 – скорость составит до 25 % от максимально возможной, встречаются непроходимые препятствия, возможна полная потеря подвижности. Улучшить данные показатели может привлечение более опытного водителя, который может использовать особенности рельефа для повышения проходимости. Повысить проходимость автомобиля способны также дополнительные устройства и оборудование: лебедка, грунтозацепы различной конфигурации, уширители, устройства для снижения или повышения давления в шинах для лучшей адаптации к материалу полотна пути.

Расчет показателя подвижности учитывает три составляющие – технические характеристики машины, условия движения: рельеф местности и физико-механические свойства грунта и режим движения, выбор которого полностью определяется параметрами видимости препятствий и опытом водителя. Использование дополнительных устройств повышения проходимости в расчете показывали повышение скорости преодоления участка не более, чем на 4-7 %, а увеличение вероятности своевременно увидеть препятствие на участке со сложным рельефом повышало скорость на 25-30 %. За счет улучшения навыков водителя повы-

шение скорости составило 5-10 %, что говорит о том, что опыт без достаточного количества информации неэффективен. На безопасность движения может повлиять и конструкция машины: изменение конструкции для обеспечения максимальной видимости с водительского сидения; оборудование дополнительными устройствами для увеличения количества получаемой извне информации, например, радары и лидары. Безопасность движения со стороны водителя обеспечивают: углубленное изучение методик вождения в ухудшенных дорожных условиях; психологическая подготовка водителей; строгий контроль физического состояния водителей. Учитывая важность психологической составляющей безопасности движения, важна его правильная подготовка. Для водителей разработаны специальные тесты и методики оценки психофизиологического состояния: тесты на концентрацию, внимательность, комплекс корректурной пробы Бурдона [13]. Существуют методики тренировок психики, навыков, выработки определенных и однозначных реакций на внешние раздражители, аутогенные тренировки, направленные на быстрое снятие напряжения от уже прошедшей ситуации для своевременного ответа на новые раздражители [14]. Цель аутогенных тренировок – не только натренировать сознание водителя на способность быстро переключаться с задачи на задачу, но и уравновесить психосоматические реакции – быстрое снижение давления и пульса после выброса адреналина, менее эмоциональное реагирование на резкое изменение внешних условий.

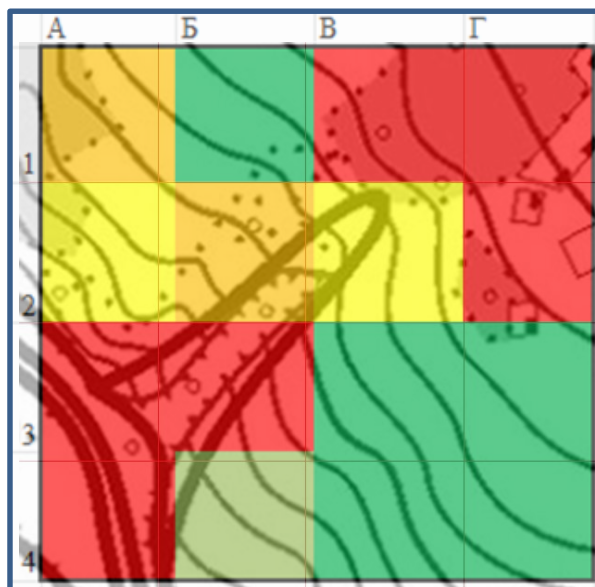


Рис. 6. Использование карты подвижности

(топографическая карта с цветовым делением по возможной скорости движения, зеленый цвет – скорость близка к 100 % от максимально возможной, красный – движение невозможно)

Fig. 6. Using a mobility map

(topographic map with color division by possible speed of movement, green color – speed is close to 100 % of the maximum possible, red – movement is impossible)

Выводы

Проанализированы внутренние и внешние факторы, оказывающие влияние на возможность своевременной, полной и адекватной оценки водителем дорожной обстановки. Для обеспечения стабильного и безопасного движения с максимальным уровнем адаптивности к изменяющимся условиям должны соблюдаться следующие условия. Во-первых – полная достоверная информация об окружающей обстановке, получение которой достигается дополнительными устройствами внутри машины или дополнительного информирования извне (знаки/разметка) или заблаговременного подробного изучения маршрута движения. Во-

вторых – возможность водителя воспринять информацию, быстро ее проанализировать и в полном объеме и принять рациональное решение. На принятие решения, в свою очередь, влияют уровень подготовки водителя, состояние его здоровья и способность четко мыслить в любой непредвиденной ситуации. За счет увеличения обзорности ТТМ и улучшения навыков вождения в трудных дорожных условиях можно повысить безопасную скорость движения на 25-30 %.

Биографический список

1. ОДМ 218.4.005-2010 Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200084056> (дата обращения 15 марта 2024).
2. **Беккер, М.Г.** Введение в теорию систем местность – машина. [Текст] / М.Г. Беккер. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
3. **Makarov, V.** Study of uneven surfaces distribution on forestry roads / V. Makarov, A. Markovkina, A. Papunin, A. Belyaev, K. Goncharov, V. Klubnichkin, E. Klubnichkin, V. Belyakov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1177 (2019) 012041/ [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/332323479_Study_of_uneven_surfaces_distribution_on_forestry_roads (дата обращения 10 марта 2024). DOI:10.1088/1742-6596/1177/1/012041
4. **Dohnal, F.** Detection of Microrelief Objects to Impede the Movement of Vehicles in Terrain / F. Dohnal, M. Hubacek, K. Simkova // International Journal of Geo-Information, 2019. 8 (3): 101. DOI:10.3390/ijgi8030101
5. **Веселов, В.Н.** Влияние технического уровня и эксплуатационного состояния автомобильных дорог на уровень аварийности // Вестник АГТУ. 2012. № 1 (53). С. 21-26.
6. **Ломакин, В.В.** Безопасность автотранспортных средств: учебник для вузов [Текст] / В.В. Ломакин, Ю.Ю. Покровский, И.С. Степанов, О.Г. Гоманчук. Под общ. ред. В.В. Ломакина. – М.: МГТУ «МАМИ», 2011. – 299 с.
7. **Блинова, Ю.С.** Психологические особенности личности, операционализирующиеся в профессиональной деятельности водителя транспортного средства // Психология и психотехника, 2019. № 1. С. 26-32.
8. **Буйленко, В.Я.** Психологические особенности человека при управлении автомобильным транспортом: учебное пособие [Текст] / В.Я. Буйленко, С.В. Жанказиев, В.В. Дементенко и др. – М.: МАДИ, 2017. – 172 с.
9. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин [Текст] / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2013. № 4 (101). С. 72-77.
10. **Беляков, В.В.** Методика расчета и анализ путей повышения проходимости многоосных колесных машин по снегу. Дис...канд.тех.наук: 05.05.03. – Н.Новгород, 1991. – 307с.
11. **Wong, J.Y.** Theory of Ground Vehicles. 3-rd Edition [Текст] / J.Y. Wong. – Wiley-Interscience, 2001. – 560 p.
12. **Kurkin, A.A.** Autonomous Mobile Robotic System for Environment Monitoring in a Coastal Zone / A.A. Kurkin, D.Yu. Tyugin, V. D. Kuzin, A.G. Chernov, V.S. Makarov, P.O. Beresnev, V. I. Filatov, D.V. Zeziulin // Procedia Computer Science. 2017. N 103. P. 459-465.
13. Методическое пособие по диагностике и развитию психофизиологических и индивидуально-психологических качеств будущих водителей. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://bk-dosaaf.ru/images/files_esc/_METODICHESKOE_POSOBIE.pdf (дата обращения 5 марта 2024).
14. **Линдеман, Х.** Аутогенная тренировка [Текст] / Х. Линдеман. – М.: ПСИ, 2022. – 200 с.

*Дата поступления
в редакцию: 02.04.2024*

*Дата принятия
к публикации: 23.10.2024*

УДК 629.365

EDN: LHBLKW

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОФИЛЬНОЙ ПРОХОДИМОСТИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В.Н. НаумовORCID: 0000-0001-5172-0364 e-mail: naumovvn@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***Е.Б. Сарач**ORCID: 0000-0001-7027-9164 e-mail: sarach@yandex.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***А.А. Стадухин**ORCID: 0000-0003-1414-3435 e-mail: ant.m9@ya.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***Б.В. Русаков**ORCID: 0009-0006-9724-9049 e-mail: bvlr4@ya.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Предложен метод анализа профильной проходимости мобильного робота, который можно использовать на этапе проектирования. Метод состоит в анализе профильной проходимости с помощью итерационного алгоритма, использующего аналитические уравнения статики твердого тела, при этом сопротивление качению колеса не учитывается. Программа позволяет определять требуемое для преодоления неровности положение центра масс машины с учетом доступной силы тяги по двигателям. Приведены зависимости, необходимые для нахождения сил и моментов, действующих при взаимодействии колеса с опорной поверхностью. Описанный алгоритм вычисления сил, действующих на машину, нетребователен к вычислительным мощностям, в отличие от современных методов решения подобных задач методом численного математического моделирования. Адекватность предложенного метода оценки профильной проходимости была подтверждена с помощью простого натурального эксперимента. Представленный подход может быть полезен для разработки системы управления машин, способных менять расположение центра тяжести при движении.

Ключевые слова: профильная проходимость, мобильный робот, положение центра масс, колесный движитель, уравнения статики, эксперимент.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Наумов, В.Н. Метод исследования профильной проходимости мобильного робота на этапе проектирования / В.Н. Наумов, Е.Б. Сарач, А.А. Стадухин, Б.В. Русаков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. № 4. С. 103-113. EDN: LHBLKW

A METHOD FOR INVESTIGATING CROSS-COUNTRY ABILITY OF MOBILE ROBOT DURING THE DESIGN PHASE

V.N. NaumovORCID: 0000-0001-5172-0364 e-mail: naumovvn@bmstu.ruBauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

E.B. Sarach

ORCID: **0000-0001-7027-9164** e-mail: **sarach@yandex.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

A.A. Stadukhin

ORCID: **0000-0003-1414-3435** e-mail: **ant.m9@ya.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

B.V. Rusakov

ORCID: **0009-0006-9724-9049** e-mail: **bvlr4@ya.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. The article proposes a method for analyzing the cross-country ability of a mobile robot, which can be used during the design stage. The method involves analyzing the cross-country ability using an iterative algorithm based on analytical equations of rigid body statics, while, as an assumption, the rolling resistance of the wheel is not taken into account. The program is designed to determine the optimal position of the machine's center of mass needed to overcome the obstacles, taking into account the available traction force from the engines. The dependences necessary to find the forces and moments acting when the wheel interacts with the support surface are given. The described algorithm for calculating the forces acting on the machine is not demanding of computing power, unlike modern methods by numerical mathematical modeling using for these tasks. The adequacy of the proposed method for assessing cross-country ability was confirmed using a simple field experiment. The presented approach may be useful for developing a control system for machines capable of changing the location of the center of gravity when moving.

Key words: cross-country ability, mobile robot, position of the center of mass, wheel drive, static equations, experiment.

FOR CITATION: V.N. Naumov, E.B. Sarach, A.A. Stadukhin, B.V. Rusakov. A method for investigating the profile patency of a mobile robot during the design phase. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 4. Pp. 103-113. EDN: LHBLKW

На этапе проектирования мобильного робота часто требуется оценить возможности профильной проходимости и подобрать массогабаритные параметры разрабатываемой машины. Однако, ввиду ограниченности известных параметров машины, на данном этапе может отсутствовать возможность проведения численного моделирования. В таком случае прибегают к аналитическим методам, которые применимы также в системах активного изменения центра масс мобильного робота ввиду малых требований к вычислительным мощностям. Например, в работе [1] предложена математическая модель для активного изменения центра масс колесного маятникового робота с целью преодоления лестничного марша. Данная модель требует значительных вычислительных мощностей для решения матриц седьмого порядка численным методом в реальном времени.

В работе [2] получены уравнения для определения замедления машины, но только при преодолении прямоугольного порога с высотой значительно меньше радиуса колеса. Работа [3] посвящена изучению профильной проходимости автомобиля с учетом его тяговых возможностей. В данной статье было учтено взаимодействие с вертикальным препятствием сопоставимого с радиусом колеса размером. Сложность взаимодействия заставила разбить процесс на два этапа и записать отдельные уравнения равновесия сил для колес на горизонтальном участке и колес, преодолевающих препятствие. В работе [4] указано на ошибочность распространённого утверждения о невозможности преодоления передними колесами полноприводного автомобиля вертикальной стенки, превышающей по высоте радиус колес, приведен вывод условия подъема передней оси полноприводной машины на стену, однако, не учтен реактивный крутящий момент от взаимодействия колес с грунтом. Данное допущение может вносить весомый вклад при проектировании колесных мобильных роботов, исследуемых в нашей

работе, ввиду большого отношения радиуса колеса к колесной базе и значительной удельной силе тяги. В работе [5] приведено моделирование заезда полноприводной машины на вертикальную стену с применением алгоритма пересечения многогранников, подтверждающее возможность заезда на стену передней осью полноприводной машины. В [6] приведено ошибочное заявление о невозможности заезда полноприводной колесной машины на вертикальную стену также по причине отсутствия учета реактивного крутящего момента от колес на корпус машины.

В данной статье предлагается использование математической модели, учитывающей реактивный крутящий момент от колес на корпус машины, максимально возможно реализуемую силу на колесах и положение центра масс машины. При этом, в отличие от большинства упомянутых выше работ, предлагается учитывать в аналитической модели реактивный крутящий момент от колес на корпус машины при вычислении потребной силы для подъема.

Анализ общепринятого решения о возможности заезда полноприводного автомобиля на стену

В учебниках по теории движения принято, что заезд на неровность полноприводной машины возможен только при условии, что радиус колеса больше высоты неровности [6]. Анализ общепринятого решения (рис. 1) показал, что в схеме нагружения машины не учитывался реактивный крутящий момент со стороны колес и принято равномерное распределение нагрузки по осям.

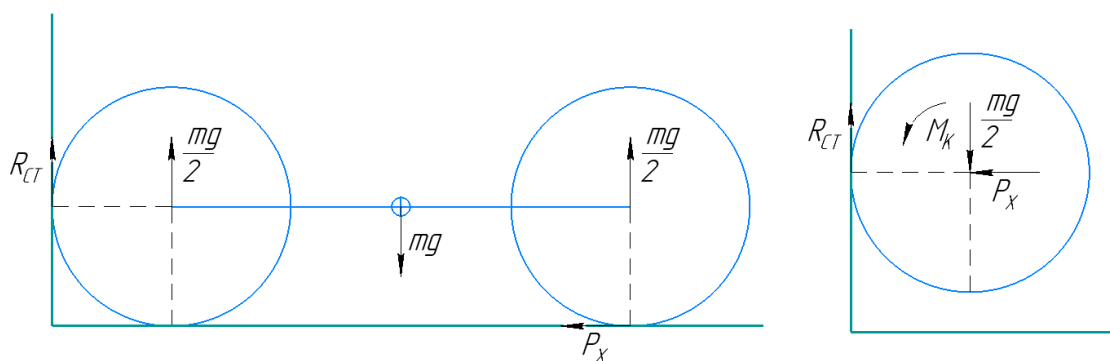


Рис. 1. Расчетная схема при общепринятом решении:

m – масса машины; P_x – продольная реакция взаимодействия с опорным основанием колес задней оси машины; R_{CT} – продольная реакция взаимодействия со стеной колес передней оси машины; M_K – крутящий момент, приложенный к оси машины

Fig. 1. Calculation scheme for the generally accepted solution:

m – machine weight; P_x – longitudinal reaction of interaction with the support base of the machine rear axle wheels; R_{CT} – longitudinal reaction of interaction with the wall of the machine front axle wheels; M_K – torque applied to the machine axis

Продольная реакция взаимодействия с опорным основанием колес задней оси вычисляется по формуле (1):

$$P_x = \frac{mg}{2} \cdot \varphi, \quad (1)$$

где φ – коэффициент сцепления между колесом и опорным основанием.

Продольная реакция взаимодействия со стеной колес передней оси вычисляется по формуле (2):

$$R_{CT} = P_x \cdot \varphi_{CT}, \quad (2)$$

где φ_{CT} – коэффициент сцепления между колесом и стеной.

Заезд на вертикальную стену при этом возможен при $R_{CT} > \frac{mg}{2}$ или $\frac{mg}{2} \cdot \varphi \cdot \varphi_{CT} > \frac{mg}{2}$, т.е. условие заезда имеет вид: $\varphi \cdot \varphi_{CT} > 1$. Следовательно, при обычных условиях, заезд невозможен, что опровергается практикой эксплуатации автомобилей [4].

Предлагаемый аналитический метод исследования профильной проходимости

Очевидно, что возможности преодоления вертикальной ступени определяется, в том числе, текущим расположением центра масс. С целью решения задачи по определению требуемого для преодоления неровности положения центра масс машины и потребный крутящий момент двигателей предложен аналитический метод исследования профильной проходимости, основанный на уравнениях статического равновесия. Для учета реактивного крутящего момента и возможности изменения положения центра масс машины была составлена расчетная схема (рис. 2). Весь процесс преодоления препятствия предлагается разделить на два случая, каждый из которых имеет два этапа.

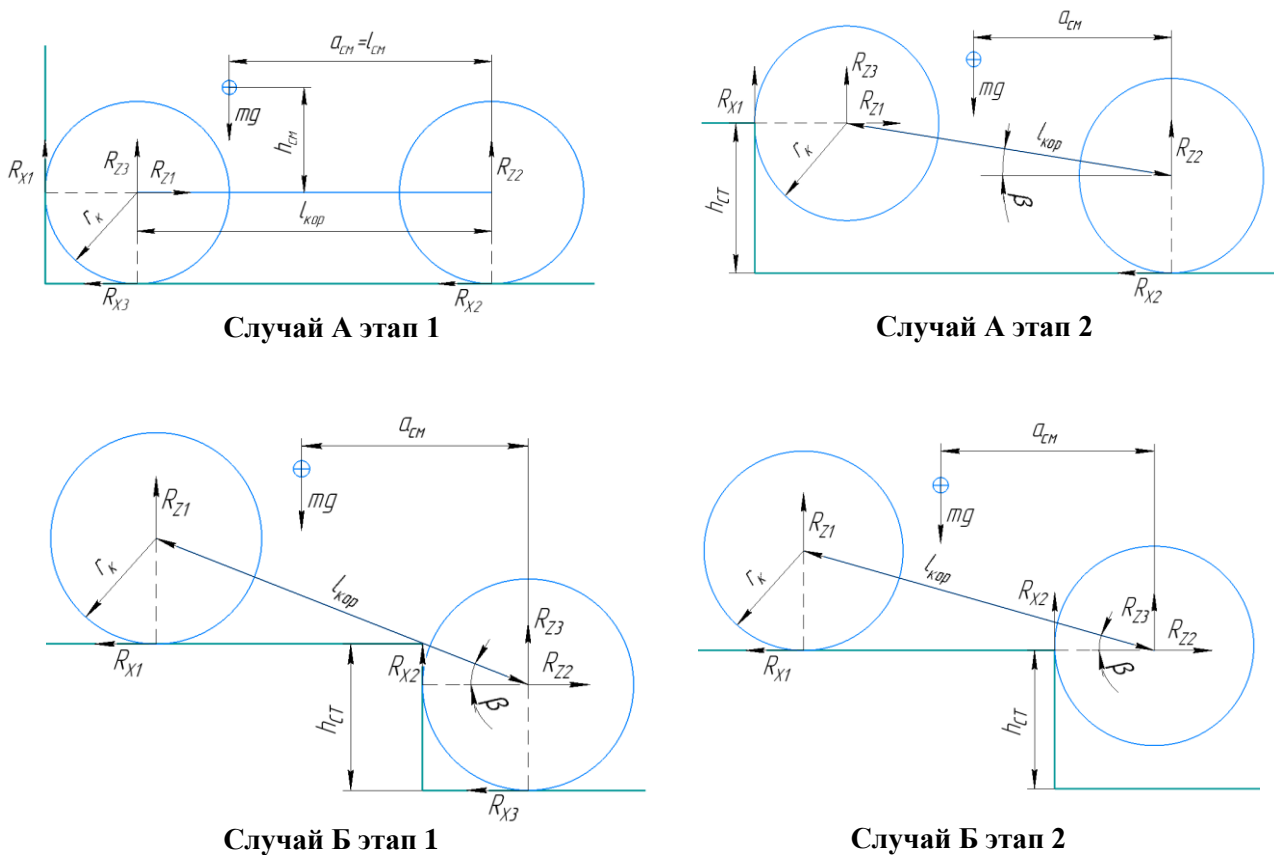


Рис. 2. Расчетная схема для двух случаев, учитывающая положение центра масс и реактивный крутящий момент от движителя

Fig. 2. Calculation scheme for two cases, taking into account the position of the center of mass and the reactive torque from the propulsion unit

В первом случае (случай А на рис. 2) условием подъема является неравенство: $R_{X1} > R_{Z3}$, условием не опрокидывания является неравенство: $R_{Z1} > 0$. R_{Z3} – суммарная вертикальная сила на оси, возможность подъема которой проверяется, находится из равенства нулю крутящих моментов относительно противоположной оси.

Случай А этап 1 соответствует началу заезда: колеса обеих осей машины находятся на опорной поверхности, колеса передней оси уперты в стену. В данном случае угол подъема корпуса относительно горизонтали $\beta = 0$.

Случай А этап 2: колеса передней оси машины оторваны от опорного основания и находятся в контакте со стеной, колеса задней оси машины находятся на опорной поверхности. В данном случае угол подъема корпуса относительно горизонтали $\beta = \arcsin\left(\frac{h_{CT} - r_k}{l_{кор}}\right)$.

Во втором случае (случай Б на рис. 2) условием подъема является неравенство: $R_{X2} > R_{Z3}$, условием не опрокидывания является неравенство: $R_{Z1} > 0$.

Случай Б этап 1: колеса передней оси машины находятся на верхней опорной поверхности, колеса задней оси машины находятся на нижней опорной поверхности и уперты в стену. В данном случае угол подъема корпуса относительно горизонтали $\beta = \arcsin\left(\frac{h_{CT}}{l_{кор}}\right)$.

Случай Б этап 2: колеса передней оси машины находятся на верхней опорной поверхности, колеса задней оси машины оторваны от опорного основания и находятся в контакте со стеной. В данном случае угол подъема корпуса относительно горизонтали $\beta = \arcsin\left(\frac{r_k}{l_{кор}}\right)$.

В рамках предлагаемого метода принято, что колесный движитель имеет межколесную и межосевую блокировку, а сопротивление качению пренебрежимо мало. При вычислениях считается, что суммарная сила тяги, приложенная к движителю, известна (в дальнейшем при построении графиков осуществляется перебор от 0 до заданной максимальной силы тяги). При достижении одной из продольных сил максимального реализуемого по сцеплению значения, избыток тяги равномерно распределяется на остальные продольные силы. Так продолжается до момента достижения всеми продольными силами максимальных реализуемых по сцеплению значений.

На первом шаге цикла программы принимается, что крутящий момент равномерно распределен по всем продольным силам взаимодействия движителя с опорным основанием. Затем вычисляются значения нормальных реакций и максимально возможных реализуемых сил $R_{X\varphi}$, причем для лучшей сходимости метода для дальнейших вычислений используются не новые значения $R_{X\varphi}$, а средние между новыми значениями и значениями с предыдущего шага (рис. 3-6). Дальнейший расчет производится после сортировки полученных значений $R_{X\varphi}$ по возрастанию и исходя из текущего случая и этапа преодоления препятствия (рис. 3-6).

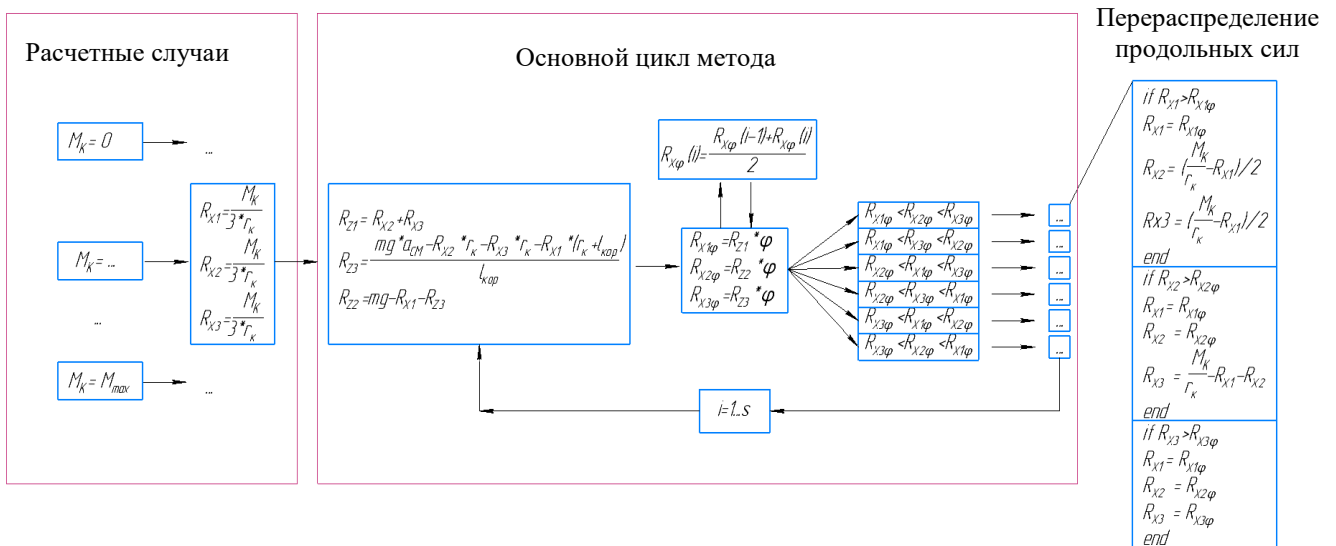


Рис. 3. Схемы алгоритма вычисления внешних сил, действующих на машину при случае А на этапе 1

Fig. 3. Schemes of the algorithm for calculating external forces acting on the machine in case A at stage 1

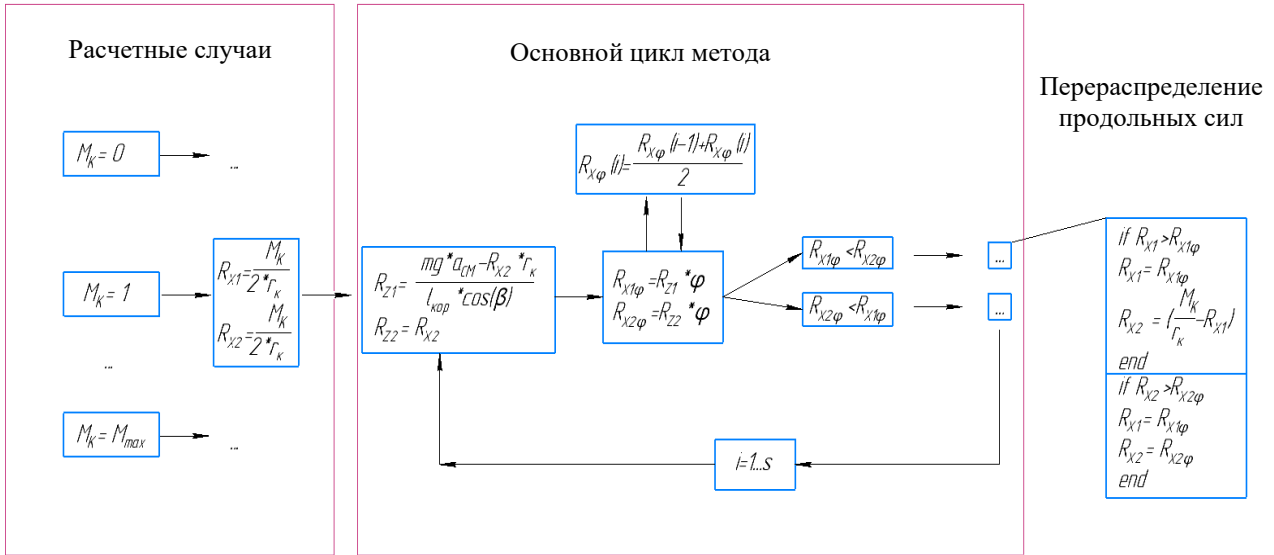


Рис. 4. Схемы алгоритма вычисления внешних сил, действующих на машину при случае А на этапе 2

Fig. 4. Schemes of the algorithm for calculating external forces acting on the machine in case A at stage 2

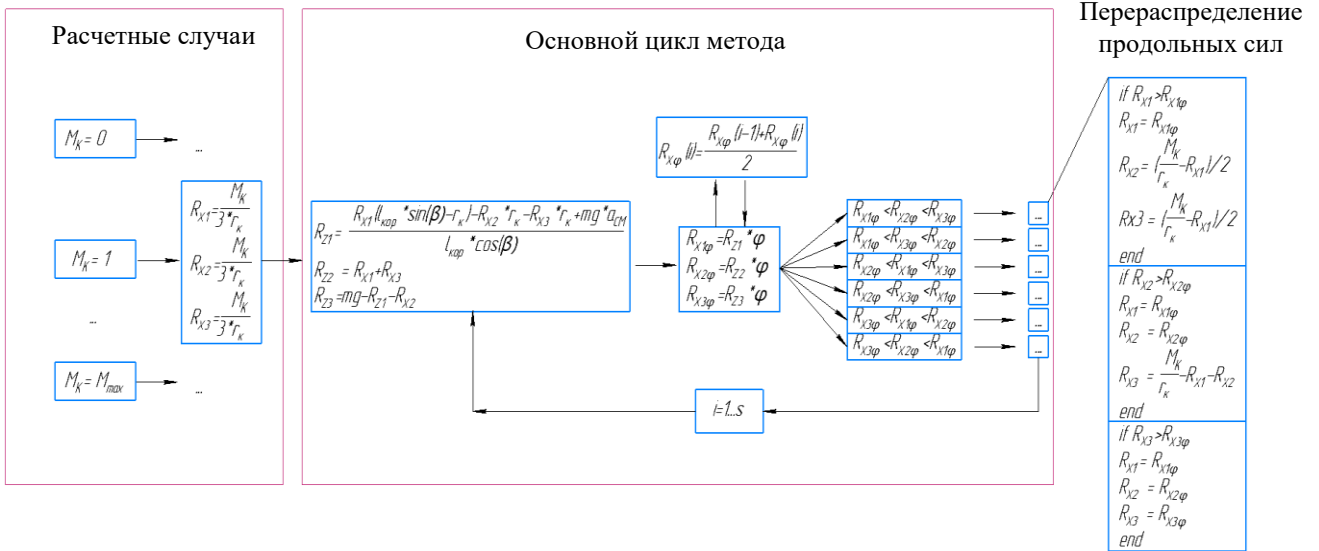


Рис. 5. Схемы алгоритма вычисления внешних сил, действующих на машину при случае Б на этапе 1

Fig. 5. Schemes of the algorithm for calculating external forces acting on the machine in case B at stage 1

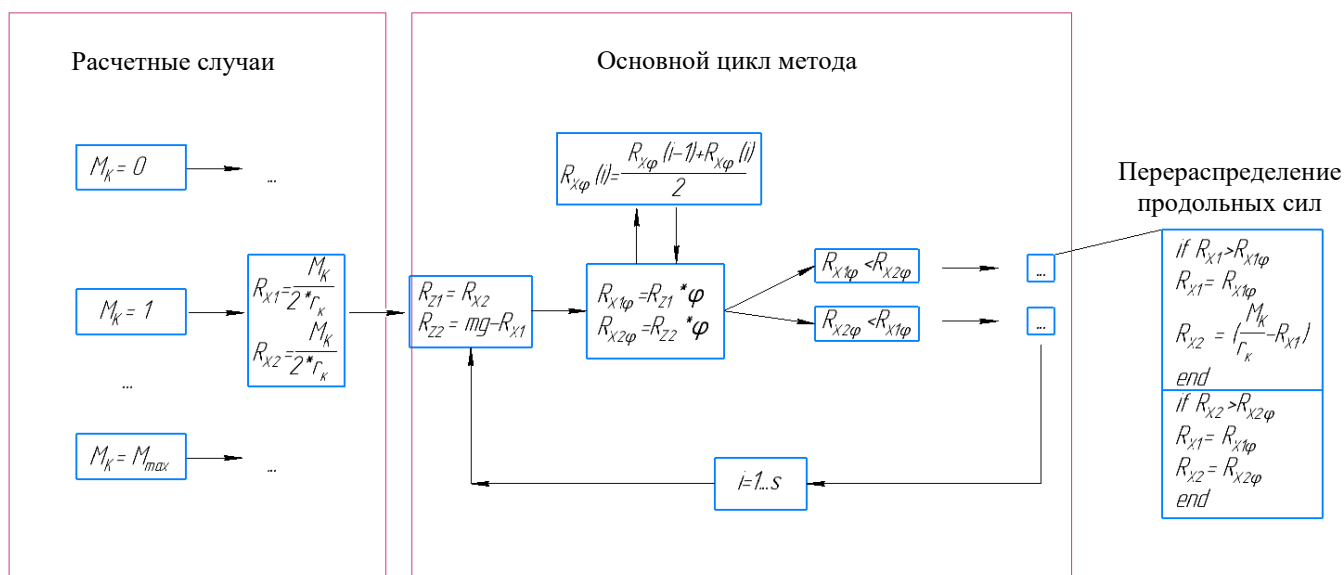


Рис. 6. Схемы алгоритма вычисления внешних сил, действующих на машину при случае Б на этапе 2

Fig. 6. Schemes of the algorithm for calculating external forces acting on the machine in case B at stage 2

Вычисление нормальных реакций производится с использованием II закона Ньютона и равенства нулю крутящих моментов относительно одной из осей машины. Например, для случая 1а (рис. 2):

Для горизонтальной оси координат можно записать (3):

$$R_{Z1} = R_{X2} + R_{X3}. \tag{3}$$

Из равенства нулю крутящих моментов относительно задней оси машины следует (4):

$$R_{Z3} = \frac{mg \cdot a_{CM} - R_{X2} \cdot r_k - R_{X3} \cdot r_k - R_{X1} \cdot (r_k + l_{кор})}{l_{кор}}. \tag{4}$$

Аналогично (3) для вертикальной оси координат следует (5):

$$R_{Z2} = mg - R_{X1} - R_{Z3}. \tag{5}$$

Максимально возможная реализуемая сила вычисляется по формуле (6):

$$R_{X\phi} = R_z \cdot \phi. \tag{6}$$

Принимается допущение, что максимальное значение коэффициента трения ϕ равно коэффициенту трения-скольжения ввиду недостаточности исходных данных для использования μ -s диаграммы.

Аналогичным образом вычисляются силы для каждого случая и формируется программа вычисления сил, действующих на машину (рис. 3). Для подтверждения работоспособности программы произведен натурный эксперимент.

Экспериментальная часть

Экспериментальная часть состоит из двух этапов. На первом из них с использованием предложенного метода производится оценка возможности преодоления машиной препятствия в сравнении с реальной возможностью заезда на ступень базового образца. На втором этапе производится подбор требуемого положения центра масс машины для заезда передних и задних колес на преграду по описанной методике и проверка возможности заезда в натурном эксперименте.

Произведено измерение параметров натурального образца, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1.
Параметры натурального образца
Table 1.
Parameters of a nature-sized sample

Параметр	Значение
Продольное расстояние от задней оси до ЦМ (l_{CM}), м	0,0864
Вертикальное расстояние от задней оси до ЦМ (h_{CM}), м	0,0261
Масса (m), кг	0,704
Колесная база ($l_{кор}$), м	0,16
Радиус колеса (r_k), м	0,048
Коэффициент трения-скольжения (φ)	0,67
Максимальный крутящий момент ($\max(M_K)$), Нм	0,64

Нахождение центра масс образца производилось взвешиванием по отдельности осей машины при наклоне образца под определенным углом (одна ось расположена ниже другой). Нахождение коэффициента трения производилось протягиванием образца через весы с крючком при заблокированных колесах. На рис. 7 представлен внешний вид испытательной трассы. Высота ступени равна 68 мм при радиусе колеса образца 48 мм.

По результатам предложенного аналитического метода, заезд образца с исходными параметрами возможен только на первом этапе. Это видно по тому, что на первом этапе (графики 1а, 1б на рис. 8) выполняется условие $R_{X1} > R_{Z3}$: есть область, в которой синяя линия (R_{X1}) выше красной (R_{Z3}), а на втором этапе (графики 2а, 2б на рис. 5) не выполняется условие $R_{X2} > R_{Z3}$: на всем графике синяя линия (R_{X2}) ниже красной (R_{Z3}). Ни на одном из этапов не происходит опрокидывание ($R_{Z1} > 0$).

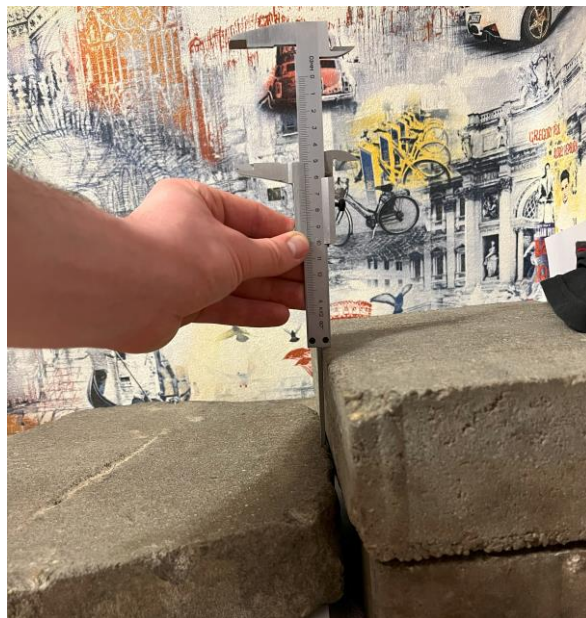
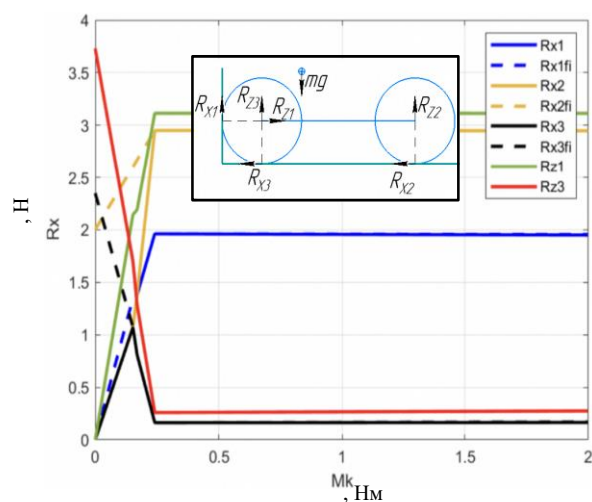


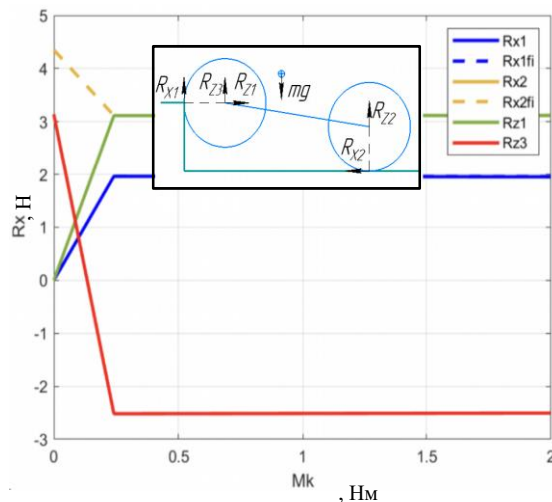
Рис. 7. Внешний вид испытательной трассы

Fig. 7. Exterior view of the test track

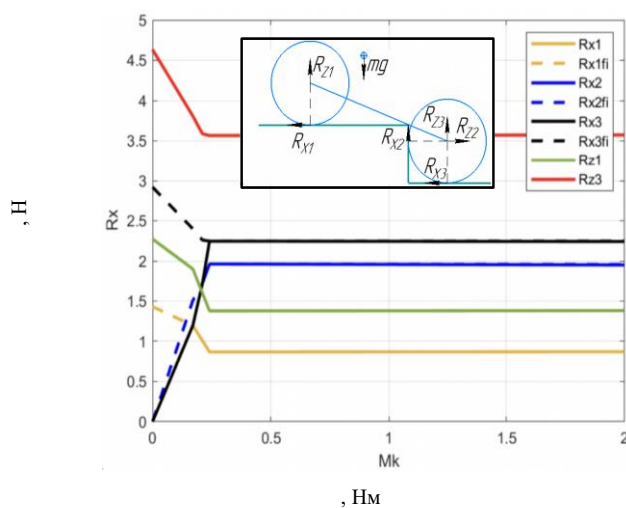
Натурный эксперимент для образца с исходными параметрами (табл. 1) подтвердил аналитическое решение – машина не может преодолеть второй этап заезда по причине недостаточного сцепления движителя с опорным основанием – наблюдается безрезультатное буксование (рис. 9). Опрокидывания не происходит.



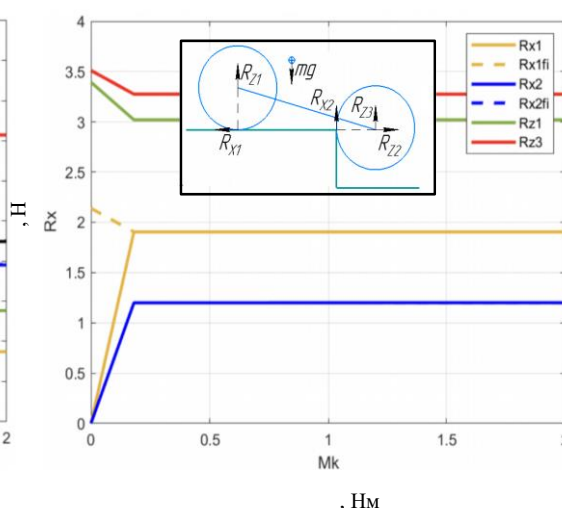
Случай А этап 1



Случай А этап 2



Случай Б этап 1



Случай Б этап 2

Рис. 8. Аналитическое решение для исходного образца

Fig. 8. Analytical solution for the original sample

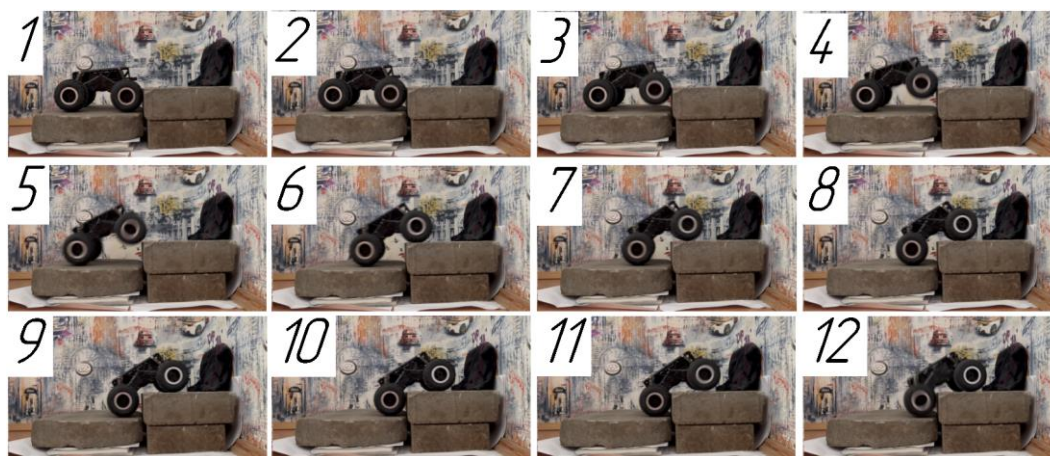


Рис. 9. Натурный эксперимент с исходным образцом

Fig. 9. Nature-sized experiment with the original sample

С помощью описанного выше метода было подобрано такое положение центра масс образца, при котором теоретически возможен заезд на ступень на обоих этапах (рис. 10). Для этого использовался дополнительный груз и перемещение аккумулятора образца. Модифицированный образец обладает следующими параметрами: $l_{CM} = 0,118$ м; $h_{CM} = 0,03$ м; $m = 0,975$ кг, остальные параметры остались неизменны (табл. 1). Подбор новых параметров осуществлялся итерационным перемещением груза, а также последующим измерением положения центра масс машины и проверкой условий заезда в программе: на первом этапе $R_{X1} > R_{Z3}$, а на втором этапе $R_{X2} > R_{Z3}$ (на всех четырех графиках на рис. 10 должен быть участок, на котором синяя линия выше красной).

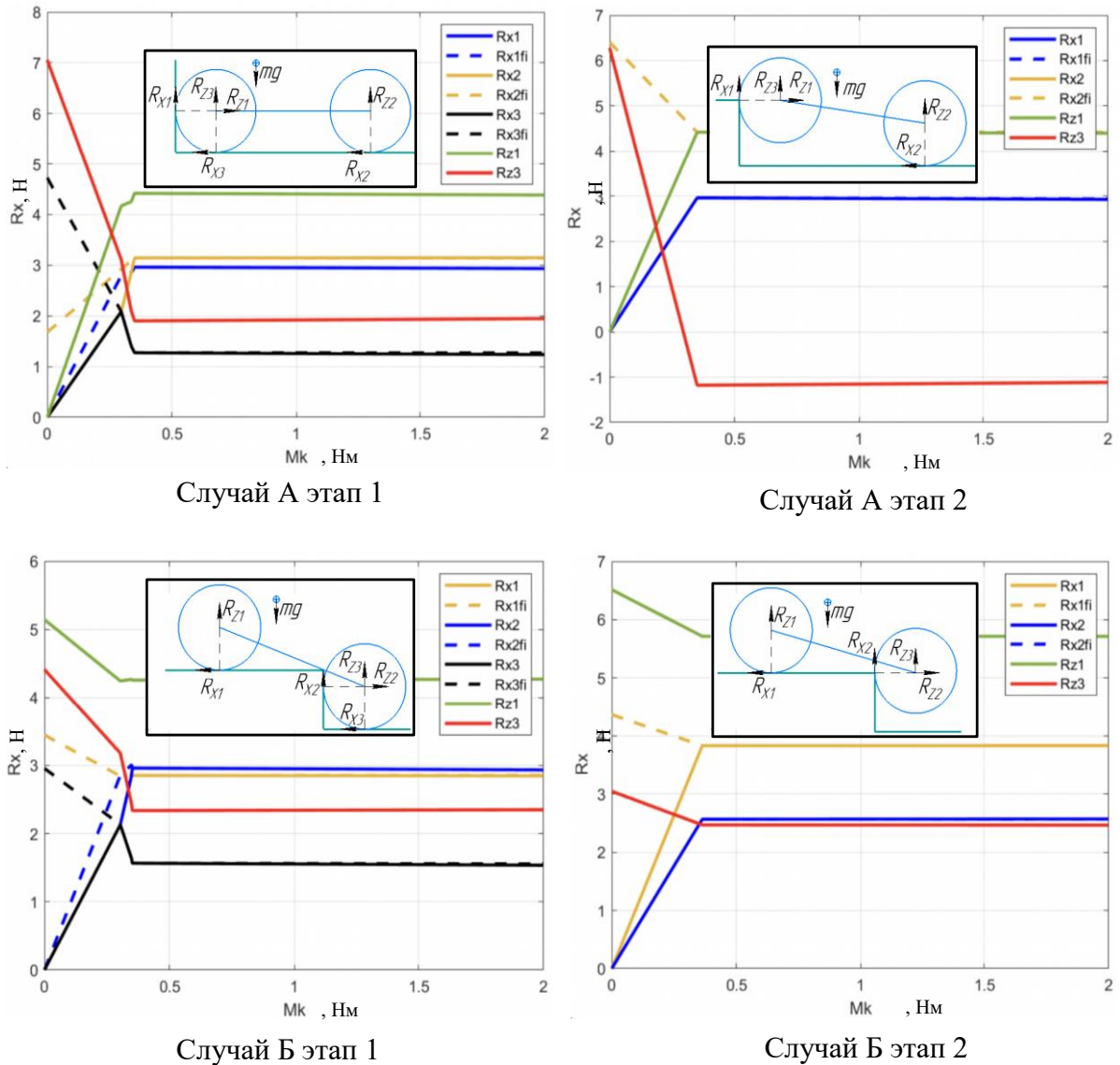


Рис. 10. Аналитическое решение для измененного образца

Fig. 10. Analytical solution for the modified sample

Натурный эксперимент с модифицированным образцом (рис. 11) подтвердил аналитическое решение – возможно обеспечить преодоление преграды, представленной на рис. 7, при этом опрокидывания образца не происходит.

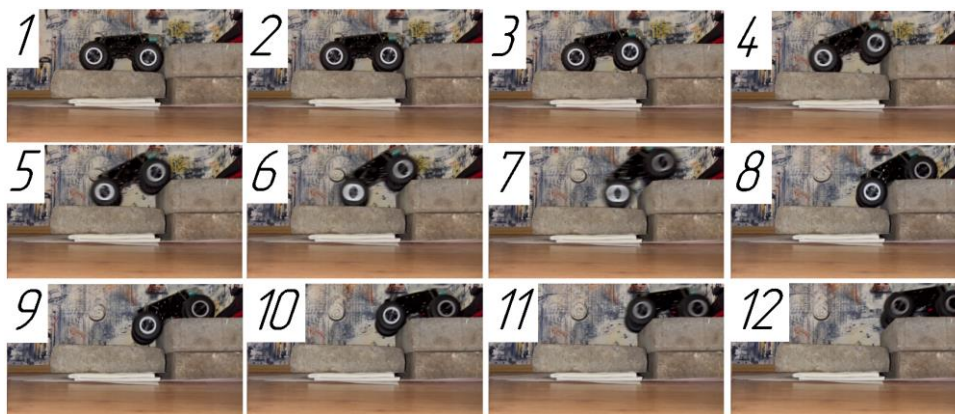


Рис. 11. Натурный эксперимент с модифицированным образцом

Fig. 11. Nature-sized experiment with a modified sample

Выводы

Предложен аналитический метод исследования профильной проходимости колесной полноприводной машины, основанный на уравнениях статического равновесия. Он позволяет производить анализ профильной проходимости с минимальными затратами вычислительных мощностей и малым количеством исходных данных. Доказано, что, в отличие от данных в учебной литературе, существуют ситуации, когда возможен заезд на ступень с высотой, большей, чем радиус колеса, для колесного движителя с формулой 4x4. Подтверждена работоспособность предложенного метода путем качественного сравнения с натурным экспериментом.

Результаты статьи могут быть полезны при выборе параметров ходовой части и технического облика вновь разрабатываемых мобильных роботов, а также в системах активного изменения центра масс мобильного робота с целью повышения профильной проходимости.

Библиографический список

1. **Strah, B.** Autonomous Stair Climbing of a Wheeled Double Inverted Pendulum / B. Strah, S. Rinderknecht // 6th IFAC Symposium on Mechatronic Systems. April 10-12, 2013. Hangzhou, China.
2. **Мамити, Г.И.** Динамическое преодоление невысокого порога полноприводным автомобилем / Г.И. Мамити, С.Х. Плиев, В.Г. Васильев // Известия Горского государственного аграрного университета. 2015. Вып. 3. С. 152-157.
3. **Шухман, С.Б.** Теоретическое исследование профильной проходимости полноприводного автомобиля / С.Б. Шухман, В.И. Соловьев, М.А. Малкин // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. Вып. 11. С. 4.
4. **Мамити, Г.И.** Оптимальная развесовка полноприводного автомобиля / Г.И. Мамити, С.Х. Плиев, В.Г. Васильев // Известия Горского государственного аграрного университета. 2015. Вып. 2. С. 157-160.
5. **Стадухин, А.А.** Исследование профильной проходимости колесной машины с помощью алгоритма пересечения многогранников / А.А. Стадухин, Р.Д. Песков // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. № 9 (69). С. 8. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-9-1677.
6. **Ларин, В.В.** Теория движения полноприводных колесных машин. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 391 с.

*Дата поступления
в редакцию: 12.03.2024*

*Дата принятия
к публикации: 23.10.2024*

УДК 629.365

EDN: ZNBCJW

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЖЕКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ВОДООТКАЧКИ ПЕРСПЕКТИВНОЙ АМФИБИЙНОЙ МАШИНЫ

И.А. ТрусевичORCID: 0000-0002-6092-8762 e-mail: trilal@bk.ru

Специальное конструкторское бюро машиностроения

Курган, Россия

Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН

*Екатеринбург, Россия***С.В. Абдулов**ORCID: 0009-0003-1769-4520 e-mail: sincopa2004@mail.ru

Специальное конструкторское бюро машиностроения

*Курган, Россия***И.А. Тараторкин**ORCID: 0000-0003-3836-6238 e-mail: ig_tar@mail.ru

Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН

*Екатеринбург, Россия***В.Б. Держанский**ORCID: 0000-0003-1043-8340 e-mail: dvb_47@mail.ru

Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН

Екатеринбург, Россия

Усовершенствована конструкция эжекционной системы водооткачки перспективной амфибийной машины. Проведена серия симуляционных расчетов в программном пакете на основе методов мультифизического моделирования STAR-CCM+, по результатам верифицируется модель существующей эжекционной системы водооткачки серийной амфибийной машины, подтверждается высокая сходимость данных, полученных путем моделирования. Разрабатывается модель эжекционной системы водооткачки перспективной амфибийной машины. Рассматривается и анализируется влияние местоположения ряда отверстий в напорном патрубке водометного движителя, числа рядов, количества отверстий в каждом из них и их диаметров, угла фаски на входном участке отверстия, входного и выходного диаметров отверстий на производительность эжекционной системы водооткачки. По итогам серии симуляционных расчетов определены параметры, позволяющие обеспечить наибольшую производительность системы эжекционной водооткачки. Производительность по сравнению с исходным вариантом увеличена в 1,29 раз, а сопротивление трассы всасывания снижено в 1,97 раз. Испытания усовершенствованной эжекционной системы водооткачки подтверждают результаты моделирования.

Ключевые слова: водометный движитель, водооткачка, водоотлив, эффект эжекции, амфибийная машина, симуляция, CFD, моделирование, верификация, экспериментальное исследование, прогнозирование.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Трусевич, И.А. Совершенствование конструкции эжекционной системы водооткачки перспективной амфибийной машины / И.А. Трусевич, С.В. Абдулов, И.А. Тараторкин, В.Б. Держанский // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 4. С. 114-125. EDN: ZNBCJW

IMPROVING THE DESIGN OF WATER PUMPING EJECTION SYSTEM OF PROMISING AMPHIBIAN VEHICLE

I.A. Trusevich

ORCID: **0000-0002-6092-8762** e-mail: **trilal@bk.ru**

Joint-stock Company «Special design Bureau of machine building»

Kurgan, Russia

Institute of Engineering Science Ural Branch RAS

Yekaterinburg, Russia

S.V. Abdulov

ORCID: **0009-0003-1769-4520** e-mail: **sincopa2004@mail.ru**

Joint-stock Company «Special design Bureau of machine building»

Kurgan, Russia

I.A. Taratorkin

ORCID: **0000-0003-3836-6238** e-mail: **ig_tar@mail.ru**

Institute of Engineering Science Ural Branch RAS

Yekaterinburg, Russia

V.B. Derzhansky

ORCID: **0000-0003-1043-8340** e-mail: **dvb_47@mail.ru**

Institute of Engineering Science Ural Branch RAS

Yekaterinburg, Russia

Abstract. The paper presents the improved design of the ejection water pumping system of a promising amphibious vehicle. A series of simulation calculations is carried out in a software package based on multiphysical modeling methods STAR-CCM+. Based on their results, the model of the existing ejection water pumping system of a serial amphibious vehicle is verified and the high convergence of the data obtained by modeling is confirmed. A model of the ejection water pumping system of a promising amphibious vehicle is being developed. The influence of the location of a row of holes in the pressure pipe of a water-jet propulsion unit, the number of rows, the number of holes in each of them and their diameters, the chamfer angle at the inlet section of the hole, the inlet and outlet diameters of the holes on the performance of the ejection water pumping system is considered and analyzed. Based on the results of a series of simulation calculations, the parameters were determined, allowing the highest productivity of the ejection water pumping system. Productivity is increased by 1,29 times compared to the original version, and the resistance of the suction path is reduced by 1,97 times. Tests of an improved ejection water pumping system is confirmed the simulation results.

Key words: water-jet propulsion, water pumping, dewatering, ejection effect, amphibious vehicle, simulation, CFD, modeling, verification, experimental research, prediction.

FOR CITATION: I.A. Trusevich, S.V. Abdulov, I.A. Taratorkin, V.B. Derzhansky. Improving the design of water pumping ejection system of promising amphibian vehicle. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 4. Pp. 114-125. EDN: ZNBCJW

Введение

В настоящее время амфибийные машины широко востребованы в военной и гражданской сферах, активно используются в различных родах войск Вооруженных Сил и отраслях народного хозяйства. Одним из ключевых требований к ним является *живучесть* – способность противостоять в процессе преодоления водных преград эксплуатационным и другим повреждениям, максимально возможно восстанавливая или поддерживая при этом с помощью экипажа свои водоходные качества. Живучесть определяется при работе на плаву, в первую очередь, непотопляемостью, под которой понимается свойство поврежденной машины сохранять плавучесть, остойчивость, ходкость и управляемость при поступлении в корпус забортной воды до выхода на берег. Поступление в корпус забортной воды сопровож-

дается уменьшением запаса плавучести, скорости и устойчивости на курсе, изменением дифферента и крена, ухудшением работы некоторых систем и механизмов амфибийной машины. Если не предпринять своевременных мер по прекращению заливания и откачке поступающей жидкости, оно может привести к затоплению изделия.

Несмотря на то, что живучесть амфибийных машин зависит от многих конструктивных и эксплуатационных качеств, определяющими являются запас плавучести и производительность водооткачивающих средств. Повышение запаса плавучести за счет увеличения водонепроницаемого объема корпуса позволяет повысить весовую нагрузку машины на плаву, но ограничивается рядом требований, в первую очередь, габаритами изделия, и приводит к увеличению парусности амфибийной машины. Поэтому основным подходом к повышению живучести амфибийных машин на плаву является использование нескольких водооткачивающих насосов с большой подачей с приводом от основного двигателя машины и насосов с электроприводами от аккумуляторных батарей для откачки воды при неработающем основном двигателе [1-3]. Основным назначением водооткачивающих средств является обеспечение нормальных условий для работы всех узлов и агрегатов амфибийной машины за счет своевременного удаления воды, просачивающейся в корпус через уплотнения или из-за каких-либо дефектов в элементах герметизации корпуса.

Большинство работ, посвященных разработке и совершенствованию водооткачивающих систем, относятся к корабельной тематике [4], в них обсуждаются существующие стандарты и требования к системам водооткачки, рассматриваются стационарные и погружные водооткачивающие системы, оценивается производительность насосов, подтверждается обеспечение требуемых величин по известным показателям производительности водооткачки и начального уровня воды, а также выполняется разработка и проектирование систем управления [5-11]. В качестве водооткачивающих средств на плавающих машинах применяют насосы различного типа [12-14]. Для большинства амфибийных машин более предпочтительны насосы с большой подачей и умеренным напором – центробежные или осевые. Как и корабли, большинство амфибийных машин оснащены подобными системами водооткачки, основной подход к которым описан выше – ААV-7 (LVTP-7), M113, *Bandvagn 206*, *MOWAG Piranha*, *Bradley*, двухзвенные транспортеры семейства «Витязь», МТ-ЛБ и др. Однако для повышения живучести амфибийных машин на плаву могут быть использованы водометные движители, являющиеся наиболее распространенными и широко применяемыми на современных амфибийных машинах водоходными движителями, за счет установки эжекционных систем водооткачки, использующих разрежение в водоводе для откачки воды из корпуса. Эти системы, как правило, обладают большей производительностью, чем насосы, и существенно меньшими затратами мощности, но реализованы на сравнительном небольшом числе амфибийных машин – БРДМ, некоторых образцах семейства БТР, БМП-3.

Конструкция и расчет эжекционных систем водооткачки

Определяющим параметром эффективности эжекционной системы водооткачки является место подсоединения к водометному движителю. Их возможные расположения показаны на рис. 1. Подсоединение в выходном напорном патрубке (4) с использованием эжектирующего эффекта потока воды, имеющего высокую скорость, обладает рядом преимуществ перед подсоединением к входному участку водовода (1 – 3), т.к. в этом случае поток не оказывает влияния на работу насосного устройства. Помимо этого, при подсоединении (1 – 3) подсос воздуха вместе с водой приводит к ухудшению тяговых характеристик водометного движителя.

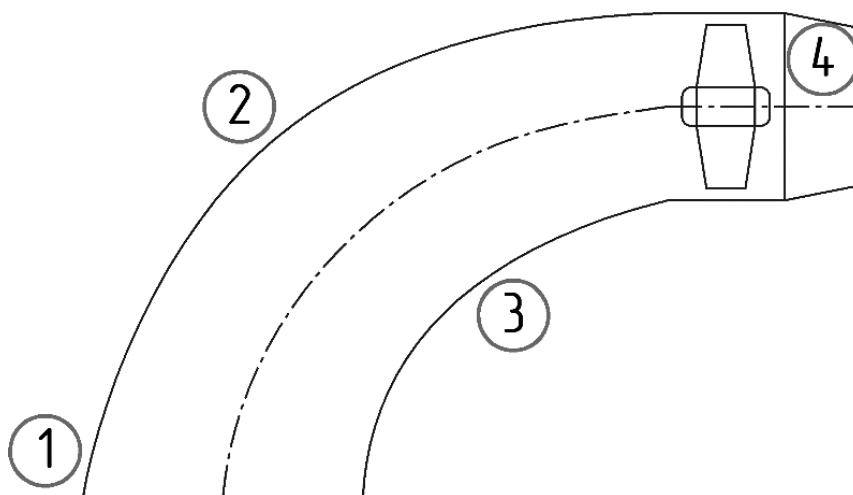


Рис. 1. Возможные места подсоединения эжекционной системы водооткачки к водоводам водометного движителя

Fig. 1. Possible places for connecting the ejection water pumping system to the water pipes of the water jet propulsion system

Как правило, на практике определение непосредственного места подсоединения трассы системы водооткачки к водоводу водомета осуществляется экспериментальным путем. Для этого выполняются измерения разрежения в предполагаемых местах подсоединения трассы системы водооткачки к водоводу водомета. Поскольку наибольшее разрежение соответствует областям водовода с максимальной скоростью воды, следует рассматривать участки водовода с наименьшей площадью сечения.

Если экспериментальное определение областей водовода с наибольшими разрежениями невозможно, допускается расчетный подход; составляется уравнение Бернулли, решая которое, можно определить величины разрежения в предполагаемых местах подсоединения трассы системы водооткачки к водоводу водомета:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma_B} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma_B} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{\Pi} \quad (1)$$

где z_1 и z_2 – удельная потенциальная энергия положения частиц воды в двух сечениях относительно плоскости сравнения (геометрический напор $H_{\text{геом}}$); p_1/γ_B и p_2/γ_B – удельные потенциальные энергии давления, оцениваемые абсолютным давлением в данной частице воды и ее удельным весом (пьезометрический напор H_{Π}); $\alpha_1 v_1^2/2g$ и $\alpha_2 v_2^2/2g$ – удельные кинетические энергии, измеряемые средней скоростью потока в данном сечении (динамический напор $H_{\text{дин}}$); α – коэффициент Кориолиса, принимаемый равным единице при равномерной скорости по всему сечению и больше единицы, когда распределение скоростей по сечению неравномерное; h_{Π} – потери удельной энергии в элементах системы.

Потеря энергии складывается из потерь в местных сопротивлениях элементов системы (h_m) и потерь на преодоление трения жидкости о стенки трубопроводов ($h_{\text{тр}}$):

$$h_{\Pi} = h_m + h_{\text{тр}} \quad (2)$$

Потери в местных сопротивлениях рассчитываются по формуле

$$\sum_1^n h_{mi} = \zeta_{m1} \frac{v_1^2}{2g} + \dots + \zeta_{mn} \frac{v_n^2}{2g} \quad (3)$$

где ζ – коэффициенты местных сопротивлений элементов системы, определяемые по справочникам гидравлических сопротивлений.

Потери на преодоление трения могут быть найдены по формуле:

$$\sum_1^m h_{\text{тр}} = \lambda_1 l_1 v_1^2 / d_1 2g + \dots + \lambda_m l_m v_m^2 / d_m 2g \quad (4)$$

где l_i и d_i – длина и диаметр участка трубопровода; λ_i – коэффициент сопротивления трения по длине трубопровода.

Значение коэффициента трения λ определяется по формуле:

$$\lambda = 0,11(\Delta/D_r)^{0,25} \quad (5)$$

где D_r – гидравлический диаметр, равный $4F/\chi$ (F – площадь поперечного сечения трубопровода, χ – периметр сечения); Δ – средняя шероховатость внутренней поверхности трубопровода.

Для уменьшения потерь в элементах эжекционной системы желательно общую длину трубопроводов делать как можно меньше, избегать значительных изгибов и изменения диаметров. Поэтому при оценке потерь в местных сопротивлениях и потерь на трение в трубопроводах допускается использовать средний диаметр трубопроводов и принимать коэффициент Кориолиса равным единице, что упрощает решение уравнения Бернулли. Скорости воды в каждом сечении трубопроводов принимаются равными $v_i = Q_3/F_{\text{ср}}$. Тогда, после необходимых подстановок, решение уравнения (1) относительно Q_3 дает:

$$Q_3 = \sqrt{2gF_{\text{ср}}^2 [z_2 - z_1 + (p_2 - p_1)\gamma_w] / (\sum \zeta_i + \sum \lambda_i l_i / d_i)} \quad (6)$$

Расчет по этой формуле дает ориентировочное значение подачи эжекционной системы водооткачки при принятых допущениях. В дальнейшем, после проведения полноценных испытаний эжекционной системы водооткачки, данный узел можно совершенствовать, меняя место подключения к водомету, диаметр трубопроводов и число их вводов в водомет.

Условия моделирования и верификация расчетной модели

Прогресс в развитии программного обеспечения, в том числе, для решения задач вычислительной газогидродинамики позволяет решать задачу совершенствования конструкции эжекционной системы водооткачки перспективной амфибийной машины методом численного моделирования. Данный подход обеспечивает большую точность, чем описанный выше расчетный метод, и является существенно менее дорогостоящим по сравнению с проведением полноценных испытаний.

В рамках данного исследования выполнялось совершенствование эжекционной системы водооткачки перспективной амфибийной машины, с подсоединением в выходном напорном патрубке по схеме 4 на рис. 1. Изменение эжектирующего потока вследствие вариации параметров водовода, насосного колеса и направляющего аппарата не рассматривалось в данной работе. Изучалось влияние расположения и конструктивных параметров отверстий в выходном напорном патрубке. Расчетное исследование осуществлялось в программном пакете для инженерной симуляции на основе методов мультифизического моделирования STAR-CCM+. Динамическая вязкость и плотность задавались для воды при температуре 24° С: $\mu = 8,8871 \cdot 10^{-4}$ Па·с; $\rho = 997,561$ кг/м³.

Массовый расход воды для каждого расчетного случая определен по известному коэффициенту расхода при максимальной частоте вращения вала водометного движителя. Исключением является определение расхода усовершенствованной конструкции эжекционной системы водооткачки. В этом случае массовый расход был определен для каждого расчетного случая всего рабочего диапазона частоты вращения вала водометного движителя.

На первом этапе исследования была разработана модель существующей эжекционной системы водооткачки серийной амфибийной машины, с подсоединением к входному участку водовода по схеме 2 на рис. 1. При этом в качестве граничных условий задавались: массовый расход воды перед насосным колесом; стагнация на входе трассы всасывания системы водо-

откачки и окна водометного движителя. Выполнена серия симуляционных расчетов, проведена верификация расчетной модели, введены необходимые доработки и уточнения. Верификация модели выполнялась на основе сравнения показателей давления в характерных точках водометного движителя и массовых расходов системы водооткачки, полученных путем расчетного моделирования и в ходе испытаний на стенде и в объекте. Разработанная модель существующей эжекционной системы водооткачки серийной амфибийной машины продемонстрировала высокую сходимость сравниваемых параметров: расхождение по давлениям – не более 3 %, по расходам – не более 5 %.

Совершенствование эжекционной системы водооткачки перспективной амфибийной машины

На данном этапе исследования была разработана модель эжекционной системы водооткачки перспективной амфибийной машины, с подсоединением в выходном напорном патрубке по схеме 4 на рис. 1. Один из вариантов конструкции, отличающийся от прочих только расположением и конструктивными параметрами отверстий, приведен на рис. 2. При этом в качестве граничных условий задавались: массовый расход воды после насосного колеса – на входе в направляющий аппарат; стагнация на входе трассы всасывания системы водооткачки; давление на выходе напорного патрубка водометного движителя. Выполнена серия симуляционных расчетов, результаты которых представлены и описаны ниже.

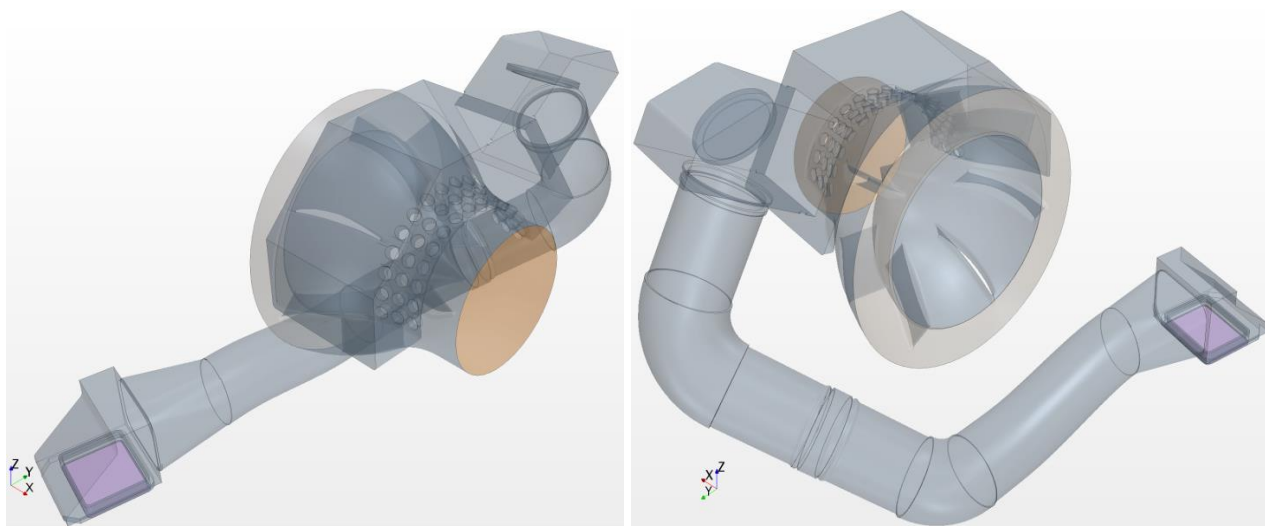


Рис. 2. Геометрическая модель одного из вариантов эжекционной системы водооткачки

Fig. 2. Geometric model of one of the options for an ejection water pumping system

На основе предварительного варианта конструктивной реализации эжекционной системы водооткачки с одним рядом отверстий была выполнена серия симуляционных расчетов для определения влияния расположения ряда в напорном патрубке на производительность водооткачки, результаты которых представлены на рис. 3.

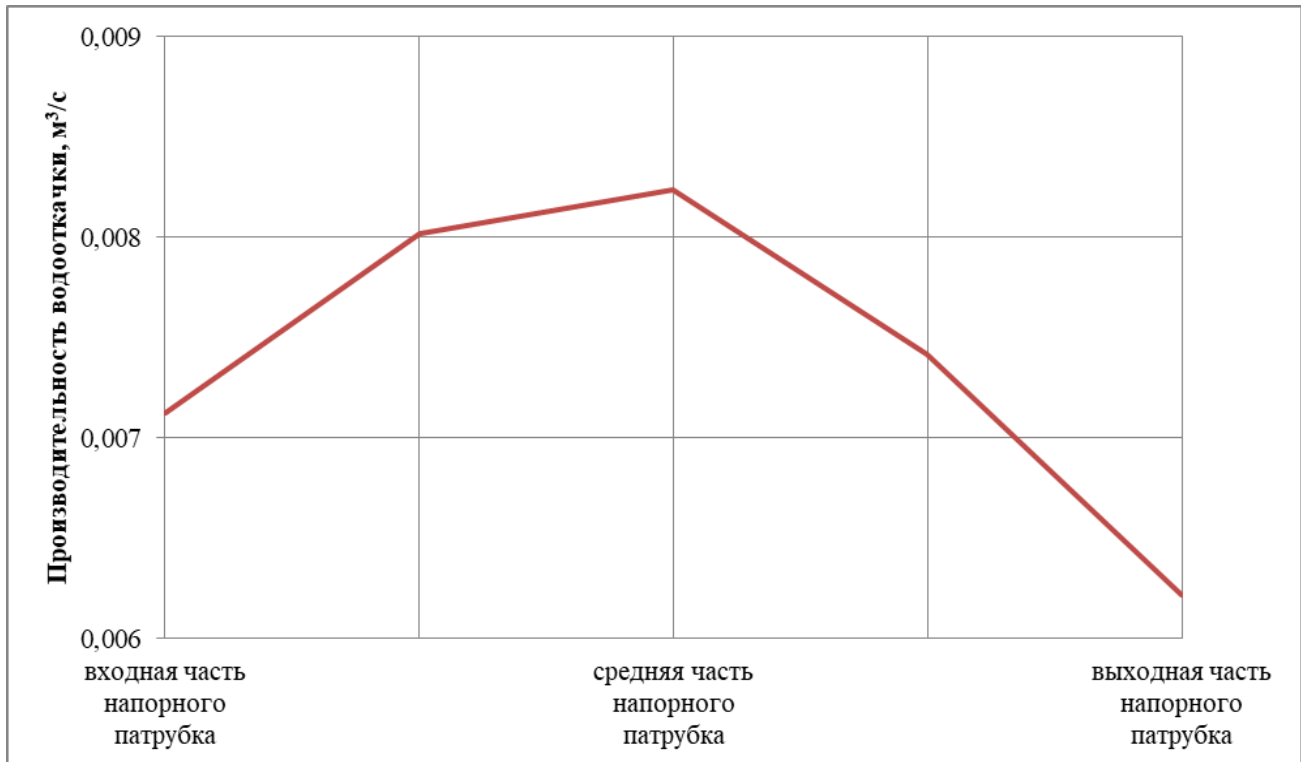


Рис. 3. Зависимость производительности водоткачки от расположения ряда отверстий в напорном патрубке

Fig. 3. The dependence of the pumping performance on the location of a number of holes in the pressure pipe

Как следует из рис. 3, наилучшее расположение ряда отверстий – область окончания сужения диаметра напорного патрубка, соответствующая его средней части. После определения наилучшего варианта расположения ряда, исходя из обеспечения условий прочности и технологичности, было выполнено большое число симуляционных расчетов в диапазоне диаметров отверстий от 4 до 60 мм и их числа от 29 до 4 соответственно. Лишь в 5 случаях моделирования из 57 удалось обеспечить требуемую производительность системы водоткачки, поэтому были выполнены оценочные расчеты с большим числом рядов. Полученные результаты подтвердили необходимость рассмотрения большего числа рядов для обеспечения максимальной производительности системы водоткачки. На рис. 4 представлены результаты симуляционных расчетов для всего рассматриваемого диапазона диаметров и отверстий при числе рядов от 1 до 6.

Помимо представленных на рис. 4 вариантов, был выполнен расчет с 7 рядами и 29 отверстиями диаметром 4 мм – производительность системы водоткачки составила 0,010706 м³/с. На основе анализа результатов моделирования установлено, что из всех рассмотренных вариантов наибольшая производительность водоткачки обеспечивается при трехрядном исполнении конструкции, с 14 отверстиями диаметром 14 мм. Все дальнейшие симуляционные расчеты, направленные на повышение производительности эжекционной системы водоткачки проводились с выбранным вариантом.

На рис. 5 представлены результаты моделирования с различными углами фаски, расположенной на входе отверстия. Для повышения наглядности, на данном графике демонстрируется изменение производительности водоткачки. Наибольший положительный эффект наблюдается при угле фаски 30°.

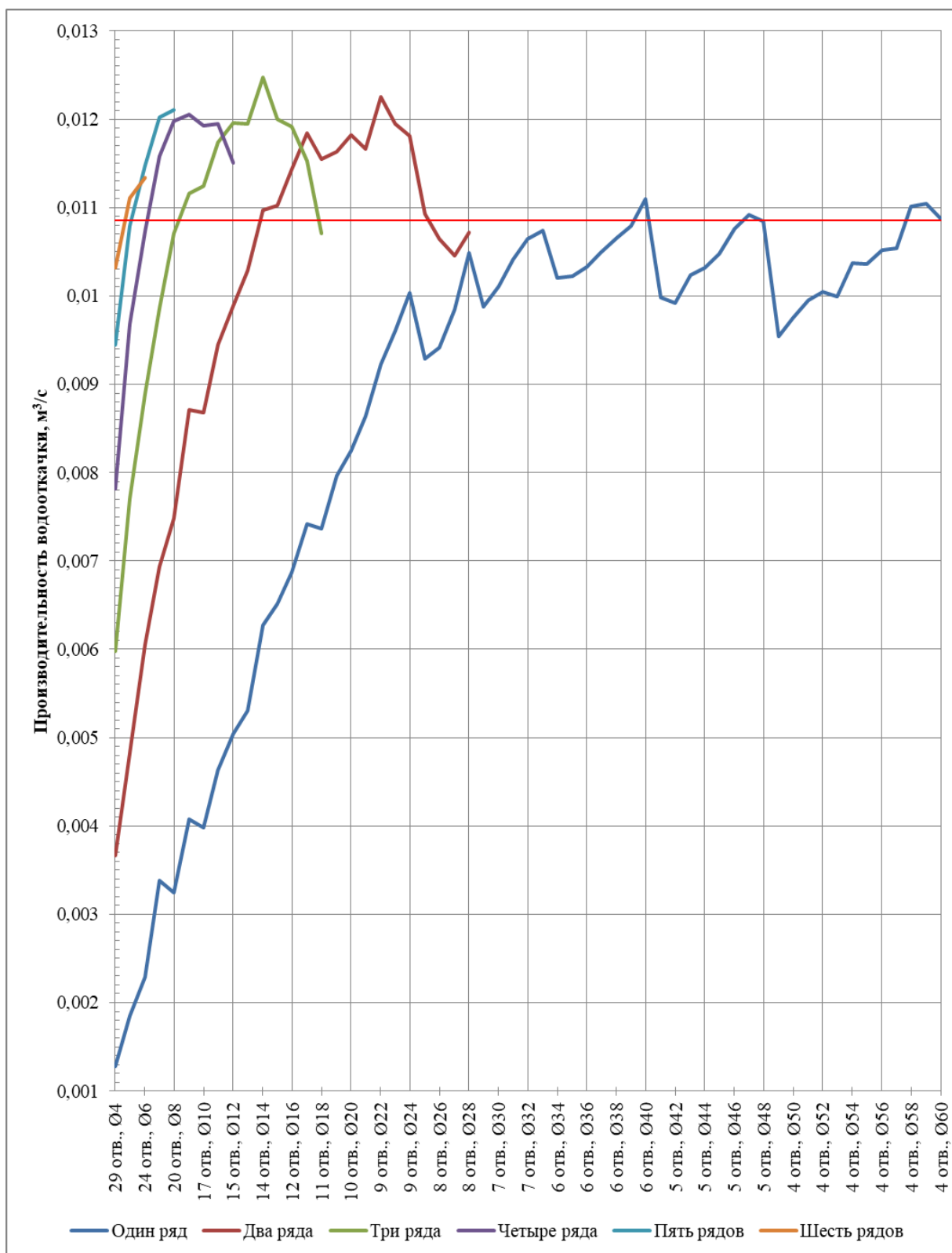


Рис. 4. Зависимость производительности водооткачки от конструктивных параметров: числа рядов, отверстий и их диаметров

Fig. 4. The dependence of the pumping performance on the design parameters: the number of rows, holes and their diameters

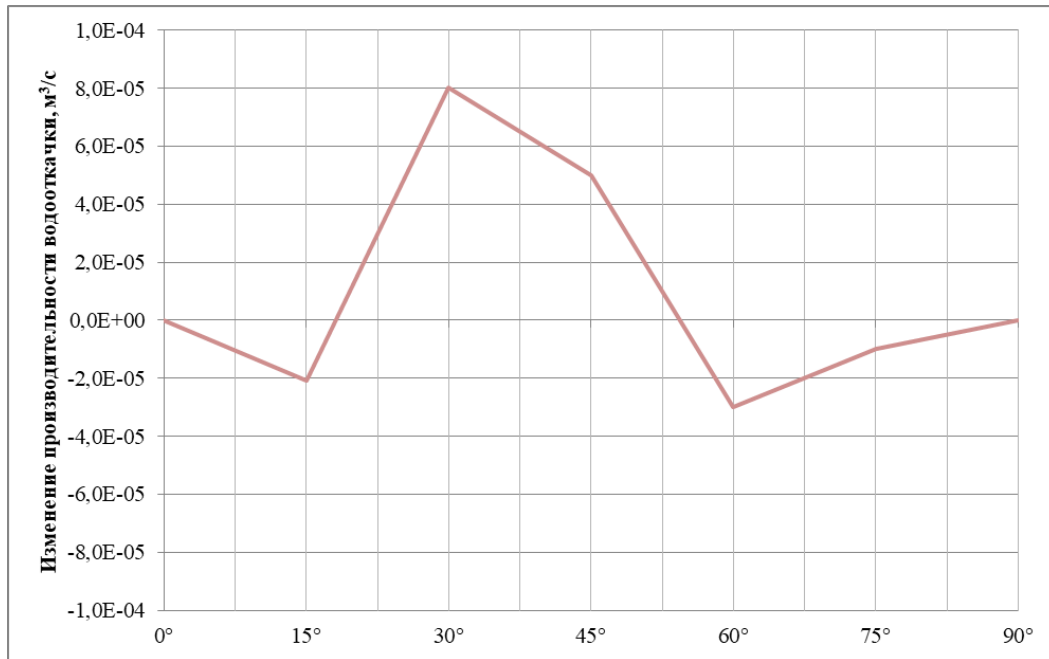


Рис. 5. Зависимость производительности водооткачки от угла фаски на входе отверстия

Fig. 5. The dependence of the pumping performance on the chamfer angle at the inlet of the hole

На рис. 6 представлены результаты моделирования конического отверстия с различными диаметрами входного и выходного сечения.

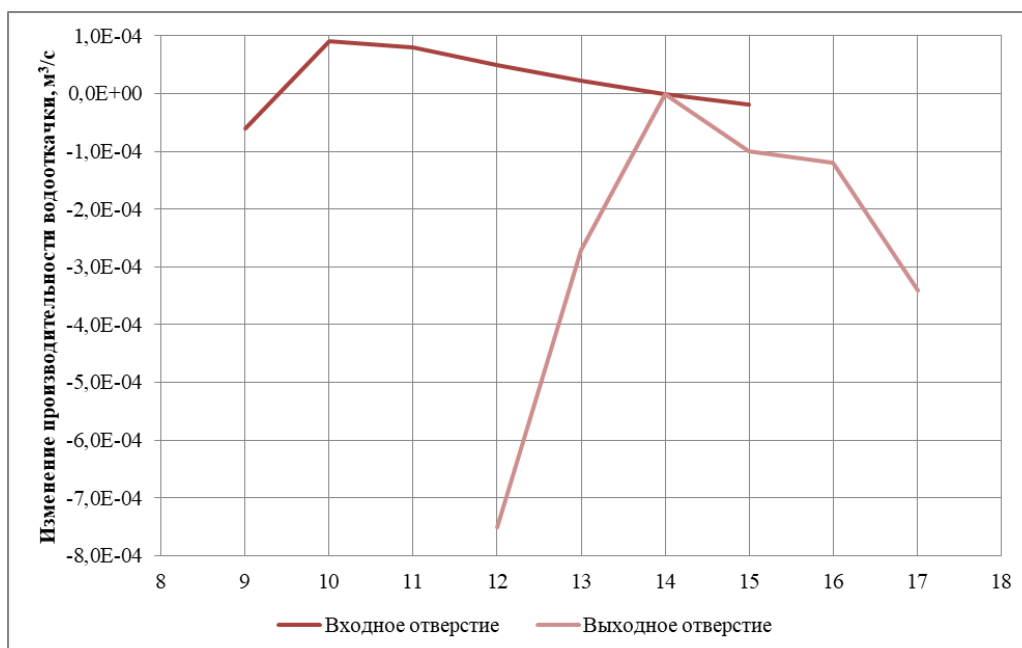


Рис. 6. Зависимость производительности водооткачки от диаметров отверстий

Fig. 6. The dependence of the pumping performance on hole diameters

Как и в предыдущем случае, для повышения наглядности на данном графике демонстрируется изменение производительности водооткачки. Наилучший эффект достигается при диаметре входного отверстия 10 мм и выходного 14 мм. Необходимо отметить, что в рамках работы рассматривались не только круглые, но и прямоугольные отверстия. При таком подходе в напорном патрубке после направляющего аппарата был удален весь материал сектора водооткачки – образовано окно, в дальнейшем туда последовательно вводились продольные

и поперечные ребра, вплоть до величины сторон отверстий – не более 5 мм, но такая конструкция несоизмеримо более сложна в изготовлении, а полученный расход не превышал $0,012 \text{ м}^3/\text{с}$. Также, помимо работ, связанных с определением расположения и конструктивных параметров отверстий в выходном напорном патрубке, в рамках исследования была проведена серия расчетов и достигнуто снижение сопротивления трассы всасывания системы водооткачки в 1,97 раз. Характеристика доработанной эжекционной системы водооткачки приведена на рис. 7. Красная горизонтальная линия – требуемый уровень производительности водооткачки. Совокупность принятых решений позволила обеспечить требуемый уровень производительности эжекционной системы водооткачки при частоте вращения вала водометного движителя более 2812 об/мин. В исходной конструкции при максимальной частоте вращения вала водометного движителя производительность эжекционной системы водооткачки составляла $0,009674 \text{ м}^3/\text{с}$ – требуемый уровень не обеспечивался.

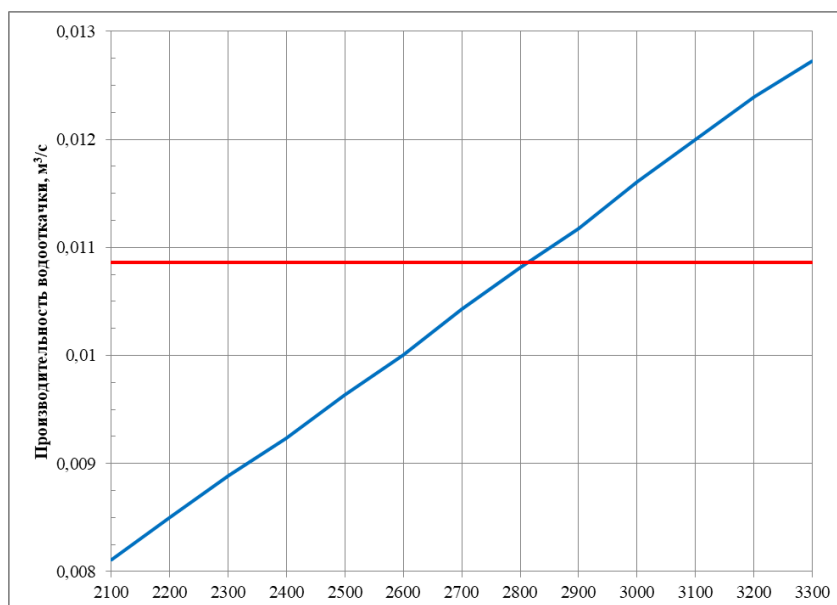


Рис. 7. Зависимость производительности водооткачки от частоты вращения

Fig. 7. The dependence of the pumping performance on the speed of rotation

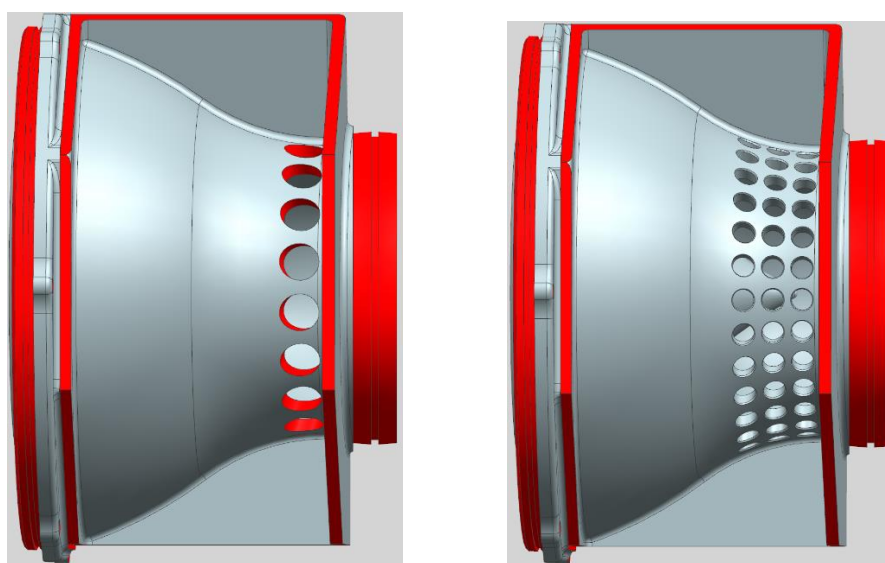


Рис. 8. Исходная и доработанная конструкции напорного патрубка водометного движителя

Fig. 8. Initial and modified design of the pressure pipe of the water jet propulsion

На рис. 8, слева и справа соответственно, представлены исходная и доработанная конструкции напорного патрубка водометного движителя.

Испытания усовершенствованной конструкции эжекционной системы водооткачки

Для проверки усовершенствованной эжекционной системы водооткачки и окончательной валидации расчетной модели проведены испытания по определению производительности водооткачивающих средств при откачке воды, проникшей внутрь корпуса перспективной амфибийной машины при преодолении водной преграды.

В ходе испытаний в полностью укомплектованное изделие заливалось мерное количество воды, частота вращения вала водометного движителя выводилась на максимальный уровень, включались водооткачивающие средства и фиксировалось время их функционирования. При этом, в процессе испытаний, с целью исключения подсоса воздуха, в амфибийной машине обеспечивался уровень воды не ниже входных отверстий трассы всасывания. Расхождение результатов моделирования и проведенных испытаний 5 %, как и в случае с уже существующей эжекционной системой водооткачки серийной амфибийной машины.

Выводы

В рамках данной работы усовершенствована конструкция эжекционной системы водооткачки перспективной амфибийной машины. В результате выполненных исследований:

1) разработаны и верифицированы модели эжекционной системы водооткачки серийной и перспективной амфибийных машин;

2) для эжекционной системы водооткачки перспективной амфибийной машины определены параметры рядов и отверстий, позволяющие обеспечить наибольшую производительность: 3 ряда, 14 отверстий $\text{Ø}14$ с фаской $1 \times 30^\circ$;

3) на основании сравнительного моделирования достигнуто снижение сопротивления трассы всасывания эжекционной системы водооткачки перспективной амфибийной машины в 1,97 раз;

4) производительность эжекционной системы водооткачки перспективной амфибийной машины по сравнению с исходным вариантом увеличена в 1,29 раз, обеспечив требуемый уровень при частоте вращения вала водометного движителя более 2812 об/мин;

5) установлено, что расхождение данных, полученных путем моделирования и в результате проведенных испытаний усовершенствованной конструкции эжекционной системы водооткачки перспективной амфибийной машины, составляет 5 %, что очевидно является завышенным по отношению к реальному в связи со способом фиксации времени функционирования системы при испытаниях вручную.

Библиографический список

1. **Степанов, А.П.** Проектирование амфибийных машин / А.П. Степанов. – М.: Мегалион, 2007. – 420 с.
2. **Степанов, А.П.** Конструирование и расчет плавающих машин / А.П. Степанов. – М.: Машиностроение, 1983. – 200 с.
3. **Егоров, Д.Г.** Самоходные переправочные средства и средства моторизации переправ. Часть II / Д.Г. Егоров, А.А. Муратов, Л.Е. Ходонович. – М.: Издание ВИА, 1965.
4. **Eyres, D.J.** Pumping and piping arrangements / D.J. Eyres, G.J. Bruce // In book: Ship Construction. 2012. DOI: 10.1016/B978-0-08-097239-8.00026-X
5. **Lee, K.W.** Proposed Design Criteria For A Bilge Pumping System: A Case Study Of Large Bulk Carrier / K.W. Lee, G.Y. Han, J.W. Seo, J.H. Choi, M.E. Kim // International Journal of Maritime Engineering. 2022. Vol. 164, No. A3. Pp. 283-293. DOI: 10.5750/ijme.v164iA3.793

6. **Lee, K.W.** Proposed Design Criteria for a Bilge Pumping System for Large Container Ships / K.W. Lee, G.Y. Han, M.E. Kim // International Journal of Maritime Engineering. 2021. Vol. 163, no. A2. DOI: 10.5750/ijme.v163iA2.758
7. **Zhu, F.** Experimental research on similarity deviation between prototype and model pumping systems / F. Zhu, R. Zhang, X. Liu, H. Chen, M. Sun, W. Zhou // Journal of Physics: Conference Series. 2024. Vol. 2707. DOI: 10.1088/1742-6596/2707/1/012028
8. **Saridu, M.** Maintenance of Bilge Pump on Ship Trawl SPL IX Owned PT. Sinar Pesona Laut / M. Saridu, B. Ziliwu // Jurnal Natur Indonesia. 2022. Vol. 20, no. 2. Pp. 35-40. DOI: 10.31258/jnat.20.2.35-40
9. **Prayoga W, B.R.** Prototipe sistem pengendalian dan pemantauan cargo hold bilge kapal dengan metode decision tree berbasis mikrokontroler / B.R. Prayoga W, P. Asri, E.P Hidayat, A.T. Nugraha, D.I.Y. Agna // Jurnal 7 Samudra. 2023. Vol. 8, no. 2. Pp. 25-40. DOI: 10.54992/7samudra.v8i2.130
10. **Karunanayake, M.** Indigenously Designed Addressable Bilge Alarm System for Naval Vessels. / M. Karunanayake, S. Nanayakkara, A. Bamunusungha Aarachchi // Proceedings of the 15th International Research Conference Economic Revival, National Security, and Sustainability through Advancement of Science, Technology, and Innovation, 29-30 September 2022, General Sir John Kotelawala Defense University, Ratmalana, Sri Lanka. 2022. Pp. 100-104.
11. **Pawara, M U.** Bilge System Design on 500 GT Ferry for Bulukumba–Selayar Route / M.U. Pawara, W. Setiawan, R.J. Ikhwan, Alamsyah, A.I. Wulandari, Suardi, A.M. Nugraha A, T. Hidayat, M.I. Anso-ri, F. Mahmuddin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 921. DOI: 10.1088/1755-1315/921/1/012010
12. **Pellegrini, C.** A preliminary investigation on the operational efficiency of centrifugal pumps operating in single-branch, single-pump systems / C. Pellegrini, J. Pedrera-Yanes, O. Llanes-Santiago, G. Vilakta-Alonso // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2024. 46. DOI: 10.1007/s40430-024-04731-2
13. **Huseynli, Z.** Improving the performance indicator of centrifugal pumps // Equipment. Technologies. Materials. 2024. Vol. 19 (06), iss. 01. Pp. 05-14. DOI: 10.36962/ETM19012024-05
14. **McGeorge, H.D.** Pumps and pumping. In book: Marine Auxiliary Machinery. 1995. DOI: 10.1016/B978-0-7506-1843-4.50009-4

*Дата поступления
в редакцию: 13.06.2024*

*Дата принятия
к публикации: 25.10.2024*

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Гай Василий Евгеньевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Кузнецов Георгий Дмитриевич – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Куликов Александр Борисович – ведущий электроник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Куликов Владимир Борисович – ведущий инженер Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Плотников Артем Алексеевич – инженер Арзамасского научно-производственного предприятия «ТЕМП-АВИА»

Хранилов Валерий Павлович – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Шабашов Александр Алексеевич – инженер 1 категории Арзамасского научно-производственного предприятия «ТЕМП-АВИА»

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Богомоллов Дмитрий Евгеньевич – инженер-конструктор 3-й категории АО «ОКБМ Африкантов»

Воробьев Илья Владимирович – студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Горюнов Олег Владимирович – ассистент Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого, канд. техн. наук

Котин Андрей Валерьевич – математик 1 категории ИОЦ Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Кресов Дмитрий Геннадьевич – начальник бюро моделирования, расчетов динамики транспортных РУ АО «ОКБМ Африкантов», д-р техн. наук

Мацин Никита Владимирович – младший научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Рязанов Ренат Рамильевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Семакова Анастасия Андреевна – студент Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого

Соборнов Александр Евгеньевич – старший научный сотрудник Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Терехин Александр Николаевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Абдулов Сергей Владимирович – исполнительный директор – главный конструктор АО «Специальное конструкторское бюро машиностроения» г. Кургана, канд. техн. наук

Аникин Алексей Александрович – начальник НИЛ транспортных машин и транспортных технологических комплексов Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Вахидов Умар Шахидович – заведующий кафедрой Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Вашурин Андрей Сергеевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Держанский Виктор Борисович – ведущий научный сотрудник Института машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН, д-р техн. наук

Дмитриев Павел Евгеньевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Дьяков Алексей Сергеевич – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Капустин Александр Германович – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева им. Р.Е. Алексеева

Колин Александр Андреевич – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Коростелев Сергей Анатольевич – заведующий кафедрой Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, доцент, д-р техн. наук

Кулепов Виктор Федорович – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Макаров Владимир Сергеевич – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Манянин Сергей Евгеньевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Марковнина Алина Ивановна – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева

Молев Юрий Игоревич – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Наумов Валерий Николаевич – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Орлов Лев Николаевич – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Рахимжанов Нуржан Есмагулович – докторант Военной Академии материально-технического обеспечения

Русаков Богдан Владиславович – студент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Сарач Евгений Борисович – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Стадухин Антон Алексеевич – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Тараторкин Игорь Александрович – младший научный сотрудник Института машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН, д-р техн. наук

Трусевич Илья Александрович – инженер-конструктор 1-ой категории, младший научный сотрудник Института машиноведения им. Э.С. Горкунова Уральского отделения РАН, канд. техн. наук

Федоров Дмитрий Сергеевич – студент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ «ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

*Адрес редакции: 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
ауд. 1363-3
e-mail: rsl@nntu.ru*

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляются два печатных экземпляра статьи и комплекты сопроводительной документации: бумажный и электронный.
- Рекомендуемый объем статьи не превышает 15 страниц текста. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 7; **минимальный объем статьи – 0,5 п.л.**
- **Статью необходимо сопроводить** актом и протоколом экспортного контроля, экспертным заключением о возможности открытого опубликования, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию.
- **Печатные экземпляры** статей должны быть подписаны всеми авторами.
- **Первая страница** статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в порядке, отражающем их авторский вклад); аннотацию, ключевые слова.
- **Аннотация** (120-150 слов) отражает перечисление результатов и ключевых выводов, обозначение новизны и сферы применения.
- **Ключевые слова** (не менее 10) отражают тематическую направленность, объект и результаты исследования.
- Изложение материала должно быть логически выстроенным. **Тематика** представленного исследования должна **строго соответствовать рубрике журнала и паспорту специальности ВАК**. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), **библиографический список, содержащий только цитируемые или рассматриваемые в тексте работы**. Ссылки нумеруются в порядке цитирования. **Самоцитирование** рекомендуется **ограничить тремя пунктами**. Рекомендуется использовать в библиографическом списке ссылки на научные работы по теме исследования, индексируемые в международных базах научного цитирования. Библиографический список не должен включать неопубликованные работы.
- К статье необходимо **приложить файл с информацией об авторах** на русском языке: ФИО (полностью), должность, место работы (полное название организации, город, страна), идентификатор ORCID, e-mail, ученая степень и звание.
- Текст набирается через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое, верхнее и нижнее – 20 мм. Переносы не допускаются. Используется формат *Word for Windows* и стандартные шрифты *Times New Roman* и *Symbol*.
- Формульные выражения выполняются строго в редакторе MS Equation 3-12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается. Использованию аббревиатур должна предшествовать их расшифровка.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы: (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel. Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображения выполняются в формате jpg или tif с разрешением 300 dpi. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисуночная подпись 11 жирный кегль, ссылки на рисунки: (рис. 1).

РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПРИНИМАЮТСЯ:

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации

2.3.8 – Информатика и информационные процессы

Валерий Павлович Хранилов: [**hranilov@nntu.ru**](mailto:hranilov@nntu.ru)

**2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл,
радиационная безопасность**

Максим Александрович Легчанов: [**legchanov@nntu.ru**](mailto:legchanov@nntu.ru)

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Юрий Игоревич Молев: [**rsl@nntu.ru**](mailto:rsl@nntu.ru)

16+

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 4 (147)

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**

Редакция:

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

rsl@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать: 03.12.2024 Дата выхода в свет 16.12.2024. Формат 60x84 ¹/₈.

Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 8,50. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.

Типография НГТУ.

Адрес университета и типографии:

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24