

ISSN 1816-210X

ТРУДЫ НГТУ

ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

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

ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Журнал издается с 2010 года

№ 4 (139)

Нижний Новгород 2022

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2022. № 4 (139). – 138 с.

Выходит 4 раза в год

Журнал включен ВАК при Минобрнауки России

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

Главный редактор А.А. Куркин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

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

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

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

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

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

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

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

УДК 050(06)
ББК 9я54

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

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

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

Published since 2010

№ 4 (139)

Nizhny Novgorod 2022

The journal is issued 4 times a year

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

Editor-in-Chief A.A. Kurkin

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

EDITORIAL COUNCIL

Chairman

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

Members of Editorial Council

Pelinovski Dmitri

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

László Palkovics

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Péter Várlaki

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Vijay Kumar Chakka

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

Yalciner Akhmet

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

EDITOR AND PUBLISHER:

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev»
(603950, Nizhny Novgorod, Minin Street, 24)

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ	7
Багиров М.Б. Метод повторной идентификации объектов в многокамерных системах с низким энергопотреблением с использованием иерархических нейронных сетей	7
Головушкин Н.А., Катаева Л.Ю. Анализ и алгоритм оценки свойств коричневого углерода по данным спутниковых и наземных измерений с применением метода Монте-Карло	20
Карпычев В.Ю. Моделирование информационной безопасности: проблемы и решения	28
Мухин А.В. Статическая стабилизация неустойчивых матриц линейных систем с помощью скалярных регуляторов	37
Пальгубев Д.А. Анализ структуры специализированной системы обмена и обработки радиолокационной информации с точки зрения импортозамещения и закрытости от внешней среды	46
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ	56
Бликов А.О., Яндубаев Г.С., Мочалов М.А., Ерунов С.В., Огородников В.А. О гидродинамических двойниках взрывных нагружающих устройств для исследования экстремальных состояний плазмы	56
Полуничев В.И., Новиков Д.И., Дюжий М.А. Исследование процессов образования и переноса водорода в первом контуре водо-водяных реакторов с газовой системой компенсации давления и его химического взаимодействия с конструкционными материалами	66
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	77
Антонян А.В. Метод защиты электробуса большого класса от бокового опрокидывания	77
Жителев Д.А., Поздняков Т.Д., Сулегин Д.А., Наумов В.Н. Исследование экспериментального и численного поведения тонкостенных труб при квазистатическом режиме нагружения ...	85
Карасева С.А. Разработка методики расчета и выбор рациональных параметров роторно-винтовых движителей снегоболотоходных амфибийных машин	97
Чжэн Х., Котиев Г.О., Косицын Б.Б., Газизуллин Р.Л. Энергоэффективное распределение подводимой мощности к колесам планетохода при прямолинейном движении с ограничением свободной тяги движителя	113
Шурашов А.Д., Малыгин А.Л., Никандров И.С., Краснов Ю.В. Исследование зачерпывания грейфера при перегрузке смерзшегося флотационного серного колчедана	124
НАШИ АВТОРЫ	133

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS	7
Bagirov M.B. A method for low-power multi-camera object re-identification using hierarchical neural networks	7
Golovushkin N.A., Kataeva L.Yu. Monte-Carlo method-based analysis and algorithm for brown carbon property evaluation using satellite and ground measurements	20
Karpychev V.Yu. Cyber security modeling: issues and options	28
Mukhin A.V. Static stabilization of unstable matrices in linear systems using scalar controllers ...	37
Palguez D.A. Analysis of a dedicated radar data exchange and processing system in terms of import phase-out and isolation from the environment	46
 ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES	 56
Blikov A.O., Yandubaev G.S., Mochalov M.A., Erunov S.V., Ogorodnikov V.A. On hydrodynamic twins of explosive loading devices for investigating the extreme states of plasmas	56
Polunichev V.I., Novikov D.I., Dyuzhiy M.A. The research of hydrogen generation and transition in the primary circuit of pressurized water reactors with gas pressurizer system and its chemical interaction with structural materials	66
 MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION	 77
Antonyan A.V. The method for protection of a large class electric bus from side dumping	77
Zhitelev D.A., Pozdnyakov T.D., Sulegin D.A., Naumov V.N. The research of experimental and numerical performance of thin-walled tubes at quasi-static load conditions	85
Karaseva S.A. Development of calculation procedure and choice of practical parameters of rotary-screw ropulsion units of snow and swamp-going amphibious vehicles.....	97
Zheng H., Kotiev G. O., Kositsyn B. B., Gazizullin R. L. Energy efficient distribution of power delivered to planetary rover wheels at straight-line motion with limited free thrust of its propulsion unit	113
Shurashov A.D., Malygin A.L., Nikandrov I.S., Krasnov Yu.V. The research of grab scooping when offloading frozen sulphur pyrite flotation	124
 AUTHORS	 133

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 004.932

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_7

МЕТОД ПОВТОРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ В МНОГОКАМЕРНЫХ СИСТЕМАХ С НИЗКИМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЕРАРХИЧЕСКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

М.Б. БагировORCID: 0000-0003-1656-0849 e-mail: bagirov_mirabbas@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлена новая модель иерархических нейронных сетей для решения задачи повторной идентификации объекта (reID). Предложена иерархическая архитектура DNN, использующая метки атрибутов в обучающем наборе данных с целью повышения эффективности поиска объектов. Применяется библиотека C++ глубинного обучения tiny-DNN, разработанная для условий ограниченных ресурсов. На каждом узле иерархии tiny-DNN идентифицирует разные атрибуты изображения, на каждом конечном узле проводится реидентификация подмножества датасета с изображениями, состоящими только из изображений с атрибутами, идентифицированными по конкретному пути от корня к листу. Изображение запроса реидентифицируется сразу после обработки с помощью нескольких tiny-DNN. Проведен анализ эффективности предложенного решения. Использованы два набора данных изображений: VRAI для повторной идентификации транспортных средств и Market-1501 для повторной идентификации человека. Для оценки точности разработанного метода используется метрика ранжирования (Rank-1) и средней точности (mAP). Предложенный метод повторной идентификации объектов имеет наименьшее время запроса и энергопотребления при реализации на устройствах Raspberry Pi 3 и NVIDIA Jetson Nano. В результате сравнения разработанного метода с существующими вариантами анализа объектов на видеопотоке и повторной идентификации объектов показано, что, несмотря на потерю точности в среднем 4 %, разработанный подход обеспечивает значительную экономию ресурсов: в среднем требует на 74 % меньше памяти, на 72 % снижается объем производимых операций, на 67 % сокращено время задержки обработки запросов, что в целом приводит к снижению энергопотребления на 65%.

Ключевые слова: низкое энергопотребление, реидентификация, глубокие нейронные сети, иерархическая структура, компьютерное зрение.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Багиров, М.Б. Метод повторной идентификации объектов в многокамерных системах с низким энергопотреблением с использованием иерархических нейронных сетей // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 7-19. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_7

A METHOD FOR LOW-POWER MULTI-CAMERA OBJECT RE-IDENTIFICATION USING HIERARCHICAL NEURAL NETWORKS

M.B. BagirovORCID: 0000-0003-1656-0849 e-mail: bagirov_mirabbas@mail.ruNizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The novel model of hierarchical neural networks is provided to address the problem of object re-identification (reID). The proposed is DNN hierarchical architecture that uses attribute labels in the training data set to increase the efficiency of object search. A tiny-DNN deep learning C++ library designed for resource constrained environment is applied. In each hierarchy node, a tiny-DNN identifies different image attributes. In each bottom hierarchy

node, a subset of image dataset containing only images with attributes identified by the specific path from the root to a leaf is re-identified. The query image is re-identified immediately following processing with several tiny-DNNs. The efficiency of the proposed solution is analyzed. Two image datasets are used: VRAI for re-identification of vehicles and Market-1501 for person re-identification. To assess the precision of the developed method, ranking accuracy (Rank-1) and mean Average Precision (mAP) metrics are used. When implemented on Raspberry Pi 3 and NVIDIA Jetson Nano devices, the proposed method for object re-identification provides the shortest query time and the lowest power consumption. In comparison to existing methods of detecting objects in a video stream and of object re-identification, the developed method, although demonstrating average loss in precision by 4 %, provides significant resource savings. It enables, in average, less memory usage by 74%, less operating intensity by 72 %, shorter timeout for processing of queries by 67 %, which altogether lead to lower power consumption by 65 %.

Key words: low power consumption, re-identification, deep neural networks, hierarchical structure, computer vision.

FOR CITATION: M.B. Bagirov. A method for low-power multi-camera object re-identification using hierarchical neural networks. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. Pp. 7-19.
DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_7

Введение

Повторная идентификация объекта (реидентификация) является важной задачей компьютерного зрения. Методы повторной реидентификации могут использоваться для повышения общественной безопасности [1], управления большим количеством скопления людей, обнаружения требуемых событий при наблюдении с помощью нескольких камер [2]. Системы реидентификации могут быть развернуты на уже встроенных устройствах (дорожные камеры и беспилотные летательные аппараты) [3]. Вычислительные ресурсы для них ограничены, а энергоэффективность реализованных технологий имеет решающее значение. Исследования показывают, что существующие методы идентификации объектов не подходят для встраиваемых устройств, ориентированных на тяжелые глубокие нейронные сети, требующие больших вычислительных ресурсов и памяти [4].

Алгоритм, реализуемый в существующих методах, показан на рис. 1. Big-DNN извлекает вектор объектов из исходного изображения, затем он сравнивается с векторами объектов каждого изображения из датасета (рис. 1, изображения а-г), с использованием метрики евклидова расстояния, изображения из датасета ранжируются в зависимости от их расстояния до объекта поиска. При этом выполняется множество избыточных операций, поскольку объект поиска сравнивается с каждым изображением из датасета. Но изображение запроса (белый автомобиль с люком на крыше) достаточно сравнить только с другими белыми автомобилями с люками на крыше, что соответствует изображениям из датасета б и г (рис. 1).

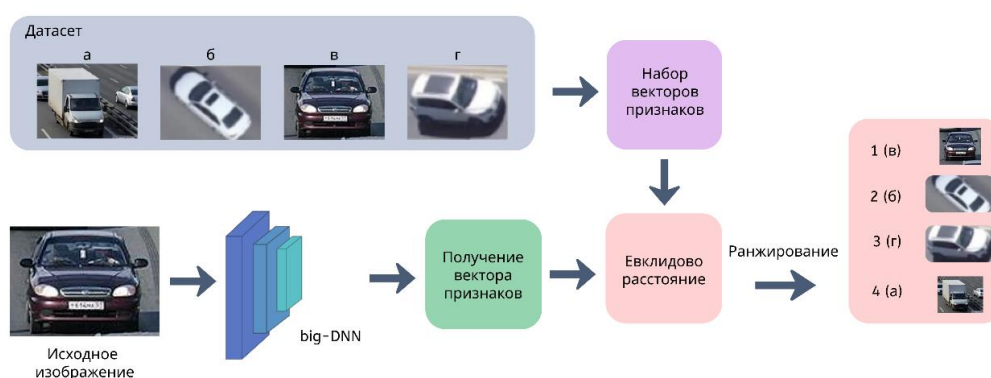


Рис. 1. Алгоритм сравнения набора характеристик исходного изображения с извлеченными векторами объектов для каждого изображения из датасета, требующий больших вычислительных затрат

Fig. 1. The algorithm for comparison of source image profile with extracted object vectors for every image from dataset requiring high computational efforts

В работе предлагается использовать иерархическую модель DNN для идентификации объектов с одинаковыми атрибутами (цвет, кузов, наличие люка на крыше и т.д.) для повышения точности и уменьшения количества операций за счет устранения избыточных. Иерархическая DNN-архитектура использует несколько DNN в форме иерархии для сокращения избыточных операций в компьютерном зрении. При этом возникают проблемы, связанные с их использованием для эффективного распознавания объектов. Для их решения в данной работе предлагается использовать иерархическую архитектуру DNN с модификацией метрик подобия и метода определения иерархической структуры.

В рассматриваемой архитектуре DNN каждый узел иерархии содержит tiny-DNN (модель нейронной сети, извлекающая вектор признаков из исходного изображения и передающая его последующим ветвям) (рис. 2). Исходное изображение обрабатывается первой tiny-DNN для получения вектора объекта, которая определяет, есть ли в крыше автомобиля люк. После того, как первой DNN изображение запроса классифицируется как транспортное средство с люком на крыше, датасет уменьшается до изображений б, в и г. Следующая DNN в иерархии продолжает обрабатывать вектор признаков и идентифицирует цвет транспортного средства. Эта классификация сводит множество изображений к двум (рис.1, б и г). Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнут конечный узел. Вектор объектов из конечной DNN используется для выполнения сравнений с остальными изображениями из датасета для повторной идентификации объекта, которые содержат объекты с атрибутами, указанными в запросе. Поскольку каждая tiny-DNN специализируется на обработке только подмножества объектов (с определенными атрибутами), достигается высокая точность распознавания объектов.

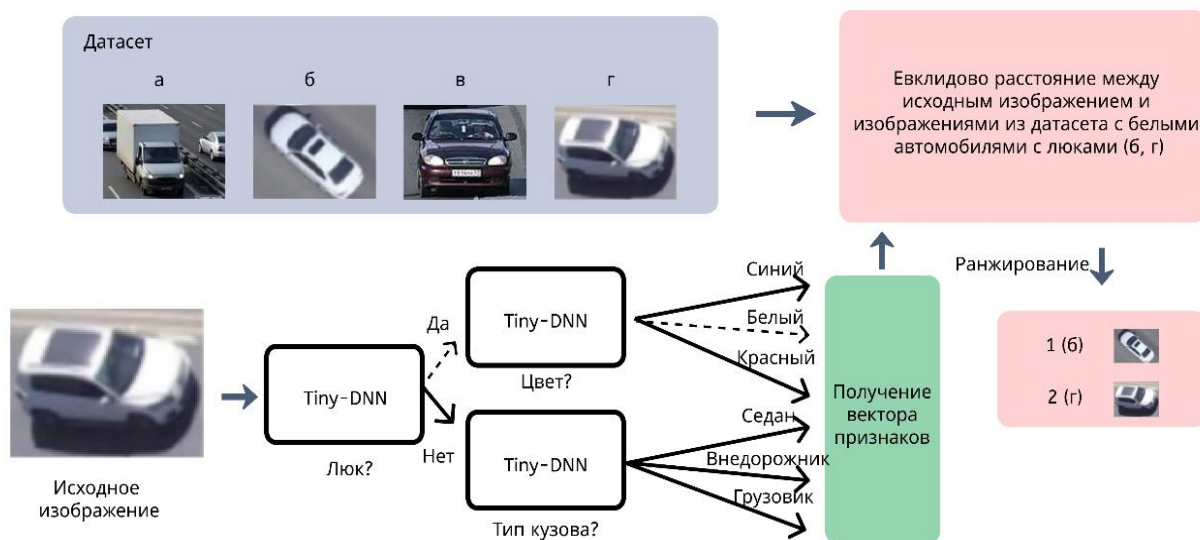


Рис. 2. Иллюстрация предлагаемого метода

Fig. 2. Illustration of the proposed method

В работе приводятся результаты экспериментов по реидентификации двух типов объектов: транспорта и людей, показывающие значительное снижение требований к потребляемым ресурсам: памяти – на 74-97 %, времени задержки запросов – на 67-89 %, количества операций – на 72-93 % и энергопотребления – на 65-88 %. Эксперименты проводились на двух встроенных устройствах: RaspberryPi 3 и NVIDIA JetsonNano (результаты измерений, на основе которых сделаны данные выводы, и их подробное описание приведены в разделе 4).

2. Анализ работ в области применения иерархических глубоких нейронных сетей

Иерархические DNN используют несколько DNN, организованных в древовидную структуру [7], где входной сигнал зависит от пути, по которому он следует от корня к листу дерева (рис. 2). В последнее время эти методы используются для решения задачи классификации на каждом уровне дерева, чтобы уменьшить размерность задачи и повысить эффективность работы алгоритмов [8]. Иерархические архитектуры DNN строятся с использованием визуальных [9] или семантических сходств [10]. Однако эти методы неприменимы к реидентификации объектов. Иерархии, основанные на визуальном сходстве, необходимо переобучать каждый раз, когда встречается новый, ранее не распознанный объект. Между тем иерархии, основанные на семантическом сходстве, несут значительные потери в точности распознавания при их применении для решения задач компьютерного зрения. Для устранения этих недостатков предложено использовать комбинацию визуальных и семантических сходств, при этом показано, что такая комбинация хорошо подходит для эффективного поиска объектов.

При повторной идентификации объекта задача состоит в том, чтобы определить, существует ли объект в базе изображений объектов, которые появлялись ранее. Известны два популярных метода выполнения повторной идентификации объекта:

1) глобальные векторы: используются DNN для получения общего вектора объекта для каждого изображения [11];

2) локальные векторы признаков: объединяются несколько меньших векторов объектов (например, различные части кузова/транспортного средства), чтобы сформировать единый общий вектор объектов для каждого изображения.

В дополнение к векторам признаков некоторые методы используют вспомогательную информацию (например, атрибуты или синтетические изображения) для повышения точности повторной идентификации. Методы, использующие вспомогательные векторы объектов, часто требуют наборов данных, аннотированных метками атрибутов. Можно отметить, что квантование DNN уменьшает потребность в памяти, а сокращение DNN с помощью обрезки весов позволяет сократить количество операций. Применение такого подхода повышает эффективность существующих методов, но при этом, как правило, снижают точность распознавания объектов. В настоящее время не существует решений по использованию иерархических DNN для снижения энергопотребления при повторном распознавании объектов на встроенных устройствах.

Разработанный метод, применяющий глобальные функции и вспомогательную информацию для построения иерархии *tiny*-DNN для повторной идентификации объектов на встроенных устройствах с низким энергопотреблением, использует как семантические, так и визуальные сходства для построения иерархий для повторной идентификации объектов. Он обеспечивает высокую точность при низких требованиях к ресурсам за счет использования *tiny*-DNN, которые специализируются на обработке небольшого подмножества предложенных изображений из датасета. Проведенные эксперименты показывают, что разработанный метод эффективнее существующих методов с точки зрения требуемой памяти, количества операций и энергопотребления.

3. Описание модели нейронной сети для реидентификации объекта

Предлагаемый метод использует несколько *tiny*-DNN, которые извлекают векторы объектов из изображения-запроса и идентифицируют атрибуты, чтобы свести первоначальный датасет к новому меньшему подмножеству изображений. Чтобы построить иерархию сети, необходимо определить, какие атрибуты идентифицируются, и порядок, в котором они идентифицируются.

На рис. 3 показаны примеры изображений из набора данных Market-1501 с некоторыми их атрибутами. Идентификация всех атрибутов на изображениях не требуется.



Рис. 3. Примеры изображений в наборе данных Market-1501 с некоторыми их атрибутами

Fig. 3. Examples of images in the Market-1501 dataset with some of their attributes

Например, если большинство людей в базе данных, которые носят рюкзак, в то же время не носят сумку через плечо, идентификация того, носит ли человек сумку через плечо, скорее всего, будет излишней, если будет идентифицировано ношение рюкзака. Предложенный метод использует корреляции, чтобы определить, какие из атрибутов действительно следует идентифицировать. Под корреляцией понимается вероятность нахождения двух атрибутов на одном и том же объекте. Сильно коррелированные атрибуты не обязательно идентифицировать в одном и том же пути в иерархии, поскольку ожидаемое уменьшение мощности множества датасета будет невелико.

На рис. 4 а) и б) показаны векторы признаков, полученные с использованием предварительно обученной big-DNN для изображений в наборе данных Market-1501. Контуры добавляются к кластерам, чтобы подчеркнуть разную сложность идентификации атрибутов. Атрибуты с более четкими кластерами (например, пол) легче идентифицировать, чем другие (например, ношение сумки). В наборе данных Market-1501 мужчины и женщины визуально не похожи, но людей с сумками и без них трудно отличить. Следовательно, гендерная классификация должна выполняться ближе к корню иерархии. Это обусловлено тем, что tiny-DNN могут идентифицировать визуально непохожие атрибуты наиболее точно. Кроме того, сложные классификации объектов становятся ближе к верхним уровням иерархии, поскольку классификации выполняются уже на подмножествах изображений их датасета. Рис. 4 иллюстрирует сложность идентификации наличия сумок, когда датасет: б) – содержит все изображения, в) – только изображения женщин и г) – только изображения женщин в платьях. Сложность распознавания наличия сумок снижается, когда задача решается на меньшем количестве изображений в датасете. Чтобы гарантировать, что tiny-DNN могут точно выполнять повторную идентификацию объекта, необходимо определить порядок, в котором идентифицируются атрибуты.

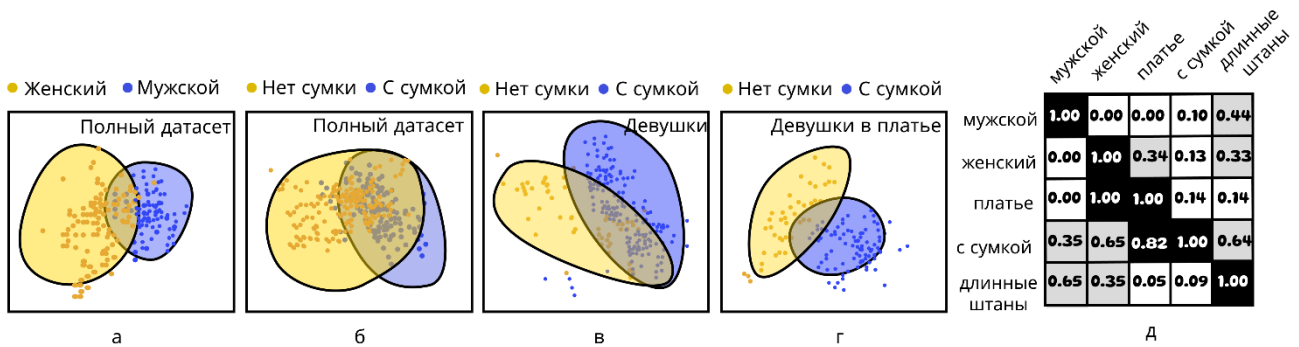


Рис. 4. Векторы признаков, полученные с использованием big-DNN для изображений в наборе данных Market-1501:

а), б) векторы признаков (после анализа основных компонент) изображений из всего обучающего датасета Market-1501 распределены по а) полу, б) ношению сумки; в), г) векторы признаков подмножеств датасета Market-1501 распределены на: в) только женщины, г) только женщины в платьях;

д) – выдержка из корреляционной матрицы для Market-1501, показывающая вероятность того, что у человека есть атрибут j, если у него есть атрибут i

Fig. 4. Feature vectors extracted using big-DNN for Market-1501 dataset images:

a), b) feature vectors (after principal component analysis) of images from the entire Market-1501 training dataset are categorized by a) gender, b) bag carrying; c), d) feature vectors of Market-1501 dataset subsets are categorized into: c) only women, d) only women wearing a dress; e) an extract from a cross-correlation matrix for Market-1501 showing that the person is likely to have attribute «j» if they have attribute «i».

Определим количественные оценки сложности идентификации и корреляции атрибутов. Чтобы определить, какой атрибут идентифицирован в корне, а также порядок последующих классификаторов атрибутов в иерархии, необходимо количественно оценить сложность идентификации. Более простую идентификацию атрибутов будем выполнять ближе к корню иерархии. Такой порядок целесообразен, поскольку иерархические DNN распространяют векторы выходных объектов от родительского элемента к дочернему. Каждая ветвь иерархической DNN представляет более глубокую DNN (имеющую большее количество уровней).

Чтобы измерить сложность классификации атрибутов, будем использовать линейную процедуру оценки *estimation procedure*. Линейный классификатор обучается на векторах признаков предварительно обученной DNN, при этом ошибка валидации используется для измерения сложности классификации. Атрибуты с большими ошибками валидации труднее классифицировать. Сортировка атрибутов по ошибке валидации позволяет создавать ранжированный список атрибутов на основе их сложности. Для набора данных Market-1501 пол является атрибутом с наивысшим рангом с линейной ошибкой классификации, равной 0,08, а наличие сумки – атрибут низшего ранга с линейной ошибкой классификации, равной 0,23. Атрибут с наивысшим рангом определяется в корне дерева. Последующие идентификации атрибутов для каждой ветви дерева определяются с использованием комбинации сложности идентификации и корреляций атрибутов.

Таким образом, первая классификация атрибутов (т.е. выбора атрибута с наивысшим рангом) иерархии определяется после количественной оценки сложности идентификации атрибутов. Затем для каждой ветви дерева необходимо определить, какие атрибуты классифицировать. Для этого выполняется рекурсивное получение корреляций между различными атрибутами. Сильно положительно и сильно отрицательно коррелированные атрибуты не идентифицируются в одной и той же ветви. Корреляционная матрица $C(i, j)$, фрагмент которой приведен на рис. 4 д), показывает корреляцию $P(j | i)$ между парами атрибутов – вероятность того, что у человека есть атрибут j, если у того же человека также есть атрибут i (1):

$$C(i, j) = P(i) = \frac{P(i, j)}{P(i)}, \quad (1)$$

Каждая запись матрицы $C(i, j)$ получается путем деления количества изображений обучающего набора данных, содержащих атрибуты i и j , на количество изображений обучающего набора данных, содержащих атрибут i . Большое значение элемента матрицы $C(i, j)$ указывает на высокую положительную корреляцию между атрибутами i и j (например, $C(\text{платье}, \text{женщина}) = 1,00$). Малое значение $C(i, j)$ указывает на то, что i и j имеют высокую отрицательную корреляцию (например, $C(\text{платье}, \text{мужчина}) = 0,00$). Корреляционная матрица вычисляется в каждом узле дерева для каждого атрибута k относительно набора атрибутов от i до j , которые уже были идентифицированы по пути от корня к узлу: $C(i...j, k) = P(k | i...j)$.

Значение корреляционной матрицы можно пояснить на примере. Следуя гендерной классификации, определение того, одет ли человек в платье, полезно только в том случае, если человек женского пола ($C(\text{женщина}, \text{платье}) = 0,34$). Идентификационный адрес не полезен для мужчин ($C(\text{мужчина}, \text{платье}) = 0,00$). Выполнение классификации одежды для мужчин не помогает уменьшить размер выборки из датасета, это избыточная операция. Идентификация атрибутов, которые имеют низкую корреляцию с ранее определенными атрибутами, уменьшает количество избыточных операций. Если имеется несколько неидентифицированных атрибутов с низкой корреляцией, атрибут с наивысшим рангом (самый простой для идентификации) выбирается в качестве следующей классификации атрибутов. Если нет неидентифицированных атрибутов с низкой корреляцией, классификация атрибутов больше не выполняется (конечный узел). Чтобы реализовать это, рассматриваем атрибуты с $C(i, j) \in [0,3, 0,7]$ как слабо коррелированные.

Предлагаемый метод повышает эффективность для общего случая, определяя только те атрибуты, которые слабо коррелируют с ранее идентифицированными атрибутами. Рассмотрим пример: в Market-1501 большинство мужчин не носят сумок ($C(\text{мужчина}, \text{сумка}) = 0,10$). Для повторной идентификации всех мужчин (с сумками или без них) определяются другие атрибуты (например, возраст), чтобы уменьшить размер выборки из датасета. Таким образом, для общего случая, т.е. мужчин без сумок, выполняется меньше избыточных операций. Как только структура иерархии определена, DNN строятся для каждого узла иерархии. При этом каждая DNN выполняет две задачи: извлекает векторы признаков и идентифицирует атрибуты. Каждый узел иерархии специализируется на обработке и повторной идентификации изображений из датасета. Архитектуры DNN необходимо выбирать таким образом, чтобы каждая DNN могла выполнять задачи точно и эффективно. Архитектуры big-DNN дают большую точность классификации, используя при этом больше ресурсов. Чтобы получить приемлемый компромисс между точностью и эффективностью модели, применим метод поиска архитектуры нейронной сети, где в качестве метрики используется изменение плотности точности для оценки выбора DNN (D_{i+1}) с $i+1$ слоями вместо DNN (D_i) с i слоями. Метрика изменения плотности точности определяется следующим образом:

$$\Delta D(D_i, D_{i+1}) = \frac{a_{i+1} - a_i}{m_{i+1} - m_i}, \quad (2)$$

где a_i и m_i – точность и требования к памяти для D_i соответственно. Этот метод увеличивает размер DNN по одному слою за одну итерацию и вычисляет $\Delta D(D_i, D_{i+1})$ до тех пор, пока не достигнет точки убывающей отдачи от точности ReID и точности классификации атрибутов с более крупными моделями. В работе в качестве a_i выбираем среднее значение средней точности ReID и точности классификации атрибутов.

Каждая модель HC tiny-DNN следует структуре плотного блока из DenseNet [12] из-за ее способности извлекать векторы информативных признаков. Корень иерархии использует ядро свертки $7 \times 7 \times 64$ с шагом 2 и слой $\text{maxpool } 2 \times 2$ для понижения дискретизации изображения. Каждый последующий слой является «плотным слоем», т.е. слоем, содержащим последовательность операций $1 \times 1 \times 128$ и $3 \times 3 \times 32$. Количество последующих плотных слоев опре-

деляется методом поиска нейронной архитектуры (NAS) [13]. Векторное усреднение используется для изменения размера тензоров перед извлечением вектора признаков 128×1 и выходных данных классификации. Карта активации перед слоем среднего пула используется в качестве входных данных для выбранной дочерней DNN. Каждая дочерняя DNN следует одной и той же структуре плотных слоев. В табл. 1 приведены примеры DNN, полученные данным методом.

Для обучения DNN иерархии используется метод обратного распространения ошибки. При этом будем использовать две функции потерь: тройную потерю с пакетным жестким майнингом для обучения DNN для извлечения вектора признаков таким образом, чтобы векторы признаков одного и того же объекта были похожи; кросс-энтропийную потерю – для выполнения классификации атрибутов.

Таблица 1.

DNN, построенные для набора данных Market-1501, обеспечивающие компромисс между точностью и эффективностью. Корневая DNN содержит 3 плотных слоя

Table 1.

DNNs built from Market-1501 dataset enabling precision and efficiency trade-off. The root DNN contains 3 dense layers

Root (пол)	Child 1 (длина штанов)	Child 2 (возраст)
conv $7 \times 7 \times 64$ maxpool 2×2	maxpool 2×2	maxpool 2×2
conv $1 \times 1 \times 128$ conv $3 \times 3 \times 32$	conv $1 \times 1 \times 128$ conv $3 \times 3 \times 32$	conv $1 \times 1 \times 128$ conv $3 \times 3 \times 32$
conv $1 \times 1 \times 128$ conv $3 \times 3 \times 32$	conv $1 \times 1 \times 128$ conv $3 \times 3 \times 32$	conv $1 \times 1 \times 128$ conv $3 \times 3 \times 32$
conv $1 \times 1 \times 128$ conv $3 \times 3 \times 32$	conv $1 \times 1 \times 128$ conv $3 \times 3 \times 32$	conv $1 \times 1 \times 128$ conv $3 \times 3 \times 32$
avgpool	avgpool	conv $1 \times 1 \times 128$ conv $3 \times 3 \times 32$
Output2: 4×1 Output1: 128×1	Output2: 4×1 Output1: 128×1	avgpool
		Output2: 4×1 Output1: 128×1

Обе метрики оценки потерь используются отдельно, потому что они требуют разных конфигураций обучающей партии. Сначала DNN обучается с потерей триплетов для извлечения вектора признаков. Затем параметры извлечения вектора признаков замораживаются (не обновляются с помощью обратного распространения), а последующие слои классификации обучаются с помощью функции кросс-энтропийных потерь. DNN в иерархии обучаются в корневом порядке: сначала обучается корневой DNN, затем его дочерние элементы и так далее. Процесс реализации метода реидентификации объекта заключается в следующем. Изображения из датасета сначала обрабатываются обученной иерархической DNN. Атрибуты назначаются изображениям из датасета DNN, если атрибуты недоступны. Как видно на рис. 2, новое изображение запроса обрабатывается корневой DNN для извлечения вектора признаков и выполнения классификации атрибутов для выбора следующей DNN, затем вектор признаков обрабатывается выбранной DNN. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнут конец иерархии. В проведенных экспериментах в качестве метрики расстояния для сопоставления используется евклидово расстояние, при этом измеряем расстояние только между изображением запроса и изображениями из датасета, которые содержат обнаруженные атрибуты, чтобы повторно идентифицировать объект. Часть полученной иерархии для набора данных Market-1501 изображена на рис. 5. Каждое изображение проходит один путь от корня дерева к листу. Разные пути определяют разные атрибуты.

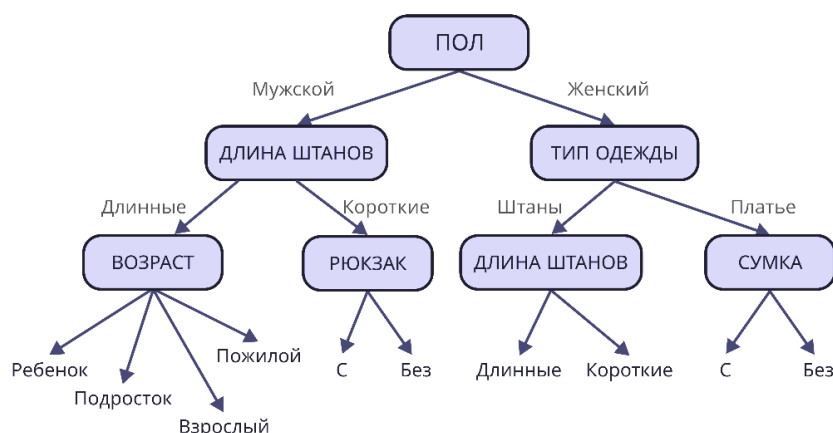


Рис. 5. Три уровня полученной иерархии для выполнения повторной идентификации человека из набора данных Market-1501

Fig. 5. Three levels of the resulted hierarchy to perform person re-identification in the Market-1501 dataset

Разные пути могут идентифицировать одни и те же атрибуты (например, «длина брюк»). Хотя соответствующие DNN концептуально перекрываются, они специализируются на обработке и идентификации атрибутов для различных подмножеств датасета и не могут использоваться взаимозаменяемо. Важно отметить, что для изображения запроса активируется только одна ветвь, поэтому избыточные вычисления не выполняются, даже если одни и те же атрибуты появляются в разных ветвях.

Отметим, что табл. 1 иллюстрирует архитектуру нейросети, а рис. 5 определяет метод реидентификации.

4. Результаты апробации разработанного метода реидентификации объекта

При проведении экспериментов использованы два набора данных изображений: VRAI для повторной идентификации транспортных средств и Market-1501 для повторной идентификации человека. VRAI содержит 66 113 изображений 6 302 различных транспортных средств. Market-1501 содержит 32 668 изображений, принадлежащих 1 501 разным пользователям. Этот набор данных также содержит 50 000 изображений для тестирования. Оба набора данных разделены на наборы для обучения и тестирования и аннотированы атрибутами.

Для оценки точности разработанного метода используем метрику ранжирования (Rank-1) и средней точности (mAP). Rank-1 – вероятность того, что правильное изображение появится как совпадение с наивысшим рангом, mAP измеряет среднюю производительность поиска при наличии нескольких совпадений. Оценки точности распознавания объектов определяются по данным тестирования. Требования к памяти и количество выполняемых операций (FLOP) для DNN содержатся в библиотеках torchsummary и thopPyTorch соответственно. Для разработанного метода определяются требования к памяти и количество операций (FLOP) в наихудшем случае: отношение суммы размеров моделей к FLOP DNN вдоль самого длинного пути от корня до листа. Измеритель мощности Yokogawa WT310E измеряет энергопотребление технологий на устройствах RaspberryPi 3 и NVIDIA JetsonNano. Структура иерархической DNN определяется с помощью протокола линейной оценки и корреляционной матрицы, затем создаются и обучаются DNN для каждого узла. Для обеспечения доступности обучающих данных длина ветви не увеличивается, если дочерняя DNN имеет менее 300 обучающих изображений. Самая глубокая ветвь иерархической DNN – четыре узла для набора данных VRAI и пять узлов для набора данных Market-1501. Во время обучения используем реализацию PyTorch по умолчанию с использованием триплетных потерь с пакетным жестким майнингом. Здесь пакеты формируются путем случайной выборки P объек-

тов, а затем случайной выборки K изображений каждого объекта, в результате чего получается пакет из $P \cdot K$ изображений. В экспериментах используем $P = 8$ и $K = 4$ (наибольший размер пакета, который помещается в доступную память GPU). Тренировка идет с тройной потерей до тех пор, пока потеря не достигнет постоянного значения. Скорость обучения начинается с 0,01 и уменьшается в 10 раз каждые 100 эпох. При обучении DNN с кросс-энтропийной потерей обучаем 100 эпох с размером партии, равной 32 и скоростью обучения, равной 0,001 с.

Для сравнения эффективности разработанного метода и существующих подходов к выполнению ReID для набора данных VRAI с целью повторной идентификации транспортных средств используются RAM-VGG (region-awaredeepmodel) [14], MultiTask [15] и DenseNet201 [16], для набора данных ReID с целью повторной идентификации человека сравниваем с пирамидальным ReID [17], DeepAnytimeRe-ID (DARE), Auto-ReID и Part-basedConvolutionalBaseline (PCB).

Таблица 2.

Сравнение размера модели, количества операций (FLOP), Rank-1 и mAP.
Зеленый шрифт указывает наилучший результат

Table 2.

The comparison between model size, number of operations (FLOP), Rank-1 and mAP.
The green font indicates the best result

Используемый датасет	Методы	Размер модели	FLOPs	Качество ранжирования	mAP	
VRAI			15,483 М			
	RAM-VGG	528	3,882 М	0,720	0,573	
	MultiTask	103	М	0,685	0,693	
	MultiTask + DP	351	11,172 М	0,803	0,786	
	DenseNet201	77	М	0,671	0,700	
			1,082 М			
	RandomTree	25	1,082 М	0,631	0,585	
	Разработанный метод	14	1,082 М	0,781	0,737	
	Market 1501			9,757 М		
				2,891 М		
Pyramidal		184	М	0,928	0,821	
DARE		89	2,050 М	0,868	0,693	
Auto-reID		55	М	0,938	0,834	
DG-Net		101	4,029 М	0,896	0,745	
ResNet50		103	М	0,872	0,685	
DenseNet201		77	3,882 М	0,860	0,699	
PCB		107	М	0,923	0,774	
			4,000 М			
			4,206 М			
RandomTree		27	1,736 М	0,788	0,535	
Разработанный метод		14	808 М	0,885	0,699	

В табл. 2 приведены полученные результаты: размер модели, количество операций (FLOP), значение метрики качества ранжирования (Rank-1) и значение mAP для различных методов. Разработанный метод ReID (реидентификации объекта) требует наименьшего объема памяти. По сравнению с RAM-VGG, в наборе данных VRAI предложенный метод требует модель гораздо меньшего размера (на 97,3 % меньше ($1-14/528 = 0,973$)), снижается количество выполняемых операций (FLOP) на 80,7 % ($1-808/4206 = 0,807$) по сравнению с методом PCB на наборе данных Market-1501. ResNet50, DenseNet201 и DARE обеспечивают более низкую точность, чем предложенный метод ReID. Отметим, что среднюю точность распознавания (mAP) с помощью разработанного метода можно улучшить, используя алгоритм случайного выбора, оптимизацию ранжирования и повторное ранжирование изображений. Предполагаются дальнейшее изучение сферы оптимизации результатов.

Проведенные исследования с использованием дерева случайных решений показывают, что использование иерархических DNN может снизить потребление ресурсов при повторной идентификации объекта. Очевидно, что случайный выбор иерархии менее эффективен, чем подход с использованием интеллектуальной иерархии. Реализация RandomTree требует больше ресурсов в связи с большим (неоптимальным) размером DNN, используемых для выполнения сложных классификаций атрибутов близко к корню дерева. Выявлены избыточные атрибуты, и очевидно, что для уменьшения размера выборки датасета требуются более глубокие деревья. Средняя глубина дерева RandomTree составляет 6 для VRAI и 7 для Market-1501. Поскольку ошибка классификации увеличивается на каждом этапе иерархии, более высокие деревья обеспечивают более низкую точность повторной идентификации.

Таблица 3.

Сравнение времени запроса (сек/изображение) и энергопотребления (Дж/изображение) на двух встроенных устройствах: RaspberryPi 3 и NVIDIA JetsonNano.
Зеленый шрифт указывает на лучший результат

Table 3.

The comparison between query time (sec/image) and power consumption (J/image) on two built-in devices: RaspberryPi 3 and NVIDIA JetsonNano.
The green font indicates the best result

Используемый датасет	Методы	RaspberryPi 3		NVIDIA JetsonNano	
		Время запроса	Энергопотребление	Время запроса	Энергопотребление
VRAI	ResNet50	–	–	3,20	22,24
	DenseNet201	–	–	2,75	19,26
	RandomTree	4,85	21,99	0,78	5,68
	Разработанный метод	2,53	12,13	0,305	2,66
Market 1501	ResNet50	–	–	3,00	21,63
	DenseNet201	–	–	2,55	18,18
	DARE	11,41	55,83	1,09	7,92

В табл. 3 приведены значения времени запроса и энергопотребление методов. Результаты получены после усреднения значений обработки более 100 изображений, в которых используется самый длинный путь от корня к листу. Предложенный метод имеет наименьшее время запроса и энергопотребления при реализации на обоих устройствах. Методы, вызывающие ошибки памяти во встроенных устройствах, обозначены знаком «-» или исключены из табл. 3. На рис. 6 показаны примеры реидентификации (ReID): два изображения запроса и пять изображений из датасета, которые возвращаются как совпадения. Разработанный метод дает хорошие результаты повторной реидентификации объектов (возвращает правильные совпадения с изображением запроса).

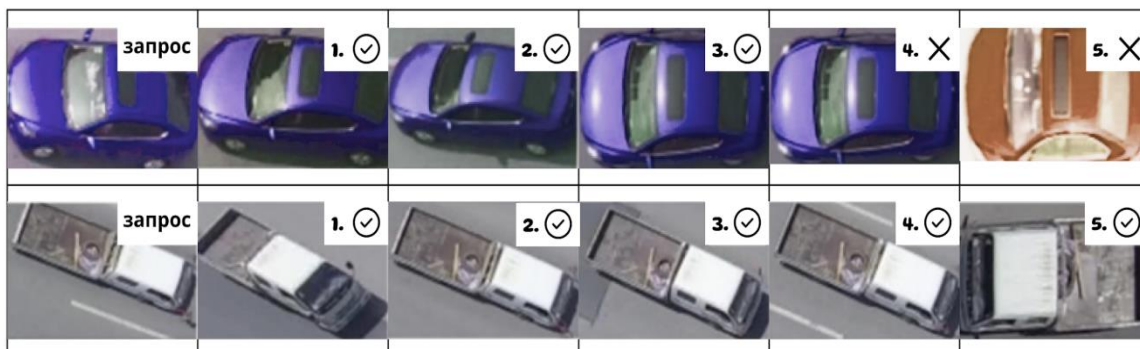


Рис. 6. Изображения, возвращенные как совпадения с использованием иерархического DNN для двух запросов. Правильные совпадения отмечены галочкой

Fig. 6. Images returned as matches using hierarchical DNN for two queries. Correct matches are ticked

5. Заключение

Представлена новая иерархическая DNN для энергоэффективной повторной идентификации объектов (ReID) на встроенных устройствах. Используется несколько нейросетей tiny-DNN, организованных в виде иерархии, где каждая сеть обрабатывает входные данные и идентифицирует атрибут. Предложен подход, учитывающий как визуальное, так и семантическое сходства для построения иерархий для эффективного повторного идентификатора объекта. Это достигается путем количественной оценки сложности идентификации атрибутов и нахождения корреляции между атрибутами, чтобы определить, какие атрибуты идентифицируются и в каком порядке. Область поиска сужается каждый раз, когда идентифицируется атрибут. При этом иерархия tiny-DNN модернизируется для повторной идентификации только небольшого подмножества объектов для повышения точности решений при низких требованиях к ресурсам. Эксперименты подтверждают, что иерархическая модель DNN позволяет развертывать метод ReID объекта на двух встраиваемых устройствах начального уровня на примере RaspberryPi 3 и NVIDIA JetsonNano за счет системного подхода к построению иерархии и выбора размера DNN.

Библиографический список

1. **Кучеров, С.А.** О подходах к распознаванию и идентификации персоны по цифровым изображениям в задачах обеспечения общественной безопасности / С.А. Кучеров, А.Н. Самойлов, А.К. Маакот, М.А. Кучерова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2016. С. 630-639.
2. **Гордин, М.С.** Алгоритмы обнаружения тревожных событий для систем автоматизированного видеонаблюдения / М.С. Гордин, С.А. Иванов // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2017. Т. 15. № 3. С. 21-30.
3. **Майоров, Н.Н.** Автоматизация процесса идентификации объектов при выполнении автономных полетных заданий беспилотной авиационной системой / Н.Н. Майоров, А.С. Костин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 2. С. 640-646.
4. **Захарова, М.В.** Исследование алгоритмов технического зрения для систем пространственного слежения в типовых режимах их функционирования. / М.В. Захарова, Г.Г. Шмигельский., В.В. Григорьев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 3. С. 487-492.
5. **Маковецкая-Абрамова, О.В.** Алгоритм идентификации транспортных средств в различных дорожных условиях / О.В. Маковецкая-Абрамова, Г.А. Петров // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2012. № 3(21). С. 5-7.

6. **Барашко, Е.Н.** Современные решения идентификации человека. Распознавание лиц / Е.Н. Барашко, С.О. Мазуренко, А.А. Шадрин // The Scientific Heritage. 2019. № 42-1(42). С. 40-42.
7. **Зарубин, Г.А.** Моделирование иерархической нейросетевой архитектуры для решения задач классификации данных // Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания. 2011. С. 175-178.
8. **Энгель, Е.А.** Использование иерархических нейронных сетей для распознавания многоэлементных зрительных сцен / Е.А. Энгель, О.И. Завьялова // Сибирский аэрокосмический журнал. 2009. № 3(24). С. 39-43.
9. **Кочурко, В.А.** Обнаружение объектов системами компьютерного зрения: подход на основе визуальной салиентности. / В.А. Кочурко, К. Мадани, К. Сабуран, В.А. Головкин, П.А. Кочурко. // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2015. № 5(91). С. 47-53.
10. **Зотов, С.С.** Обнаружение объектов в реальном времени с помощью алгоритмов распознавания YOLO / С.С. Зотов, А.А. Яковлев, Д.А. Колчинцев // Синергия наук. 2018. № 26. С. 388-404.
11. **Немцев, Н.С.** Подход для повторной идентификации модели транспортного средства по его изображению // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 14. № 4. С. 722-729.
12. **Романов, А.С.** Методика идентификации автора текста на основе аппарата опорных векторов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2009. С. 36-42.
13. DenseNet – плотная сверточная сеть (классификация изображений), 25 ноября 2018 г. [Электронный ресурс] // Режим доступа: URL: <https://machinelearningmastery.ru/review-densenet-image-classification-b6631a8ef803/>
14. Поиск нейронной архитектуры (NAS) – будущее глубокого обучения, 8 июня 2019 г. [Электронный ресурс] // Режим доступа: URL: <https://machinelearningmastery.ru/neural-architecture-search-nas-the-future-of-deep-learning-c99356351136/>
15. **Liu, X.** RAM: a region-aware deep model for vehicle re-identification / Liu X., Zhang S., Huang Q., Gao W. // In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). 2018. Pp. 1-6.
16. **Peng Wang.** Vehicle Re-Identification in Aerial Imagery: Dataset and Approach / Peng Wang, Bingliang Jiao, Lu Yang, Yifei Yang, Shizhou Zhang, Wei Wei, Yanning Zhang // In 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV).
17. Densenet-201 model from Densely Connected Convolutional Networks [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://pytorch.org/vision/main/models/generated/torchvision.models.densenet201.html>
18. **Zheng F.** Pyramidal Person Re-IDentification via Multi-Loss Dynamic Training / Feng Zheng, Cheng Deng, Xing Sun, Xinyang Jiang, Xiaowei Guo, Zongqiao Yu, Feiyue Huang, Rongrong Ji // In 2019 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2019.

*Дата поступления
в редакцию: 30.06.2022*

*Дата принятия
к публикации: 04.10.2022*

УДК 551.510.42, 519.6

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_20

АНАЛИЗ И АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ КОРИЧНЕВОГО УГЛЕРОДА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

Н.А. Головушкин

ORCID: 0000-0002-2937-8213 e-mail: golovushkin@ipfran.ru

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

Л.Ю. Катаева

ORCID: 0000-0001-9217-9324 e-mail: Kataeval2010@mail.ru

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

Исследовано влияние на окружающую среду дымового аэрозоля, являющегося важным звеном в процессах формирования радиационного форсинга атмосферы Земли и климатообразования, на примере Сибирского региона. Объектом исследования выступает органическая компонента дымового аэрозоля – коричневый углерод (BrC), поглощающий приходящую солнечную радиацию и оказывающий значимое воздействие на оптические и радиационные характеристики. На основе анализа данных спутниковых MODIS (сканирующий спектрометр среднего разрешения), MISR (многоугловой сканирующий спектрометр), OMI (инструмент мониторинга озона) сделана оценка вклада коричневого углерода (BrC) в поглощение солнечного излучения. Сопоставление данных измерений аэрозольной абсорбции и экстинкции с модельными расчетами, произведенными с использованием теории Ми, по методу Монте-Карло выявляет значительное уменьшение фракции BrC и мнимой части показателя преломления в первые 30 часов его атмосферной эволюции, оставаясь в то же время существенным до 70 часов. Обоснована целесообразность использования набора спутниковых измерений для получения информации об эволюции BrC.

Ключевые слова: окружающая среда, дымовой аэрозоль, органическая фракция аэрозоля, абсорбция, спутниковые измерения, наземные измерения, метод Монте-Карло.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Головушкин, Н.А. Анализ и алгоритм оценки свойств коричневого углерода по данным спутниковых и наземных измерений с применением метода Монте-Карло / Н.А. Головушкин, Л.Ю. Катаева // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 20-27. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_20

MONTE-CARLO METHOD-BASED ANALYSIS AND ALGORITHM FOR BROWN CARBON PROPERTY EVALUATION USING SATELLITE AND GROUND MEASUREMENTS

N.A. Golovushkin

ORCID: 0000-0002-2937-8213 e-mail: golovushkin@ipfran.ru

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

L.Yu. Kataeva

ORCID: 0000-0001-9217-9324 e-mail: Kataeval2010@mail.ru

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

Abstract. The study examines the environmental impact of smoke aerosol as a substantial contributor to the radiative forcing of the Earth's atmosphere and climate formation, by the example of Siberia. The study subject is the organic fraction of smoke aerosol: brown carbon (BrC) absorbing the incoming solar radiation and having a significant

impact on optical and radiative properties. The analysis of MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectro-radiometer), MISR (Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer), and OMI (Ozone Monitoring Instrument) satellite observations allows for the evaluation of brown carbon (BrC) contribution to the absorption of solar radiation. The comparison of the aerosol absorption and extinction observations against Mie theory model calculations using the Monte-Carlo method shows that the BrC fraction, as well as the imaginary part of the refractive index, decreased significantly during first 30 h of its atmospheric evolution, nevertheless remaining considerable until at least 70 h. The feasibility of obtaining information on BrC evolution using satellite observational datasets is well-established.

Key words: environment, smoke aerosol, the organic fraction of smoke aerosol, absorption, satellite measurements, ground measurements, Monte-Carlo method.

FOR CITATION: N.A. Golovushkin, L.Yu. Kataeva. Monte-Carlo method-based analysis and algorithm for brown carbon property evaluation using satellite and ground measurements. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. Pp. 20-27. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_20

Введение

Природные лесные пожары по всему миру приводят к уничтожению лесных массивов и сопутствующих материальных ценностей. Причины их возникновения аналогичны для всех стран, обладающих обширным лесным фондом, но наиболее сложные и крупные пожары возникают в гористой местности, характерной для России, США и Австралии. В нашей стране самым пожароопасным регионом является Сибирь, где каждый год возникает от 4,5 до 27 тыс. лесных пожаров, охватывающих площади от 3,5 до 18 млн га [1-3]. Их число постоянно растет (рис. 1), что может объясняться как ограниченным финансированием лесного хозяйства и охраны окружающей среды, так и недостаточной изученностью механизмов пожаротушения.

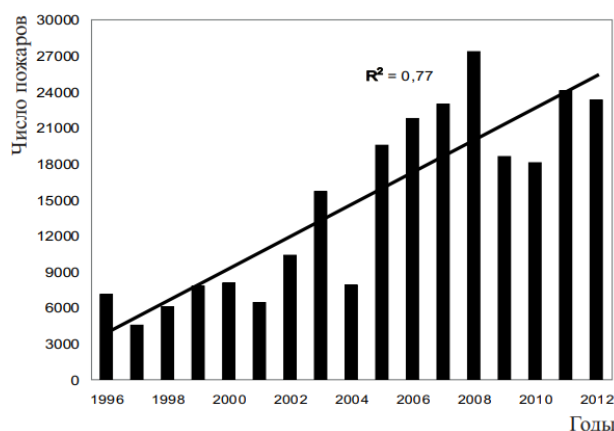


Рис. 1. Годовое число пожаров в Сибири [3]

Fig. 1. Annual number of Siberian wildfires [3]

Крупномасштабные лесные пожары порождают огромные дымовые шлейфы, влияющие на окружающую среду. Дымовой аэрозоль, состоящий из органических веществ и черного углерода (сажи), оказывает сильное воздействие как на формирование радиационного форсинга атмосферы, так и на климатообразующие процессы [4], в связи с чем может считаться одним из факторов нарушения равновесия в экологии. Известно, что в химическом составе аэрозоля от лесных пожаров преобладают первичные органические вещества, слабо поглощающие приходящее солнечное излучение, но вместе с ними в составе содержатся и сильно поглощающие соединения – хромофоры первичного и вторичного происхождения, вносящие вклад в поглощение солнечного излучения наряду с черным углеродом (BC). Одним из таких соединений является «коричневый углерод» [5] (BrC), который, в отличие от BC, характеризуется более интенсивной зависимостью удельного коэффициента абсорбции

от длины волны, принимающего максимальные значения в ближнем ультрафиолетовом (УФ) диапазоне. Результаты различных исследований, основанные на модельных расчетах [6-8], показывают, что BrC вносит заметный вклад в радиационный форсинг, как на региональном, так и глобальном уровне. В то же время оценки вклада BrC в абсорбцию дымового аэрозоля характеризуются большой неопределенностью ввиду недостаточно изученных комплексных процессов с участием BrC, сказывающихся на адекватном учете климатическими моделями связанных с ним эффектов.

Целью настоящей работы является оценка относительного вклада BrC в поглощение дымовым аэрозолем солнечного излучения и его анализ на основе обработки данных многоволновых спутниковых измерений на примере Сибирского региона. Задачи включают обработку и валидацию спутниковых данных и их дальнейшее применение для получения оценки среднего содержания BrC в сибирском дымовом аэрозоле в зависимости от фотохимического возраста аэрозоля.

Спутниковые данные

Для расчета оценки вклада BrC использовались следующие данные многоволновых спутниковых измерений оптических характеристик аэрозоля:

- измерения абсорбционной аэрозольной оптической толщины (AAOT) на длине волны 388 нм, полученные спутниковым инструментом OMI продукта OMAERUV;
- измерения AAOT на 867 нм по данным спутникового инструмента MISR;
- измерения аэрозольной оптической толщины (AOT) на 550 нм по данным MODIS.

Инструмент для мониторинга озона (OMI) – спектрометр, установленный на борту спутника NASA's Earth Observing System (EOS), работающий для ближнего УФ диапазона, и вращающийся вокруг Земли по полярно-солнечно-синхронной схеме. Он предназначен для измерения общего содержания и профиля озона, а также содержания таких газов, как NO₂, SO₂, HCHO, BrO и OClO. Многоугловой сканирующий спектрометрический радиометр (MISR) – первая съемочная система в космосе, позволяющая определять отражательные характеристики объектов в девяти разных направлениях. Большинство съемочных инструментов, устанавливаемых на спутниках, ведут наблюдения вертикально. Для изучения аэрозолей, облачного покрова, водных поверхностей, растительности, горных пород необходимо знать количество солнечного света, рассеиваемого или отражаемого в естественных условиях по разным направлениям, для чего MISR имеет необходимые возможности. Спектрометрический радиометр с визуализацией среднего разрешения (MODIS) является одним из ключевых инструментов на борту американских спутников Terra и Aqua серии EOS. MODIS имеет 36 спектральных каналов с 12-битным радиометрическим разрешением в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах. 36 спектральных зон MODIS охватывают диапазон с длинами волн от 0,4 до 14,4 мкм. Съемка в двух зонах (620-670 и 841-876 нм) ведется с разрешением 250 м, в пяти зонах видимого и ближнего инфракрасного диапазона с разрешением 500 м, а в остальных (диапазон от 0,4 до 14,4 мкм) – 1000 м. Рассматриваемый домен имел границы 22-136° в. д. и 38-76° с. ш., период включал в себя данные за июль 2016 г. (рис. 2).

Валидация спутниковых измерений проводилась путем сопоставления их с данными наземных измерений AERONET (AErosol RObotic NETwork), представляющего собой сеть наземных солнечных фотометров, измеряющих свойства атмосферного аэрозоля. Использовались данные за 2012 и 2016 гг., AAOT на длинах волн 440-, 675-, 870- нм, являющихся продуктами инверсии второго уровня версии 3, а также AOT на 500- и 675- нм второго уровня версии 3, продуктов алгоритма «Direct Sun». Чтобы обеспечить соответствие возраста дымового аэрозоля между спутниковыми и наземными наблюдениями, данные согласованно отбирались по фотохимическому возрасту аэрозоля так, чтобы относительная разница между значениями фотохимического возраста дымового аэрозоля по данным спутников и данным AERONET не превышала 10 %.

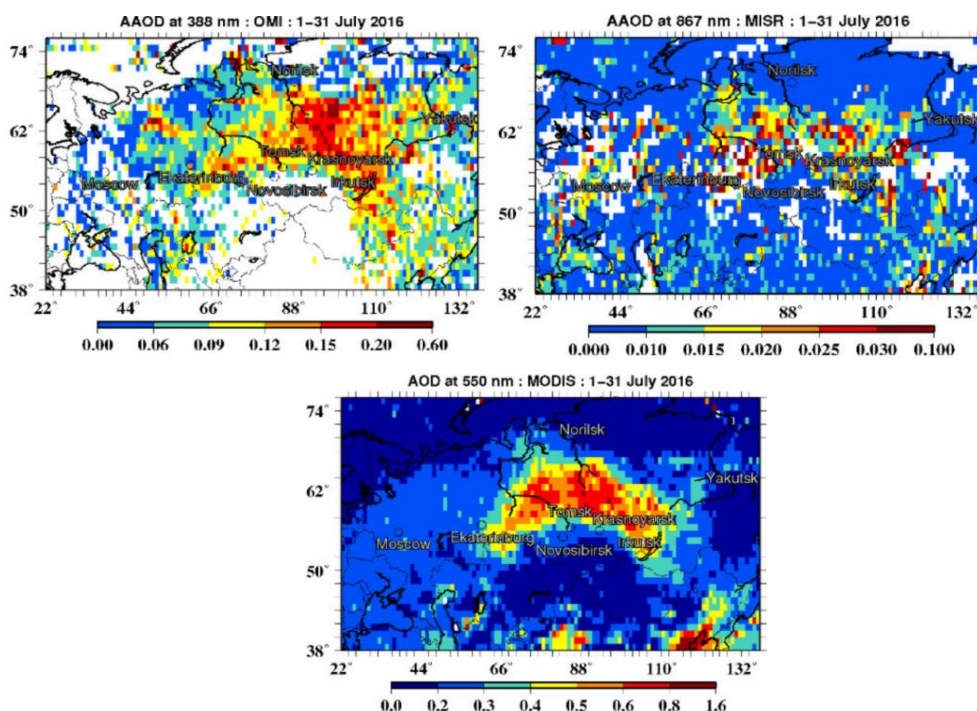


Рис. 2. Пространственное распределение $AAOT_{388}$ по данным OMI, $AAOT_{867}$ по данным MISR и AOT_{550} по данным MODIS соответственно [9]

Fig. 2. Spatial distribution of $AAOT_{388}$ based on OMI observations, $AAOT_{867}$ based on MISR observations, and AOT_{550} based on MODIS observations respectively [9]

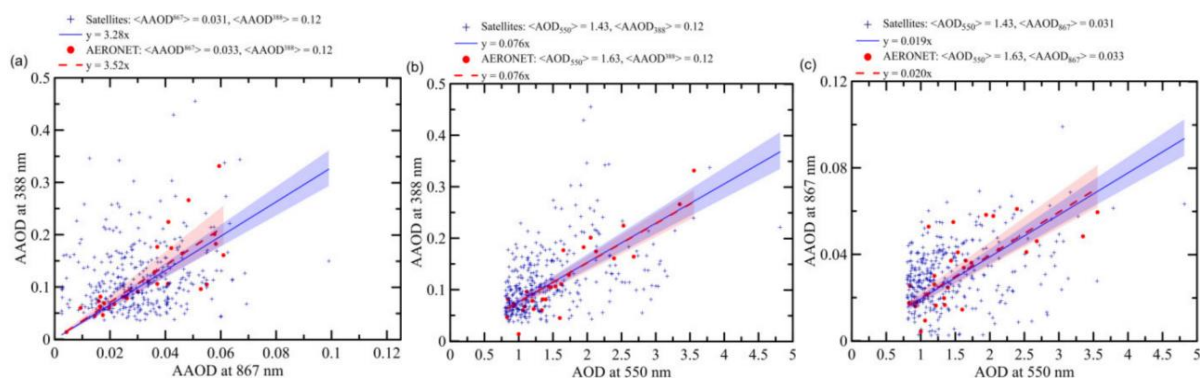


Рис. 3. Сравнение зависимостей (a) $AAOT_{867}$ и $AAOT_{388}$, (b) AOT_{550} и $AAOT_{388}$, (c) AOT_{550} и $AAOT_{867}$ по данным спутников измерений (синие точки и линии) и данным AERONET (красные точки и штрихованные линии) [9]

Fig. 3. Comparison of the relationships between (a) $AAOT_{867}$ and $AAOT_{388}$, (b) AOT_{550} and $AAOT_{388}$, (c) AOT_{550} and $AAOT_{867}$ based on satellite measurements (blue points and lines) and AERONET observations (red points and dashed lines) [9]

Объединенный набор данных, удовлетворяющих этому условию, включал 347 спутниковых наблюдений и 29 точек данных наблюдений AERONET. На рис. 3 представлено сравнение двух наборов данных.

В целом сравнение не выявило каких-либо свидетельств серьезной систематической ошибки в спутниковых данных, использованных в анализе данной работы, хотя следует иметь в виду, что проверка способности спутниковых данных адекватно отражать атмосферную эволюцию дымового аэрозоля была затруднена из-за нехватки данных AERONET, особенно тех, которые представляют свежий дымовой аэрозоль.

Метод оценки BrC

Метод оценки вклада BrC (рис. 4) в абсорбцию соответствовал работе [9]. На первом этапе по алгоритму Монте-Карло был сформирован входной набор модельных данных, представляющий всевозможные вариации оптических свойств дымового аэрозоля, где каждой реализации соответствовал вектор x_a , включающий в себя следующие аэрозольные параметры: мнимую часть показателя преломления k_{OA} на 550 нм, отношение черного и органического аэрозоля BC/OA , медиану и стандартное отклонение ядра и оболочки, параметр гигроскопичности k , массовую долю неорганического материала (представленного сульфатом аммония) и относительную влажность RH . Диапазоны варьируемых параметров указаны в нашем предыдущем исследовании [9].

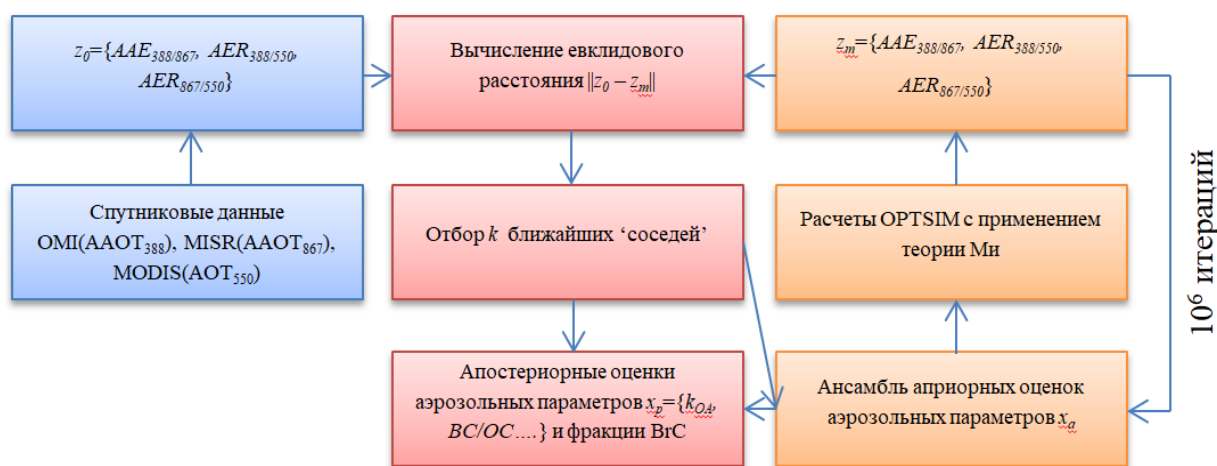


Рис. 4. Схема алгоритма Монте-Карло для расчета абсорбционных характеристик BrC

Fig. 4. Flow chart of the Monte-Carlo algorithm for the estimation of BrC absorption parameters

Основываясь на теории Ми, было сделано предположение, что частицы дымового аэрозоля состоят из сильно поглощающего ядра и слабо поглощающей оболочки: ядро состоит из BC, а оболочка состоит в основном из органического вещества и в меньшей степени из неорганических солей и воды. Расчеты проводились с помощью программы OPTSIM, позволяющей моделировать поглощающие и рассеивающие свойства ансамбля мультидисперсных сферических частиц, имеющих однородную структуру или структуру ядро-оболочка, которая применялась в данной работе. Доля воды была рассчитана на основе теории Кохлера как функция от влажности. Было сделано 10^6 итераций со случайно подобранными значениями параметров, расчет в OPTSIM производился независимо для каждой реализации. Оценка фотохимического возраста наблюдаемого аэрозоля и относительной влажности в дымовых шлейфах произведена с применением модели CHIMERE в комплексе с моделью WRF. Модель CHIMERE – химико-транспортная модель (XTM) с открытым кодом. XTM CHIMERE специализируется на расчетах концентраций малых газовых и аэрозольных составляющих в нижней атмосфере. В архитектуре программного комплекса CHIMERE принимаются во внимание наиболее важные процессы, определяющие пространственно-временные распределения концентраций малых примесей атмосферы, среди которых – процессы химического взаимодействия, процессы адвективного и турбулентного переноса, вымывание химических веществ, сухое осаждение и фотолиз. Кроме этого, в модели учтены основные процессы эволюцию аэрозолей: абсорбция, нуклеация, коагуляция и осаждение, причем рассматриваются как первичные, так и вторичные органические и неорганические аэрозоли, возникающие вследствие образования конденсируемых веществ в реакциях газообразных примесей.

Следующим шагом был расчет вектора аэрозольных характеристик по данным спутниковых измерений (z_0) и модельных расчетов (z_m). Вектор включал в себя три компоненты:

абсорбционную экспоненту Ангстрема $AAE_{388/867}$, соотношение $AAOT_{388}/AOT_{550}$ ($AER_{388/550}$) и соотношение $AAOT_{867}/AOT_{550}$ ($AER_{867/550}$). $AAE_{388/867}$ рассчитывалась на основе данных $AAOT_{388}$ и $AAOT_{867}$ по данным измерений ОМІ и MISR по формуле:

$$AAE_{388/867} = -\log\left(\frac{AAOT_{388}}{AAOT_{867}}\right) / \log\left(\frac{388}{867}\right) \quad (1)$$

Как показало наше предыдущее исследование [10], значения $AAE_{388/867}$ для Сибирского дымового аэрозоля значительно зависят от вклада δBrC в абсорбцию, в среднем имея тенденцию к увеличению при увеличении значений δBrC . Значения $AER_{388/550}$ и $AER_{867/550}$ были использованы как дополнительные данные для анализа, что, как будет показано ниже, позволило получить качественные ограничительные оценки δBrC и k_{OA} .

На последнем шаге алгоритма производился подбор векторов апостериорных оценок аэрозольных характеристик x_p и оценка вклада δBrC . Вектор x_p был рассчитан как линейная суперпозиция фиксированного числа k отобранных векторов x_a (именуемого как $\{x_{ai}^n\}_{i=1}^k$) по формуле (2):

$$x_p^n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{ai}^n, \quad (2)$$

где n – порядковый номер спутниковых измерений.

Алгоритм включал в себя поиск k ближайших соседей, $\{z_{mi}^n\}_{i=1}^k$, для каждого вектора наблюдаемых характеристик z_0 среди всех модельных наборов z_m путем вычисления евклидова расстояния между z_0 и z_{mi}^n :

$$d^i = \left\{ (z_0^n - z_{mi}^n)^T (z_0^n - z_{mi}^n) \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

где d^i – евклидово расстояние, T – транспонирование.

При помощи найденных k ближайших соседей z_0 становится возможным получить апостериорную оценку любой скалярной функции $F(x)$:

$$F_p^n = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k F(x_{ai}^n). \quad (4)$$

В конечном счете на основе подобранных апостериорных оценок и формулы (4), δBrC рассчитывался через массовый коэффициент поглощения [9]:

$$\delta BrC = 1 - \frac{\alpha_a | k_{OA} = 0}{\alpha_a}, \quad (5)$$

где α_a – эффективность поглощения, $\alpha_a | k_{OA} = 0$ – эффективность поглощения в гипотетическом случае, когда органический аэрозоль является непоглощающим ($k_{OA} = 0$). Оценки, определяемые уравнениями (2) и (4), зависят от количества ближайших соседей k . Выбор слишком маленького значения k может привести к большим неопределенностям апостериорных оценок x_p , что будет отражать возможность того, что одни и те же значения вектора z будут соответствовать нескольким различным комбинациям компонентов вектора x . С другой стороны, когда k приближается к общему числу выборок, оценки x_p будут приближаться к среднему значению всего ансамбля выборок x и станут почти независимыми от наблюдений. Оптимальное число соседей было подобрано итерационным путем, увеличивая значение k на каждой итерации. На рис. 5 изображено сопоставление тестовых значений (t values), заранее подобранных алгоритмом после его применения к набору синтетических данных AERONET, и предсказанных значений (predicted values) – результата работы алгоритма. Число k увеличивалось до тех пор, пока среднеквадратичная ошибка (RMSE) не станет минимальной.

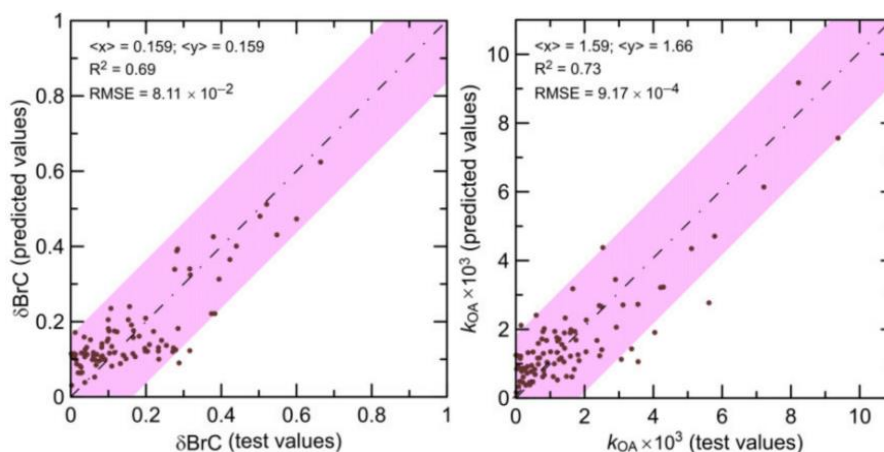


Рис. 5. Валидация алгоритма Монте-Карло на основе синтетических данных, полученных на основе данных AERONET в Сибири: слева – δBrC , справа – k_{OA} [9]

Fig. 5. Monte-Carlo algorithm validation based on synthetic data obtained from AERONET observations in Siberia: δBrC on the left, and k_{OA} on the right [9]

Результаты и выводы

Представлены результаты применения метода оценки коричневого углерода к спутниковым данным. На рис. 6 изображены полученные оценки относительного вклада δBrC в поглощение солнечного излучения дымовым аэрозолем на длине волны 388 нм и оценки мнимой части показателя преломления органической фракции аэрозоля k_{OA} соответственно.

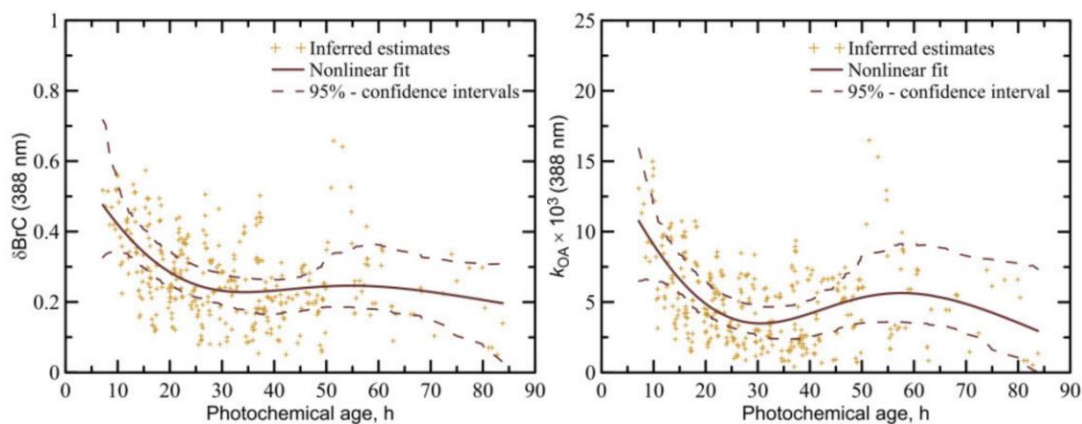


Рис. 6. Оценки вклада BrC в абсорбцию солнечного излучения дымовым аэрозолем (слева) и мнимого показателя преломления органической фракции дымового аэрозоля (справа) на длине волны 388 нм [9]

Fig. 6. Estimates of the BrC contribution to the solar radiation absorption by smoke aerosol (on the left) and the imaginary refractive index of the organic fraction of smoke aerosol (on the right) at the wavelength of 388 nm [9]

Согласно полученным оценкам, в свежем дымовом аэрозоле коричневый углерод является доминирующей абсорбирующей примесью на 388 нм. При этом доля коричневого углерода, содержащаяся в дымах, резко уменьшается – примерно в три раза в течение ~30 часов эволюции в освещенных условиях, но все еще остается значительной и в процессе дальнейшей эволюции. Важно отметить, что анализ выявил то, что BrC полностью не исчезает в сибирском дымовом аэрозоле даже после 70 часов воздействия атмосферного дневного света (~ 4 полных дня в летнее время в Сибири). В то же время поведение k_{OA} очень похоже на

δBrC . Первоначально видно его уменьшение на временном масштабе около 19 часов, но «период уменьшения» не выходит за пределы 30 час атмосферной эволюции. Кроме того, как и для δBrC , k_{OA} оставался отличным от нуля даже после 70 час эволюции, что еще раз свидетельствует о том, что органическая фракция дымового аэрозоля от лесных пожаров сохраняла некоторые абсорбционные свойства в течение почти всего времени жизни дымового аэрозоля в Сибири.

Проведена оценка вклада BrC в абсорбцию солнечного излучения дымового аэрозоля в Сибири. Поглощение приходящей солнечной радиации коричневым углеродом δBrC является значительным в первые ~30 часов атмосферной эволюции, при этом, не опуская до нуля даже спустя 70 часов. Выявлено, что в среднем спутниковые данные OMI, MODIS и MISR способны предоставить качественную информацию о дымовом аэрозоле, пригодном для анализа дальних переносов дымовых шлейфов.

Библиографический список

1. **Сороковой, С.И.** Из истории борьбы с лесными пожарами в Сибири / Климат, экология, сельское хозяйство Евразии. Материалы межд. науч.-практ. конф., Иркутск, 09-10 июня 2016 г. – Иркутск, 2016. С. 48-53.
2. **Самсонов, Ю.Н.** Дымовая аэрозольная эмиссия при лесных пожарах в Центральной Сибири / Ю.Н. Самсонов, О.А. Беленко, В.А. Иванов // Гео-Сибирь. 2010. С. 114-118.
3. **Цветков, П.А.** О последствиях лесных пожаров в Сибири // Хвойные бореальной зоны. 2013. Том. 31. № 5-6. С. 10-14.
4. **Bondur, V.G.** Spacetime Distributions of Wildfire Areas and Emissions of Carbon-Containing Gases and Aerosols in Northern Eurasia according to Satellite-Monitoring Data / V.G. Bondur, K.A. Gordo, V.L. Kladov // Izvestiya, Atmos. Ocean. Phys., 2018, vol. 53, n. 9. Pp. 859-874.
5. **Andreae, M.O.** A. Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols / M.O. Andreae, A. Gelencsér // Atmos. Chem. Phys., 2006. vol. 6, n. 10, p. 3131.
6. **Bond, T.C.** Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment / T.C. Bond, S.J. Doherty, D.W. Fahey et al. // J. Geophys. Res. Atmos, 2013, vol. 118, n. 11, p. 5380-5552.
7. **Sand, M.** Response of Arctic temperature to changes in emissions of short-lived climate forcers / M. Sand, T. Berntsen, K. Salzen, von, et al. // Nat. Clim. Change. 2016, n. 6, Pp. 286-289.
8. **Zhang, A.** Modeling the global radiative effect of brown carbon: a potentially larger heating source in the tropical free troposphere than black carbon / Zhang A., Wang Y., Zhang Y. et al. // Atmos. Chem. Phys. 2020. vol. 20. Pp. 1901-1920.
9. **Konovalov, I.B.** Using Multi-Platform Satellite Observations to Study the Atmospheric Evolution of Brown Carbon in Siberian Biomass Burning Plumes / I.B. Konovalov, N.A. Golovushkin, M. Beekmann, S. Turquety // Remote Sens, 2022. n. 14. p. 2625.
10. **Konovalov, I.B.** Inferring the absorption properties of organic aerosol in Siberian biomass burning plumes from remote optical observations / I.B. Konovalov, N.A. Golovushkin, M. Beekmann et al. // Atmos. Meas. Tech. 2021. Vol. 14. Pp. 6647-6673.

*Дата поступления
в редакцию: 10.07.2022*

*Дата принятия
к публикации: 18.10.2022*

УДК 004.056.5, 004.942

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_28

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

В.Ю. Карпычев

ORCID: 0000-0001-8527-2600 e-mail: kavlyr@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Приволжский институт повышения квалификации ФНС России
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрены подходы к решению сложной многокритериальной задачи моделирования информационной безопасности организации на основе ряда нормативно-методических документов. Проведен сравнительный анализ особенностей, ограничений и трудностей практической реализации данных подходов. Приведены предпочтительные условия применения различных моделей обеспечения информационной безопасности. Показана вынужденная компромиссность решений в части уровня защищенности информационных активов и экономики обеспечения информационной безопасности.

Ключевые слова: информационная безопасность, моделирование, информационные активы, угроза, ущерб, уязвимость, затраты, риск-менеджмент.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Карпычев, В.Ю. Моделирование информационной безопасности: проблемы и решения // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 28-36. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_28

CYBER SECURITY MODELING: ISSUES AND OPTIONS

V.Yu. Karpychev

ORCID: 0000-0001-8527-2600 e-mail: kavlyr@yandex.ru

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Federal State Institution of Advanced Finance Professional Training
Federal Tax Service Training Institute
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Based on a number of regulatory and procedural guidelines, some approaches are explored to solve the complex multi-objective problem of institutional cyber security modeling. The author performs a comparative analysis of the features, limitations and difficulties of the practical implementation of the approaches. They specify the preferred conditions applicable to the different models of cyber security protection. The trade-off between the protection level of information assets and economics of cyber security protection is shown necessary.

Key words: cyber security, modeling, information assets, threat, harm, vulnerability, costs, risk management

FOR CITATION: V.Yu. Karpychev. Cyber security modeling: issues and options. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. Pp. 28-36. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_28

Введение

Обеспечение информационной безопасности (ИБ) является самостоятельным, сложным и затратным направлением деятельности организаций. Рассмотрению вопросов, связанных с обеспечением ИБ, посвящено множество научных исследований. Создана обширная база нормативных и методических документов, регламентирующих деятельность в данной области. Тем не менее, задача обеспечения ИБ, как правило, не имеет тривиальных решений при ее практической реализации. Проблемы связаны с определением эффективности по назначению и экономической обоснованности создания систем ИБ. В статье рассмотрены

возможные подходы к решению этих взаимосвязанных задач на основе моделирования информационной безопасности.

Основные подходы к обеспечению информационной безопасности

В качестве теоретической основы обеспечения ИБ можно рассматривать известную *модель безопасности с полным перекрытием* [1], на наш взгляд, в общем случае представляющую идею защиты. В упрощенной версии модели представлены множества:

- $T = \{t_i\}, i = \overline{1, N}$ – угроз безопасности;
- $O = \{o_j\}, j = \overline{1, J}$ – объектов безопасности;
- $M = \{m_k\}, k = \overline{1, K}$ – средств защиты (средств обеспечения безопасности).

Отношения элементов этих множеств можно исследовать на графовой модели. Двухдольный граф $\langle T, O \rangle$ описывает потенциальные угрозы конкретным объектам. Включение в модель множества M позволит перекрыть возможные пути (ребра) реализации угроз. На рис. 1 представлен трехдольный граф $\langle T, M, O \rangle$, отражающий рассмотренные взаимосвязи.

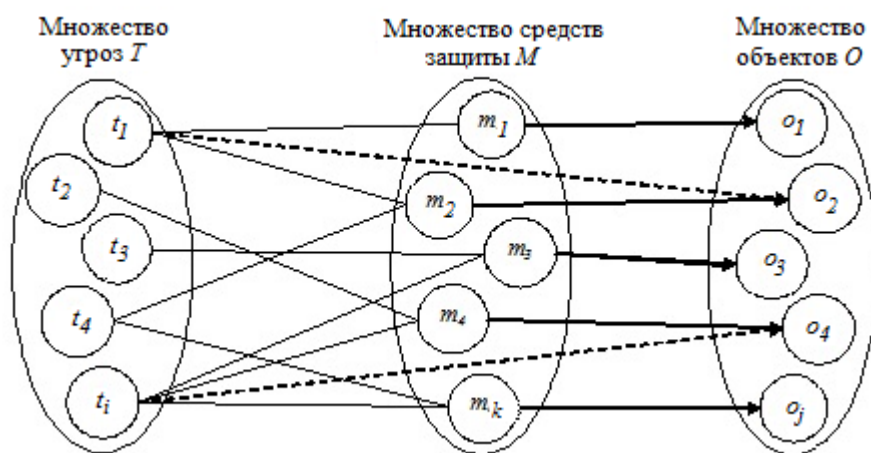


Рис. 1. Полное перекрытие угроз безопасности

Fig. 1. Full overlap of security threats

Для обеспечения безопасности все ребра модели должны иметь вид $\langle t_i, m_k \rangle$ и $\langle m_k, o_j \rangle$.

Наличие ребер вида $\langle t_i, o_j \rangle$ означает отсутствие защиты для объекта (ребра $\langle t_1, o_2 \rangle$ и $\langle t_1, o_4 \rangle$ на рис. 1). Тогда полная защищенность объектов достигается при выполнении условия:

$$\forall(t_i) \in T, \exists(m_k) \in M, \quad (1)$$

означающего, что реализация каждой угрозы t_i из множества угроз в отношении объекта o_j может быть предотвращена средством m_k из множества средств защиты M .

Предполагается, что используемые средства защиты должны гарантированно противодействовать реализации связанной угрозы. В реальности угрозы могут преодолевать средства защиты, и это желательно отразить в модели. Кроме того, в «реальной» жизни имеют значение *вероятность возникновения угроз и величина ущерба* объекту безопасности в случае реализации угрозы. Однако этими категориями модель не оперирует. Экономические аспекты обеспечения ИБ также остаются за пределами модели с полным перекрытием.

Это означает, что в теоретической модели обеспечения безопасности, представляющей идею полного перекрытия путей реализации угроз, существуют следующие серьезные ограничения, препятствующие практическому применению.

1. Трудности формирования полных множеств угроз T и объектов безопасности O в контексте конкретной организации. Решение этой задачи влияет на функциональную и экономическую эффективность обеспечения ИБ.
2. Невозможность количественного определения уровня защищенности объектов безопасности, не позволяющая оценивать его изменения, в том числе обусловленные совершенствованием структурно-параметрических характеристик системы ИБ.
3. Отсутствие инструментов адаптации модели к конкретной организации, то есть условиям ее деятельности, структуре и виду объектов безопасности (абстрактность модели).
4. Уникальность принятых решений обеспечения безопасности (т.е. $\langle t_i, m_k \rangle$ и $\langle m_k, o_j \rangle$) конкретных организаций, затрудняющих их тиражирование.
5. Отсутствие инструментов экономического анализа решений по обеспечению ИБ.
6. Невозможность гарантированного обеспечения ИБ (наличие остаточного риска).

Указанные ограничения модели с полным перекрытием оставляют ее теоретической конструкцией без отражения в нормативных документах и, соответственно, практического использования. На практике применяются подходы, частично снимающие эти ограничения: классификационный и рисковый (менеджмент информационного риска).

Классификационный подход к обеспечению ИБ является основным для государственных организаций. В рамках этого подхода проводится категорирование:

- объектов безопасности (объектов информатизации);
- информации (по уровням ограничения доступа);
- средств защиты (по функциональности и реализуемым возможностям);
- нарушителей (по отношению к защищаемой организации, квалификации, доступным техническим средствам) и др.

Рис. 2 раскрывает сущность подхода на примере обеспечения ИБ автоматизированных систем (АС).

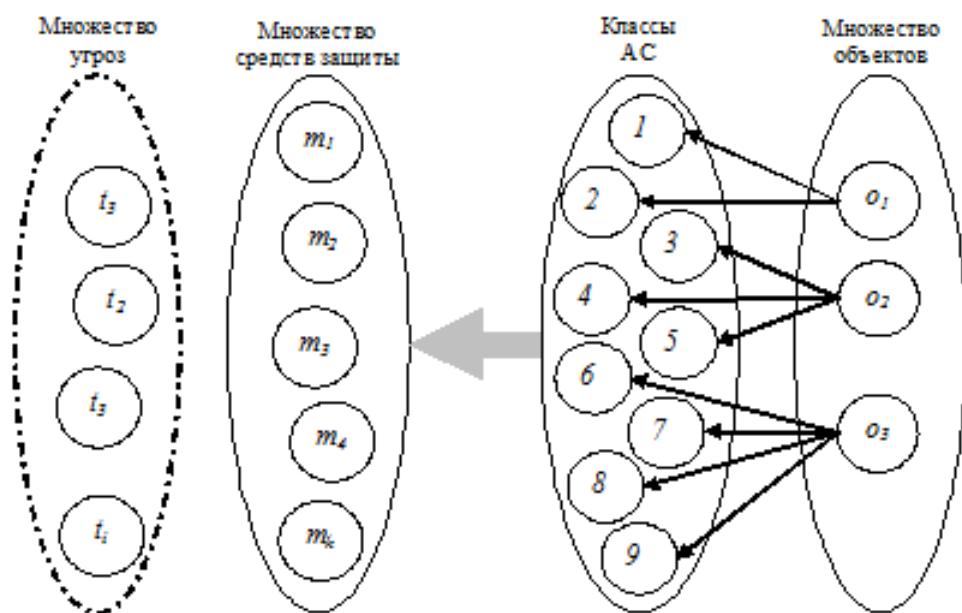


Рис. 2. Классификационный подход к обеспечению ИБ

Fig. 2. Classification approach to CS protection

Руководящий документ¹ устанавливает 9 классов защищенности АС от НСД к информации. Классы объединены в три группы, учитывающие особенности обработки информации. В каждой группе обеспечивается иерархия требований к ИБ в зависимости от уровня ограничения доступа к информации. Для каждого класса АС определен перечень организационно-технических мер безопасности, обязательных для исполнения.

При классификационном подходе к обеспечению ИБ:

- функциональным критерием эффективности является выполнение нормативно заданного набора требований для объектов классификации (категорирования); набор и значения показателей безопасности разработчики нормативных документов не аргументируют;
- без рассмотрения остаются вопросы экономики создания систем ИБ; по умолчанию очевидным критерием экономической эффективности является минимизация обобщенных затрат на выполнение нормативных требований безопасности: $\sum C_k \rightarrow \min$, где C_k – затраты на k -ое средство защиты.

Таким образом, задача применения классификационного подхода может быть поставлена следующим образом: определить затраты достаточные для достижения в текущих условиях деятельности организации требуемого уровня ИБ, выраженного через нормативно установленные показатели для определенного класса информационных систем (ИС).

Классификационный подход

Классификационный подход обладает следующими особенностями:

- позволяет относить ИС к определенному классу защищенности и определяет соответствующий ему набор мер безопасности;
- обеспечивает в классе одинаковый уровень ИБ для различных организаций путем применения типовых организационно-технических (тиражируемых) решений;
- создает возможность массового применения для близких по отраслевой принадлежности и структуре организаций.

Именно эти свойства, на наш взгляд, определили нормативное закрепление в документах ФСТЭК России классификационных методик обеспечения ИБ, обязательных для применения организациями при защите государственной и служебной тайн. Однако для негосударственных организаций, не связанных жесткими требованиями к уровню безопасности конфиденциальной информации, ценность данных свойств классификационного подхода снижается. Актуализируются ограничения подхода: отсутствие точных значений показателей защищенности для конкретных организаций, характера, вида и условий их деятельности; как следствие, за пределами модели остается планируемая или реальная экономическая эффективность системы ИБ. Иначе классификационный подход не обосновывает необходимость и достаточность предлагаемых решений по обеспечению ИБ и не позволяет производить «тонкую» настройку системы ИБ.

Подход к обеспечению ИБ на основе менеджмента риска

Рассмотренные ограничения классификационного подхода предполагают обращение к иным методам обеспечения ИБ, в том числе, реализующим идею соответствия защиты актуальности угроз. Основная трудность воплощения этой идеи состоит в установлении степени соответствия, т.е. в определении количественных характеристик ИБ и методов вычисления их значений.

¹РД Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации. М.: Гостехкомиссия России, 1992.

Действующие стандарты¹ предлагают альтернативную классификационному подходу методологию менеджмента информационных рисков, предполагающую исследование угроз ИБ, уязвимостей объектов безопасности, оценку и анализ защищенности ИС. В методологии используются несколько специфических понятий. Рассмотрим их в комплексе с ранее введенными понятиями и обозначениями.

Информационные активы

Поименуем объект ИБ $o_j \in O$ как *актив*. В соответствии с ГОСТ Р 13335-1 в качестве актива организации можно рассматривать «все, что имеет ценность для организации». Эта же позиция отражена и в ГОСТ Р 27005 (приложение В)² Тогда *информационный актив* (ИА) – любой актив, используемый в информационном обеспечении организации. В указанных стандартах приводится широкий перечень ИА:

- информация на электронных носителях (базы и файлы данных);
- аппаратно-программные средства, предназначенные для обработки информации;
- различные категории персонала, его компетенции и опыт;
- гудвилл (деловая репутация и имидж организации) и др.

Реализация угрозы в отношении любого ИА ведет к *ущербу* активу, который, исходя из приведенного перечня, может включать:

- *материальный ущерб*, оцениваемый в явном виде в количественном или стоимостном исчислении;
- *нематериальный ущерб* репутации, конкурентным преимуществам и т.п. (виды ущерба и типовые негативные последствия от реализации угроз ИБ приведены в методическом документе «Методика оценки угроз безопасности информации», выпущенном ФСТЭК России (2021)).

Риск нарушения информационной безопасности

Возникновение любой угрозы, например, t_i происходит случайно с вероятностью p_i . Соответственно ущерб ИА o_j в результате реализации угрозы t_i также случайное событие. Ущерб характеризуется величиной u_{ij} и вероятностью p_{ij} . При отсутствии средств защиты ИА, вероятность ущерба активу o_j равна вероятности возникновения угрозы t_i : $p_{ij} = p_i$.

По общему правилу предметную деятельность, сопряженную с возможным ущербом, называют *рисковой*, а показатель, характеризующий вероятность реализации угрозы и размер причиненного ей ущерба – *риском*. Выражение (3) формализует риск ущерба u_j для незащищенного актива o_j при реализации угрозы t_i

$$r_{ij} = p_{ij} \times u_{ij} = p_i \times u_{ij}. \quad (3)$$

Общий риск, создаваемый угрозами T , множеству активов O :

$$R = \sum_i \sum_j r_{ij}. \quad (4)$$

При расширении модели с полным перекрытием риск кроме *вероятности возникновения угрозы и величины ущерба* ИА в случае ее реализации должен учитывать *вероятность использования уязвимости* p_r ИА. Тогда при реализации угрозы t_i в отношении объекта o_j может быть причинен ущерб u_{ij} с вероятностью:

¹ ГОСТ Р 13335-1. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Концепция и модели менеджмента безопасности информационных и телекоммуникационных технологий; ГОСТ Р 27001. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования; и др.

² ГОСТ Р 27005. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Менеджмент риска информационной безопасности.

$$p_{ij} = p_i \times p_r, \quad (5)$$

где p_{ij} – вероятность ущерба, p_i – вероятность возникновения угрозы, p_r – вероятность использования уязвимости v_r .

Риск в этом случае можно представить выражением (6):

$$r_{ij} = p_i \times p_r \times u_{ij} \quad (6)$$

Такое понимание риска предложено стандартом NIST SP 800-30 Risk Management Guide for Information Technology Systems (США):

$$Risk = R(P(T,V),I), \quad (7)$$

где *риск* (R) – функция вероятности (P) использования угрозой (T) отдельной уязвимости (V) и результата воздействия (I) этой угрозы на ИА.

Выражение (7) можно интерпретировать как *остаточный риск*, т.е. риск, не устраненный принятыми мерами ИБ. Эту характеристику можно использовать для оценки стойкости барьера $b_l = \langle t_i, o_j, m_k \rangle$ [2], созданного средством m_k , предназначенным для противодействия угрозе t_i в отношении o_j :

$$Risk_l = p_i u_{ij} (1 - d_k). \quad (8)$$

В выражении (8) переменные p_i и u_{ij} введены нами выше, а переменная d_k характеризует стойкость средства m_k , определяемую вероятностью его преодоления.

Информационные активы подлежат защите. Очевидно, что в настоящее время затраты на ИБ являются обязательной частью ИТ-бюджетов, хотя и не генерируют доходы. Это значит, что их уровень должен быть приемлемым для организации, то есть некоторые виды затрат на ИБ необходимы, а другие могут быть уменьшены или исключены.

ГОСТ Р 13335-3 предлагал несколько подходов к обеспечению ИБ, отличающихся уровнем формализма при менеджменте риска:

- базовый подход (стандартный или общепринятый уровень ИБ) для всех ИА;
- неформальный подход к безопасности наиболее рискованных ИА, определенных экспертно;
- формальный подход, состоящий в детальном исследовании риска всех ИА;
- комбинированный подход, предполагающий экспертное выявление высокорисковых и/или критически важных ИА, затем детальный анализ их рисков. Для остальных ИА – применение базового подхода¹.

В настоящее время этот ГОСТ заменен на ГОСТ Р 27005, оперирующий двумя последовательно выполняемыми итерациями (приложение Е):

- идентификация высокоуровневых рисков ИБ, для которых возможно использование, по сути, базовых организационных и общих технических мер защиты;
- детальная оценка риска ИБ, включающая определение и оценку вышерассмотренных характеристик риска.

Нетрудно видеть, что ГОСТ Р 27005 содержательно охватывает в рассматриваемой части подходы ГОСТ Р 13335-3. Поэтому полезно остановиться на них более подробно.

Базовый подход

Базовый подход к обеспечению ИБ целесообразен в организациях, которые не имеют критических ИА, и при реализации угроз их восстановление не потребует значительных затрат. В настоящее время базовый уровень обеспечения ИБ рекомендован для любой организации. В общем случае базовый уровень ИБ определяется действующими нормативами и стандартами, лучшими практиками, знаниями и опытом специалистов. Справочные материалы и рекомендации по применению средств защиты на базовом уровне приведены в различ-

¹ ГОСТ Р 13335-3. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Часть 3. Методы менеджмента безопасности информационных технологий (отменен).

ных документах (например, Приказ ФСТЭК России № 21 «Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных» (2013) и приложение 2 к методическому документу ФСТЭК России «Меры защиты информации в государственных информационных системах» (2014)).

При практическом обеспечении базового уровня ИБ принимаются во внимание характерные угрозы ИА (вирусы, отказы оборудования, НСД и т. д.) Для противодействия угрозам используется типовой набор средств безопасности (антивирусы, фаерволы, средства резервного копирования, системы контроля и управления доступом). Вероятности реализации угроз, уязвимости и ущерб ИА не учитываются, т.е. остаточный риск принимается «как есть». Базовые решения также можно заимствовать у организаций с близкими по отраслевой принадлежности и условиями деятельности. За рубежом получила распространение реализация базового подхода, основанная на поиске инварианта разумных затрат на ИБ. Ведущие консалтинговые организации определили некое значение необходимых затрат на ИБ в пропорции от затрат на информационные технологии и детерминированное конкретными условиями предметной деятельности. Так, Gartner, Inc. определяет, что расходы организаций на обеспечение ИБ составляют 1-13 %, в среднем – 5-6 % ИТ-бюджета [3]. Данные компаний *PricewaterhouseCoopers* и *Forrester Research* находятся в указанном диапазоне, и составляют соответственно 3,7 и 10 % [4].

Результаты исследования, проведенного Deloitte и FS-ISAC, показывают, что средние затраты финансовых организаций на ИБ составляют \$1300-3000 на одного работника (10 % ИТ-бюджета) [5]. Это и есть упомянутая выше оценка на основе *best practice*, к которой можно обращаться, не проводя детальные расчеты. В этом случае задача создания системы ИБ может быть интерпретирована следующим образом: при заданном бюджете на ИБ найти оптимальный с функциональной точки зрения набор ИБ-решений в контексте деятельности организации.

Основные преимущества базового подхода:

- исключение затрат (в том числе, временных) на менеджмент рисков;
- повышение защищенности ИА в однородных организациях, имеющих близкие условия предметной деятельности, за счет унификации используемых решений.

Однако этот подход также имеет очевидные недостатки. Для конкретных организаций указанные пропорции являются достаточно абстрактным ориентиром, поскольку на величину ИБ-затрат существенным образом влияют отраслевая принадлежность, регион работы и масштаб организации. При этом не исключена возможность завышения или занижения защищенности ИА по сравнению с реальными, априори неизвестными потребностями организации.

Существуют и более сложные взаимосвязи между компонентами организаций и внешней средой [4]. В частности, сравнение затрат со среднеотраслевыми показателями не определяет текущее состояние ИБ в организации, поскольку даже одноуровневые затраты могут не обеспечивать соизмеримую защищенность. Gartner также отмечает, что многие организации некорректно используют средние значения расходов на ИБ, поскольку без учета бизнес-требований, допустимого риска и др. доля расходов на ИБ в ИТ-бюджете не достаточно информативна для бюджетного планирования. Данные о расходах на ИБ не могут служить показателем защищенности ИА [3]. Ориентация на средние показатели также, скорее всего, не позволит привлечь руководство организации к разработке проблем ИБ, поскольку ссылка на общепринятые требования к ИБ, формализованные в стандартах, будет достаточным обоснованием бюджета ИБ.

Неформальный и формальный подходы

В организациях, где наличие проблем в области ИБ имеет большое значение для предметной деятельности, ГОСТ Р 13335-3 рекомендовал оценивать информационные риски, используя неформальный (экспертный) подход. Преимуществом неформального подхода по сравнению с рассматриваемым ниже детальным подходом являются меньшие затраты в том числе времени на менеджмент риска. Особенности подхода: субъективные результаты оценки риска, возможные трудности обоснования мер защиты, ограниченность числа специалистов, обладающих необходимыми компетенциями. Эти особенности являются, по сути, ограничениями на применение неформального подхода к менеджменту риска.

В основе формального подхода лежат количественные методы детального анализа риска: проводится спецификация всех рисков путем идентификации активов и их уязвимостей, угроз и возможного ущерба в случае реализации угроз. Детальный анализ риска позволяет определить для каждого ИА актуальные угрозы и адекватные им меры защиты, а также разработать соразмерные рискам мероприятия для совершенствования системы ИБ (достоинства подхода). Однако использование формального подхода предполагает значительные затраты материальных ресурсов и времени квалифицированных, в том числе сторонних специалистов. Поэтому подход целесообразно использовать при критически высокой ценности ИА и необходимости «тонкой» настройки системы ИБ.

При этом актуальным является выбор допустимого уровня риска, поскольку существует вариативность способов выбора. Например, можно полагать, что текущий уровень обобщенного риска на определенную величину превышает максимально допустимое значение и провести соответствующие мероприятия по его обработке.

Также возможно итеративное нахождение наилучшего значения риска в области допустимых значений. В этом случае менеджмент риска является скорее творчеством, чем проектной работой, поскольку нормативные документы, например, ГОСТ 27005 рекомендует лишь общий алгоритм процесса.

Заключение

Методологии моделирования ИБ в целом подвержены общим ограничениям и сопряжены с трудностями практического применения:

- несовершенство моделей ИБ, включая трудности количественной оценки параметров ИБ;
- отсутствие формализованных зависимостей между уровнями безопасности, величинами среднегодовых потерь от реализации угроз ИА и затратами организации на обеспечение ИБ;
- высокая доля субъективных процедур в менеджменте ИБ;
- большая трудоемкость моделирования ИБ;
- необходимость привлечения к разработке моделей квалифицированных специалистов;
- отсутствие доступного программного инструментария поддержки моделирования ИБ и т.п.

Таким образом, моделирование (менеджмент) ИБ представляет собой нетривиальную задачу, особенно при недостаточности необходимого опыта у исполнителей.

Изложенные обстоятельства определяют актуальность дальнейших исследований, направленных на разработку научно-методологической базы, прикладных методов и инструментальных средств менеджмента ИБ, разработки научно обоснованных подходов к созданию безопасных ИС, а также подготовки специалистов в области ИБ.

Библиографический список

1. **Хоффман, Л.Дж.** Современные методы защиты информации / Л.Дж. Хоффман. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
2. **Астахов, А.** Анализ защищенности корпоративных систем // Открытые системы. 2002. № 7-8
3. **Gartner, Inc.** [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2016-12-09-gartner-says-many-organizations-falsely-equate-it-security-spending-with-maturity/> (дата обращения 20.07.2022).
4. **Asen, A.** Are You Spending Enough on Cybersecurity? / A. Asen, W. Bohmayr, S. Deutscher et al. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.bcg.com/publications/2019/are-you-spending-enough-cybersecurity> (дата обращения 20.07.2022).
5. **Comtois, J.** Financial services firms spend 6% to 14% of IT budget on cybersecurity – survey/ [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.pionline.com/article/20190501/ONLINE/190509988/financial-services-firms-spend-6-to-14-of-it-budget-on-cybersecurity-survey> (дата обращения 20.07.2022).

*Дата поступления
в редакцию: 20.07.2022*

*Дата принятия
к публикации: 18.10.2022*

УДК 517.977

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_37

СТАТИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ НЕУСТОЙЧИВЫХ МАТРИЦ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ СКАЛЯРНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

А.В. Мухин

ORCID: 0000-0003-2402-7016 e-mail: myhin-aleksey@yandex.ru

Национальный исследовательский

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Нижний Новгород, Россия

Рассмотрена задача стабилизации неустойчивых матриц линейных непрерывных стационарных систем с помощью скалярных регуляторов по выходу. В отличие от произвольной матрицы статического регулятора, скалярный регулятор определяется одним параметром. Благодаря этому упрощается как процедура синтеза регулятора, так и последующая реализация системы управления. Показано, что параметр скалярного регулятора, обеспечивающего устойчивость матрицы системы, может быть найден без применения алгебраических критериев, аппарата матричных неравенств, а также других процедур синтеза. Для реализации скалярного регулятора необходимо обеспечить выполнение двух основных условий. Во-первых, в матрице системы должен существовать хотя бы один устойчивый диагональный блок любой размерности, что вполне естественно для задач статической стабилизации по выходу. Во-вторых, в управлении и измерении должны использоваться одни и те же переменные состояния. Для этого требуется обеспечить равенство размерностей входа и выхода.

Ключевые слова: гурвицева матрица, статический регулятор, лемма Шура, теорема Гершгорина, теорема Ляпунова, матричная норма, задача выпуклого программирования, линейные матричные неравенства.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мухин, А.В. Статическая стабилизация неустойчивых матриц линейных систем с помощью скалярных регуляторов / А.В. Мухин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 37-45.

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_37

STATIC STABILIZATION OF UNSTABLE MATRICES IN LINEAR SYSTEMS USING SCALAR CONTROLLERS

A.V. Mukhin

ORCID: 0000-0003-2402-7016 e-mail: myhin-aleksey@yandex.ru

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The problem of stabilization of unstable matrices in linear time-invariant continuous-time systems using scalar output feedback controllers is considered. As opposed to an arbitrary matrix of a static controller, the scalar controller is defined by a single parameter. Thereby, both the controller synthesis procedure and the subsequent implementation of the control system are streamlined. According to the study, the scalar controller parameter that ensures system matrix stability may be determined without the use of algebraic criteria, matrix inequality calculator, and other synthesis procedures. Two primary conditions should be met to allow the scalar controller realization. Firstly, the system matrix should have at least one stable diagonal block in any number of dimensions, that is rather natural for static output feedback stabilization. Secondly, control and measurement should use the same state variables. This requires equal input and output dimensions.

Key words: Hurwitz matrix, static controller, Schur lemma, Gershgorin theorem, Lyapunov theorem, matrix norm, convex programming problem, linear matrix inequalities.

FOR CITATION: A.V. Mukhin. Static stabilization of unstable matrices in linear systems using scalar controllers. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. Pp. 37-45. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_37

Введение

Стабилизация неустойчивых матриц линейных систем с помощью статических регуляторов по выходу пользуется большим спросом в решении широкого круга задач управления. Некоторые подходы к ее решению можно найти в работах [1-6]. Наиболее широко используемые алгоритмы поиска решений приведены в работах [7-12]. В общем постановка задачи является NP-трудной [13].

В статье представлено решение задачи статической стабилизации неустойчивых матриц линейных систем с помощью скалярных регуляторов по выходу, которые можно считать частным случаем произвольных статических регуляторов по выходу. Основная идея использования такого регулятора состоит в стабилизации матрицы системы за счет смещения спектра неустойчивого подпространства в левую комплексную полуплоскость. Для этого достаточно задать скалярный параметр, величина которого может быть найдена аналитическим путем. Отдельный интерес представляет синтез скалярного регулятора минимальной величины. Показано, что задача синтеза такого регулятора является выпуклой и сводится к минимизации линейной функции на множестве, заданном линейным матричным неравенством. Основным требованием для реализации скалярного регулятора является совпадение управляемых и измеряемых переменных, а также блочно-однородный вид матриц входа и выхода [6]. Несмотря на то, что величина количества входов при этом может быть избыточной по сравнению с аналогичным значением в случае произвольного статического регулятора по выходу, предлагаемый регулятор может использоваться для сравнительного анализа и исследования переходных процессов в системе. Предполагается также, что в матрице системы существует хотя бы один устойчивый диагональный блок произвольной размерности.

Постановка задачи

Рассмотрим неустойчивую линейную непрерывную стационарную систему:

$$\dot{x} = Ax, \quad x(0) = x_0, \quad (1)$$

где $x \in R^n$ – состояние системы, $A \in R^{n \times n}$ – невырожденная матрица системы.

Для стабилизации (1) применим закон управления из класса статических обратных связей по выходу. Соответствующее уравнение примет замкнутый вид:

$$\dot{x} = A_c x = (A + BKC)x \quad (2)$$

где $B \in R^{n \times m}$ – матрица входа, $K \in R^{m \times p}$ – матрица регулятора, $C \in R^{p \times n}$ – матрица выхода.

Если $p = n$, то получаем статический регулятор по состоянию. Решение такой задачи сводится к решению линейного матричного неравенства и поэтому не представляет никаких трудностей. В случае $p < n$ имеем регулятор по измеряемому выходу. Соответствующая задача сводится к решению билинейного матричного неравенства [14]:

$$AY + YA^T + BKCY + YC^T K^T B^T < 0, \quad (3)$$

где $Y = Y^T > 0$.

В работе [13] отмечено, что задача поиска матрицы статического регулятора K , обеспечивающего устойчивость матрицы замкнутой системы (2), является частным случаем более общей проблемы, которая может быть сформулирована следующим образом.

Проблема. Дано аффинное семейство матриц:

$$A(q) = A_0 + \sum_{i=1}^l q_i A_i, \quad (4)$$

где A_i – заданные квадратные матрицы, а $q_i \in R$. Существует ли в этом семействе хотя бы одна устойчивая матрица?

В работе [13] также отмечено, что теоретическое решение этой проблемы неизвестно. В работе [6] показано, что если матрицы входа и выхода можно привести к блочно-однородному виду, то для существования статического регулятора по выходу необходимо и достаточно, чтобы в матрице системы существовал один устойчивый диагональный блок, размерность входа обеспечивала управляемость неустойчивого блока матрицы системы, а размерность выхода была равна размерности последнего.

Рассмотрим частный случай задачи (4) при условии $q_i = q$. Зададим сумму матриц A_i в (4) следующим образом:

$$\sum_{i=1}^l A_i = \begin{pmatrix} (I & 0) \\ (0 & 0) \\ (0 & 0) \\ (0 & I) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Тогда параметрическое семейство матриц примет один из двух видов:

$$A(q) = A + q \begin{pmatrix} (I & 0) \\ (0 & 0) \\ (0 & 0) \\ (0 & I) \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Для приведения матрицы замкнутой системы (2) к семейству матриц (6) необходимо, чтобы матрицы входа и выхода удовлетворяли условиям:

$$B = C^T = \begin{pmatrix} I_p \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

или:

$$B = C^T = \begin{pmatrix} 0 \\ I_p \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Из (7) и (8) следует, что управляемые и измеряемые переменные должны совпадать. Это возможно только при равенстве $p = m$. Отметим, что в более общем случае, единичные блоки матриц входа и выхода можно заменить квадратными матрицами полного ранга. Таким образом, задача звучит следующим образом: найти параметр q , обеспечивающий гурвицевость матриц вида (6), эквивалентных матрице замкнутой системы (2) со скалярным регулятором $K = qI_p$. Как будет показано ниже, конкретный вид матрицы (6) зависит от расположения неустойчивого подпространства, определяемого неустойчивым диагональным блоком матрицы системы.

Синтез скалярных регуляторов по выходу

Рассмотрим произвольную действительную невырожденную матрицу линейной системы:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Будем считать, что в матрице (9) существует устойчивое подпространство в виде диагонального блока произвольной размерности. Это означает, что такую матрицу можно разбить на блоки таким образом, что один из диагональных блоков будет устойчивым. Наиболее вероятен случай, когда размерность устойчивого блока будет меньше размерности неустойчивого. В соответствии с этим, представим матрицу системы в блочном виде с квадратными диагональными блоками следующим образом:

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Далее докажем лемму:

Лемма 1. Необходимым условием существования статического регулятора по выходу, обеспечивающего гурвицевость матрицы замкнутой системы (2) является устойчивость хотя бы одного диагонального блока в исходной матрице (10).

Доказательство. Пусть в матрице A один из диагональных блоков является гурвицевым. Разобьем эту матрицу на блоки в соответствии с (10). Для определенности будем считать, что блок $A_{22} \in R^{k \times k}$, где $1 \leq k < n$, гурвицев. Исходя из этого, зададим матрицы входа и выхода в виде (7), а соответствующие размерности приравняем к размерности неустойчивого блока:

$$p = m = n - k. \quad (11)$$

Тогда, в соответствии с (6), матрица замкнутой системы (2) со скалярным регулятором примет вид:

$$A_c = \begin{pmatrix} A_{11} + qI & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

В соответствии с теоремой Гершгорина о локализации собственных значений [15], весь спектр такой матрицы будет локализован в объединении в объединении $n - k$ кругов:

$$\bigcup_1^{n-k} \left\{ \lambda \in C: |\lambda - (a_{ii} + q)| \leq \sum_{j=1, j \neq i}^n |a_{ij}| \right\} = G(A^{11}), \quad (13)$$

а также в объединении k кругов:

$$\bigcup_1^k \left\{ \lambda \in C: |\lambda - a_{ii}| \leq \sum_{j=1, j \neq i}^n |a_{ij}| \right\} = G(A^{22}), \quad (14)$$

где $A^{11} = [A_{11} + qI \quad A_{12}]$, $A^{22} = [A_{21} \quad A_{22}]$.

За счет выбора отрицательного значения параметра q можно добиться расположения всех кругов $G(A^{11})$ в левой комплексной полуплоскости. Если при этом условие гурвицевости матрицы A_{22} не выполняется, то стабилизировать всю матрицу (12) параметром q , перемещая только круги $G(A^{11})$, в общем случае будет невозможно, так как часть спектра $G(A^{22})$ будет локализована в правой комплексной полуплоскости. Таким образом, если в исходной матрице не существует ни одного устойчивого диагонального блока, то стабилизировать такую матрицу статическим регулятором по выходу в общем случае невозможно. Лемма доказана.

Отметим, что условие леммы справедливо не только для стабилизации системы с помощью скалярной матрицы, но также и для стабилизации посредством произвольного статического регулятора по выходу. Если один из блоков $A_{ii} \in R^{k \times k}$ является устойчивым и, кроме того, выполняются условия диагонального преобладания [15]:

$$|a_{jj}| \geq \sum_{i=1, i \neq j}^n |a_{ji}|, j = \overline{1, k}, \quad (15)$$

то для стабилизации такой матрицы с помощью скалярного регулятора достаточно обеспечить выполнение условия диагонального преобладания для неустойчивого подпространства:

$$\alpha^2 \geq \max_{j=k+1, n} \left\{ \sum_{i=1}^n |a_{ji}| \right\} \quad (16)$$

В таком случае получается простое решение, так как достаточно только переместить все круги, расположенные в правой полуплоскости в левую, и тем самым обеспечить устойчивость всей матрицы. Рассмотрим более общий случай. Будем считать, что условие гурвицевости одного из блоков сохраняется, но при этом условие диагонального преобладания не выполняется. Как и ранее будем считать, что блок $A_{22} \in R^{k \times k}$ гурвицев. Покажем, что в этом случае также стабилизируя неустойчивый блок A_{11} можно обеспечить стабилизацию всей матрицы. Применительно к рассматриваемому случаю докажем следующую теорему.

Теорема. Если в матрице системы нижний диагональный блок является гурвицевым, то параметр скалярного регулятора, обеспечивающего устойчивость матрицы замкнутой системы (12), может быть найден из следующего неравенства:

$$\alpha^2 > \frac{1}{2} \|A_{11} + A_{11}^T + (A_{12} + A_{21}^T)(A_{22} + A_{22}^T)^{-1}(A_{12} + A_{21}^T)^T\|_{\infty}, \quad (17)$$

Доказательство. Пусть $q = -\alpha^2$. В соответствии с леммой 1 матрицу замкнутой системы со скалярным регулятором при условии (7) можно записать как:

$$A_c = \begin{pmatrix} A_{11} - \alpha^2 I & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Из теоремы Ляпунова следует [14], что, если матрица A_c гурвицева, то:

$$\exists Y = Y^T > 0 \rightarrow A_c Y + Y A_c^T < 0. \quad (19)$$

Рассмотрим решение неравенства (19) в классе блочно-диагональных матриц $Y = \begin{pmatrix} Y_{11} & 0 \\ 0 & Y_{22} \end{pmatrix}$. С учетом этого представим его в виде симметрической отрицательно определенной матрицы:

$$\begin{pmatrix} (A_{11} - \alpha^2 I)Y_{11} + Y_{11}(A_{11} - \alpha^2 I)^T & A_{12}Y_{22} + Y_{11}A_{21}^T \\ (A_{12}Y_{22} + Y_{11}A_{21}^T)^T & A_{22}Y_{22} + Y_{22}A_{22}^T \end{pmatrix} < 0, \quad (20)$$

где $Y_{ii} > 0$.

Применим лемму Шура [14] и перепишем неравенство (20) в нелинейном виде:

$$(A_{11} - \alpha^2 I)Y_{11} + Y_{11}(A_{11} - \alpha^2 I)^T < (A_{12}Y_{22} + Y_{11}A_{21}^T)\mathcal{X}^{-1}(A_{12}Y_{22} + Y_{11}A_{21}^T)^T, \quad (21)$$

где $\mathcal{X} = A_{22}Y_{22} + Y_{22}A_{22}^T < 0$.

Убеждаемся, что разрешимость (21) можно обеспечить двумя матрицами $Y_{11} > 0$ и $Y_{22} > 0$, а также скалярным параметром $\alpha^2 \neq 0$. Это означает что решение (19) в классе блочно-диагональных матриц Y оправдано. Группируя слагаемые в (21) получим:

$$2\alpha^2 > (A_{11}Y_{11} + Y_{11}A_{11}^T + (A_{12}Y_{22} + Y_{11}A_{21}^T)\mathcal{X}^{-1}(*)^T)Y_{11}^{-1}, \quad (22)$$

где $(*)^T = (A_{12}Y_{22} + Y_{11}A_{21}^T)^T$.

Как видно, разрешимость (22) можно обеспечить при любых ненулевых значениях положительно определенных матриц Y_{11} и Y_{22} . Считая их единичными, получим:

$$2\alpha^2 > A_{11} + A_{11}^T + (A_{12} + A_{21}^T)(A_{22} + A_{22}^T)^{-1}(A_{12} + A_{21}^T)^T. \quad (23)$$

Переходя к строчной матричной норме в (23), приходим к неравенству (17). Теорема доказана.

Неравенство (17) показывает, что величина регулятора может быть найдена из оценки строчной нормы матричной функции, определяемой блоками A_{ij} матрицы системы. Увеличивая величину такого регулятора можно повышать запас устойчивости системы.

Вычисленный согласно (17) регулятор является, вообще говоря, произвольным и отличным от минимально возможного. Рассмотрим теперь задачу вычисления минимального скалярного регулятора. Все введенные выше условия относительно матрицы системы сохраняются. Будем по-прежнему решать задачу в классе блочно-диагональных матриц функции Ляпунова. Как известно (см., например, [7]), билинейное матричное неравенство (3) разрешимо тогда и только тогда, когда разрешима система:

$$\begin{aligned} \mathcal{N}_C^T(Y^{-1}A + A^T Y^{-1})\mathcal{N}_C &< 0, \\ \mathcal{N}_B^T(AY + YA^T)\mathcal{N}_B &< 0, \end{aligned} \quad (24)$$

где \mathcal{N}_C и \mathcal{N}_B^T – ядра матриц C и B^T , соответственно.

Видно, что система (24) не является системой линейных матричных неравенств, и ее решение представляет NP-трудную задачу. Покажем, что в рассматриваемом случае задача может быть заметно упрощена и сведена к задаче выпуклой оптимизации. Сделаем для этого следующие преобразования. Введем матрицу $X = Y^{-1} = \begin{pmatrix} X_{11} & 0 \\ 0 & X_{22} \end{pmatrix}$, $X_{ii} = Y_{ii}^{-1}$ и представим центральные матрицы системы (24) в виде двух связанных блочных матриц:

$$F = XA + A^T X = \begin{pmatrix} F_{12} & F_{12} \\ F_{12}^T & F_{22} \end{pmatrix} \quad (25)$$

$$S = XA + A^T X = \begin{pmatrix} S_{12} & S_{12} \\ S_{12}^T & S_{22} \end{pmatrix}. \quad (26)$$

С учетом того, что матрицы B^T и C удовлетворяют (7), то система (24) примет вид:

$$\begin{aligned} F_{22} &< 0, \\ S_{22} &< 0. \end{aligned} \quad (27)$$

Замечая, что $F_{22} = X_{22}S_{22}X_{22}$, приходим к одному неравенству $S_{22} < 0$, которое эквивалентно:

$$A_{22}Y_{22} + Y_{22}A_{22}^T < 0. \quad (28)$$

В силу гурвицевости A_{22} это неравенство разрешимо. Таким образом, вместо исходной системы (24) получаем одно линейное матричное неравенство относительно блока $Y_{22} > 0$. Так как верхний блок Y_{11} не входит в (28), то его можно задать произвольной положительно определенной матрицей. Считая его единичной матрицей, перепишем (20) в виде:

$$\begin{pmatrix} A_{11} + A_{11}^T + 2\alpha^2 I & A_{12}Y_{22} + A_{21}^T \\ (A_{12}Y_{22} + A_{21}^T)^T & A_{22}Y_{22} + Y_{22}A_{22}^T \end{pmatrix} < 0, \quad (29)$$

где $Y_{22} > 0$.

Таким образом, задача синтеза минимального по абсолютной величине скалярного регулятора сводится к решению следующей оптимизационной задачи:

$$\begin{cases} \alpha^2 \rightarrow \min, \\ \begin{pmatrix} A_{11} + A_{11}^T + 2\alpha^2 I & A_{12}Y_{22} + A_{21}^T \\ (A_{12}Y_{22} + A_{21}^T)^T & A_{22}Y_{22} + Y_{22}A_{22}^T \end{pmatrix} < 0, \\ Y_{22} > 0. \end{cases} \quad (30)$$

Решение задачи (30) позволит найти ближайшую устойчивую матрицу к заданной неустойчивой матрице. Отметим, что задача (30) представляет минимизацию линейной функции на множестве, заданном линейным матричным неравенством и, следовательно, является выпуклой. Такая задача может быть решена стандартными средствами Robust Control Toolbox пакета MATLAB [16]. Поскольку левый верхний блок в (29) должен быть отрицательно определенной матрицей, нижняя граница параметра α^2 определяется неравенством:

$$\alpha^2 \geq \|[A_{11} \ A_{12}]\|_{\infty}. \quad (31)$$

Пример

Проиллюстрируем применение полученных результатов на следующем примере. Зададим произвольную неустойчивую матрицу системы размерности $n = 10$ случайным образом с помощью встроенных команд пакета MATLAB и представим ее в блочном виде (10) с квадратными диагональными блоками. Будем считать, что нижний блок размерности $k = 4$ является устойчивым. Для простоты зададим его в виде отрицательно определенной матрицы

$$A_{22} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -4 \end{pmatrix}. \quad (32)$$

Выпишем остальные блоки матрицы системы:

$$A_{11} = 0.1 \times \begin{pmatrix} 6.8372 & 3.2881 & 7.3496 & 6.8503 & 7.7193 & 4.8448 \\ 1.3208 & 6.5381 & 9.7060 & 5.9794 & 2.0567 & 1.5185 \\ 7.2272 & 7.4913 & 8.6693 & 7.8936 & 3.8827 & 7.8193 \\ 1.1035 & 5.8319 & 0.8623 & 3.6765 & 5.5178 & 1.0061 \\ 1.1749 & 7.4003 & 3.6644 & 2.0603 & 2.2895 & 2.9407 \\ 6.4072 & 2.3483 & 3.6920 & 0.8667 & 6.4194 & 2.3737 \end{pmatrix}, \quad (33)$$

$$A_{12} = 0.2 \times \begin{pmatrix} 8.4622 & 2.5300 & 6.3496 & 11.1148 \\ 13.1115 & 2.6861 & 6.3286 & 3.6887 \\ 14.4585 & 1.9719 & 4.3513 & 4.2406 \\ 10.6242 & 2.8405 & 5.0208 & 1.5469 \\ 2.1764 & 3.3650 & 17.8584 & 18.2760 \\ 12.6353 & 3.9250 & 14.0645 & 14.1343 \end{pmatrix} \quad (34)$$

$$A_{21} = 0.3 \times \begin{pmatrix} 16.7337 & 29.6380 & 2.2198 & 12.0655 & 4.8340 & 20.5661 \\ 9.4029 & 5.1130 & 20.5229 & 18.6202 & 22.7434 & 8.8245 \\ 4.9861 & 7.7338 & 12.0716 & 4.6311 & 26.1333 & 15.9189 \\ 18.6749 & 11.9040 & 29.4851 & 11.4404 & 10.5233 & 24.9727 \end{pmatrix}. \quad (35)$$

Спектральная абсцисса матрицы системы равна:

$$\max_{1 < i < 10} \{Re \lambda_i(A)\} = 14.2874. \quad (36)$$

Положительное значение спектральной абсциссы свидетельствует о неустойчивости заданной матрицы. Размерность неустойчивого диагонального блока A_{11} равна 6. Исходя из этого, зададим размерности входа и выхода:

$$p = m = 6 \quad (37)$$

Зададим матрицы B и C в виде (7). Тогда матрица замкнутой системы примет вид (18). Для вычисления стабилизирующего параметра α^2 воспользуемся неравенством (17) и получим:

$$\|A_{11} + A_{11}^T + (A_{12} + A_{21}^T)(A_{22} + A_{22}^T)^{-1}(A_{12} + A_{21}^T)^T\|_{\infty} \approx 291. \quad (38)$$

Откуда имеем $\alpha^2 > 145$. При $\alpha^2 = 145$ получаем спектральную абсциссу:

$$\max_{1 \leq i \leq 10} \{Re \lambda_i(A_c(\alpha^2))\} = -0.4517. \quad (39)$$

Следовательно, матрица замкнутой системы устойчива. Если увеличить величину регулятора вдвое, то величина спектральной абсциссы составит:

$$\max_{1 \leq i \leq 10} \{Re \lambda_i(A_c(2\alpha^2))\} = -0.7657, \quad (40)$$

что соответствует увеличению запаса устойчивости системы в 1,7 раза.

Вычислим теперь минимальный скалярный регулятор. Для этого решим задачу (30) с помощью решателя `mincx` пакета MATLAB. Получаем минимальное значение скалярного регулятора $\alpha_{min}^2 \approx 94$. Убеждаемся, что матрица замкнутой системы также является гурвицевой:

$$\max_{1 \leq i \leq 10} \{Re \lambda_i(A_c(\alpha_{min}^2))\} = -0.0199. \quad (41)$$

Матрица $Y_{22} = Y_{22}^T$, при которой достигается минимальное значение регулятора, равна:

$$Y_{22} = \begin{pmatrix} 3.7766 & -0.4402 & -3.4424 & -2.6033 \\ * & 7.6368 & 0.8905 & 0.2209 \\ * & * & 11.6819 & 2.7988 \\ * & * & * & 11.6789 \end{pmatrix}. \quad (42)$$

Таким образом, решение оптимизационной задачи (30) для рассматриваемого примера позволило найти регулятор, величина которого в полтора раза меньше величины произвольного регулятора.

Заключение

Представлено решение задачи стабилизации линейной непрерывной стационарной системы с помощью скалярного регулятора по выходу. Основными преимуществами предложенного регулятора является простота процедуры синтеза, а также простота реализации соответствующей системы управления. Показано, что задача синтеза минимального скалярного регулятора сводится к решению линейного матричного неравенства. Применение полученных результатов продемонстрировано на примере.

Автор благодарит профессора кафедры дифференциальных уравнений, математического и численного анализа ИТММ Дмитрия Владимировича Баландина за полезные советы.

Библиографический список

1. **Syrmos, V.L.** Static Output Feedback. A Survey / V.L. Syrmos, C.T. Abdallah, P. Dorato, K. Grigoriadis // *Automatica*. 1997. Vol.33, №. 2. Pp. 125-137.
2. **Astolfi, A.** Static output feedback stabilization of linear and nonlinear systems / A. Astolfi, P. Colaneri // *Proc. 39th Conf. on Decision and Control*, Sydney, Australia, 2000.

3. **Astolfi, A.** An algebraic characterization for the static output feedback stabilization problem / A. Astolfi, P. Colaneri // American Control Conference. Arlington, VA, 2001. Pp. 1408-1413.
4. **Kimura, H.** Pole assignment by gain output feedback // IEEE Trans. AC. 1975. Vol. AC-20. Pp. 509-516.
5. **Röbenack, K.** Stabilization by static output feedback: a quantifier elimination approach / K. Röbenack, R. Voswinkel, Mirco Franke, Matthias Franke // Proc. Int. Conf. Syst. Theory, Control, Computing (ICSTCC 2018), Sinaia, Romania, 2018.
6. **Мухин, А.В.** О существовании статических регуляторов по выходу // Управление большими системами. 2022. Т. 96. С. 16-30.
7. **Баландин, Д.В.** Синтез регуляторов на основе решения линейных матричных неравенств и алгоритма поиска взаимно-обратных матриц / Д.В. Баландин, М.М. Коган // Автоматика и телемеханика. 2005. № 1. С. 82-99.
8. **Hassibi, A.** A path following method for solving BMI problems in control / A. Hassibi, J. How, S. Boyd // Proceedings of American Control Conference. 1999. V. 2. Pp. 1385-1389.
9. **Henrion, D.** Solving polynomial static output feedback problems with PENBMI / D. Henrion, J. Lofberg et. al. // Proc. joint IEEE Conf. Decision Control and Europ. Control Conf., Sevilla, Spain, 2005.
10. **Caو, Y.-Y.** Static output feedback stabilization: an LMI approach / Y.-Y. Cao, J. Lam, Y.-X. Sun // Automatica. 1998. V. 34. Pp. 1641-1645.
11. **El Ghaoui, L.** A cone complementarity linearization algorithm for static output-feedback and related problems / L. El Ghaoui, F. Oustry, M. Aitrami // IEEE Transactions on Automatic Control. 1997. V. 42. Pp. 1171-1176.
12. **Sadabadi, M. S.** From static output feedback to structured robust static output feedback: A survey / M.S. Sadabadi, D. Peaucelle // Annual Reviews in Control. 2016. V. 42. Pp. 11-26.
13. **Поляк, Б.Т.** Трудные задачи линейной теории управления. Некоторые подходы к решению / Б.Т. Поляк, П.С. Щербаков // Автоматика и телемеханика. 2005. № 5. С. 7-46.
14. **Баландин, Д.В.** Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств / Д.В. Баландин, М.М. Коган. – М.: Физматлит, 2007.
15. **Хорн, Р.** Матричный анализ / Р. Хорн, Ч. Джонсон. – М.: Мир, 1989.
16. **Gahinet, P.** The LMI Control Toolbox. For Use with Matlab. User's Guide / P. Gahinet, A. Nemirovski, A.J. Laub, M. Chilali. – Natick, MA: The MathWorks, Inc., 1995.

*Дата поступления
в редакцию: 11.08.2022*

*Дата принятия
к публикации: 18.10.2022*

УДК 303.732.4

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_46

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОБМЕНА И ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ И ЗАКРЫТОСТИ ОТ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Д.А. Пальгуев

ORCID: 0000-0003-2584-7657 e-mail: dmi-palguev@yandex.ru

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского
Нижний Новгород, Россия

На примере специализированной автоматизированной системы обработки и обмена радиолокационной информации приводится пример построения структуры системы, обладающей только необходимыми функциями маршрутизации и обработки информации, и одновременно – за счет организационно-технического построения – в достаточной мере изолированной от внешней среды. Ограничение набора функций позволяет использовать отечественные технические решения, основанные на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) средней производительности, которые, в свою очередь, давно освоены российской промышленностью. Подобный подход к построению структуры специализированной информационной системы позволяет решить актуальную в настоящее время проблему импортозамещения широкофункциональных импортных микросхем.

Ключевые слова: специализированные информационные системы, радиолокационная информация, сетевая структура, плездохронная цифровая иерархия, синхронная цифровая иерархия.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пальгуев, Д.А. Анализ структуры специализированной системы обмена и обработки радиолокационной информации с точки зрения импортозамещения и закрытости от внешней среды // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 46-55. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_46

ANALYSIS OF A DEDICATED RADAR DATA EXCHANGE AND PROCESSING SYSTEM IN TERMS OF IMPORT PHASEOUT AND ISOLATION FROM THE ENVIRONMENT

D.A. Palguev

ORCID: 0000-0003-2584-7657 e-mail: dmi-palguev@yandex.ru

Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Using a dedicated automated radar data exchange and processing system, the authors give an example of the construction of system structure providing only necessary functions for data routing and processing yet adequately isolated from the environment due to its technical and organizational architecture. A limited set of functions allows for the use of technical solutions based on mid-range field-programmable gate arrays (FPGAs) which, in turn, are well-known to the Russian Industry. Such an approach to the construction of a dedicated data system provides a solution to a topical issue of import phaseout for feature-rich import microchips.

Key words: dedicated data systems, radar data, network structure, plesiochronous digital hierarchy, synchronous digital hierarchy

FOR CITATION: D.A. Palguev. Analysis of a dedicated radar data exchange and processing system in terms of import phase-out and isolation from the environment. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. Pp. 46-55. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_46

Введение

В настоящее время в общем многообразии различных систем обработки и обмена информацией имеются находящиеся в эксплуатации, а также недавно разработанные специализированные системы, которые для своего функционирования не требуют подключения к цифровым сетям Internet. Скорее наоборот – именно узкой специализацией подобных систем объясняется нежелательность подключения к сетям общего доступа. Вместе с тем, специализация не требует широкого набора функций и наличия большой пропускной способности, имеющих в сетях общего пользования. Например, к специализированным относится автоматизированная система обработки и обмена радиолокационной информацией (АСОИ) [1].

В статье рассматривается вариант построения структуры АСОИ, который технически и организационно максимально удален от Internet-сетей общего пользования, т.е. система является искусственно более «закрытой», чем это принято в общих подходах построения систем обработки данных и управления. Кроме того, вследствие ограничений на используемые протоколы обмена данными и по пропускной способности, эта система имеет достаточно простую и доступную реализацию. Эта возможность является существенной в современных условиях обеспечения импортозамещения. Настоящая работа может рассматриваться как продолжение и развитие исследований [1] по построению структуры специализированной информационной системы обработки и обмена РЛИ. Рассматриваемая автоматизированная система обработки и обмена РЛИ имеет полностью сетевую структуру и в своей основе построена по критерию минимизации времени нахождения информации в системе, т.е. время задержки при вводе информации в систему и при обработке в узлах системы имеет решающее значение для обеспечения эффективности ее функционирования. В комбинированном варианте (при совместной работе существующей и перспективной систем обработки информации) структура специализированной системы [1] представлена на рис. 1.

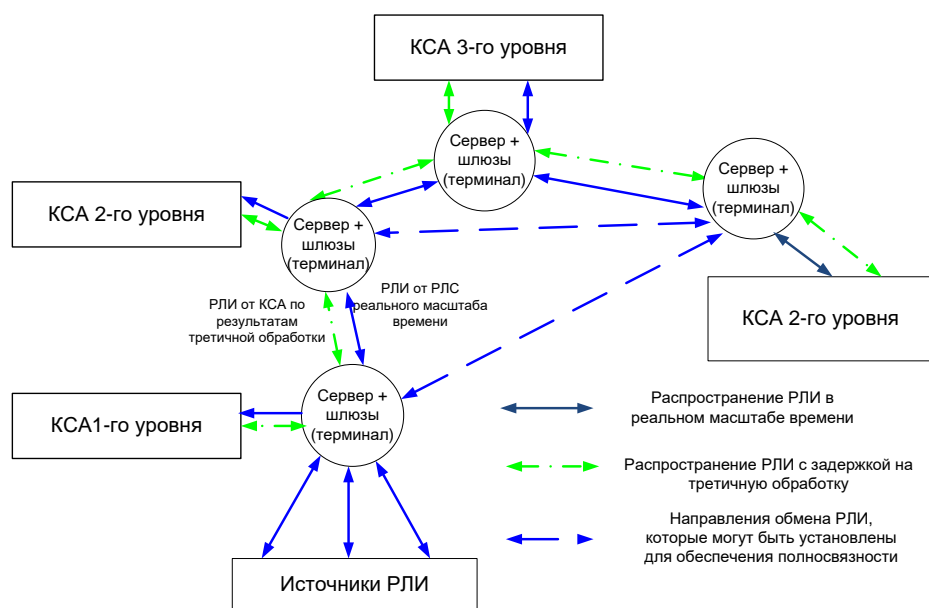


Рис. 1. Структура специализированной системы обработки и обмена РЛИ в комбинированном варианте

Fig. 1. The structure of a dedicated RDAT processing and exchange system

Обработка РЛИ производится на серверах [2], которые, в свою очередь, являются составной частью терминалов, имеющих в своем составе шлюзы, выполняющие функцию конвертации протоколов информации, получаемой от источников, в единый протокол, используемый при обработке и обмене информацией в системе.

С одной стороны, минимизация времени нахождения информации в системе требует уменьшить количество узлов, при прохождении которых возможно возникновение временных задержек. Они связаны, в первую очередь, с использованием пакета протоколов прикладного, сетевого, транспортного и канального уровней ТСП/IP [3], в которых приоритет может быть отдан, без применения специальных мер, пакетам IP-телефонии и видео реального времени. С другой стороны, при обмене информацией в сети Internet возможен несанкционированный доступ к пакетам, обрабатываемым на общедоступных серверах.

Определенным решением этих проблем может быть построение структуры специализированной системы на основе цифровых потоков плезиохронной цифровой иерархии PDH [4]. В этом случае обработка информации, маршрутизация пакетов осуществляется только на выделенных серверах, составляющих узлы специализированной системы и имеющих специальное программное обеспечение (СПО) обработки и обмена. Промежуточные серверы при этом не нужны, так как они вносят дополнительные задержки и являются точками возможно несанкционированного доступа. В случае же применения плезиохронных систем получение информации из первичных цифровых стыков сопряжено с необходимостью последовательного выделения всех цифровых потоков в соответствии с иерархией, то есть для получения информации из основного цифрового канала ОЦК 64 кбит/с производится демультимплексирование, например, из E3 соответствующего E2, затем E1, и только после этого возможен доступ к соответствующему ОЦК. Это свойство плезиохронных систем на определенном этапе развития являлось их недостатком и требовало наличия большого количества аппаратуры на пунктах выделения каналов, но в данном случае построения специализированной системы обработки и обмена информацией оно является средством для «закрытия» системы от взаимодействия с внешней сетевой средой.

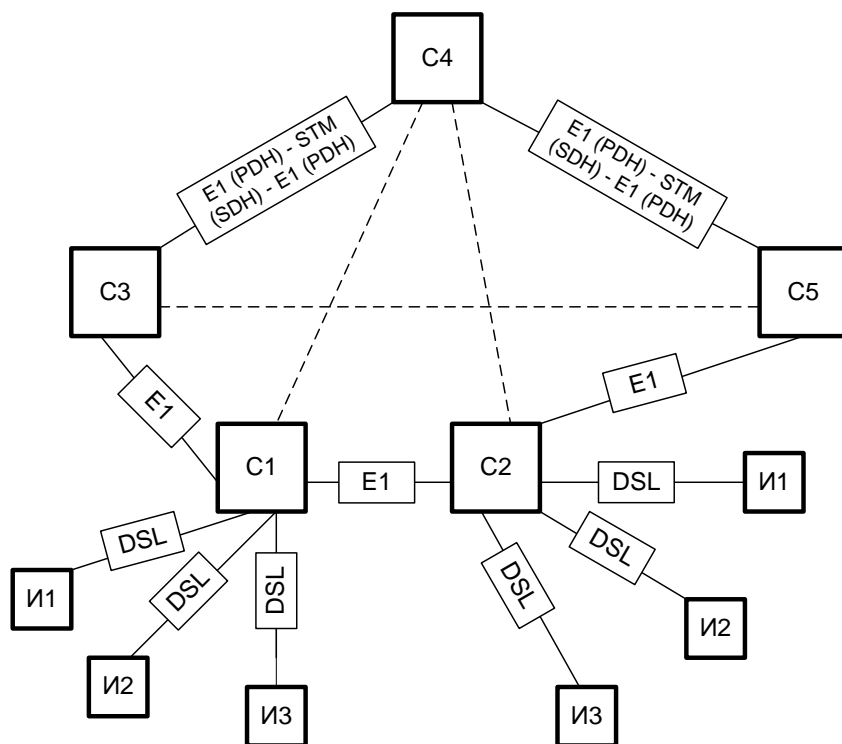


Рис. 2. Структура специализированной системы обработки и обмена данными

Fig. 2. The structure of a dedicated data processing and exchange system

Соответственно, вполне логично основать структуру специализированной автоматизированной системы обработки и обмена информацией на узлах (серверах), имеющих в своей основе компьютеры с СПО обработки и маршрутизации, а каналы обмена информацией

между серверами обеспечить с помощью средств плезеохронной иерархии, основанных на схеме «точка-точка». На рис. 2 показан вариант построения структуры специализированной системы на основе серверов С1...С5, составляющих основу структуры, и содержащие СПО обработки, маршрутизации и конвертации логических протоколов. К серверам С1 и С2 подключаются по три источника информации. Штриховые линии обозначают возможные линии передачи данными для обеспечения полносвязности структуры. Между серверами С3 и С4, а также между С4 и С5 предполагаются линии большой протяженности (несколько десятков или сотен километров). Преобразования протоколов канального и прикладного уровней показаны на рисунке на соответствующих линиях передачи информации.

Кроме указанного недостатка по демультиплексированию всех уровней иерархии до нужного цифрового потока, для РДН систем существенным является ограничение по длине рабочего участка при работе по медным линиям, она составляет всего несколько километров в зависимости от скорости передачи информации. Для практической реализации важны два участка специализированной системы – участок сбора информации от источников до соответствующего узла (сервера) системы, и участки между серверами системы, имеющие большую протяженность – от нескольких десятков до сотен километров. Решение этих вопросов представляется по-разному для различных случаев.

Особенности передачи информации от источников до узла (сервера) специализированной системы

На участках первичного сбора информации расстояние между источниками и пунктами сбора информации (серверами, терминалами) не превышает, как правило, 10-15 км. В РЛС существующего парка, которые будут эксплуатироваться еще длительное время, как правило, для обмена информацией выделяется физическая линия или канал тональной частоты с пропускной способностью 1,2-9,6 кбит/с, при этом применяются разновидности протокола серии V (наиболее применимые V.22-V.32) [5]. Передача данных с использованием указанного протокола обеспечивается как раз на дальностях 10-15 км. Однако низкая скорость передачи данных приводит к временным задержкам при определенной плотности воздушных объектов, информацию о которых необходимо передавать в систему.

Если предположить, что распределение воздушных объектов в зоне обнаружения РЛС носит нормальный или равномерный характер, то характер распределения на выходе РЛС после вторичной обработки и формирования трасс в значительной степени зависит от плотности входного распределения и пропускной способности канала передачи данных от источника к узлу обработки информации.

В ходе нескольких экспериментов было проведено имитационное моделирование воздушной обстановки с нормальным распределением воздушных объектов в зоне обнаружения одной РЛС. Одновременно производились измерения времени задержки информации в канал передачи данных в зависимости от изменения плотности воздушных объектов. Изменение плотности ВО достигалось уменьшением сектора обзора, в котором обнаруживались воздушные объекты. Для измерений использовалась серийная аппаратура, работающая по алгоритму «Аккорд-СС-ПД».

Экспериментальные исследования проводились для следующих исходных данных. Воздушные объекты находились в секторе 90° и в зоне обнаружения 360° по азимуту. Для каждого моделируемого пространственного расположения ВО было произведено от 600 до 700 измерений. Во всех случаях скорость передачи данных была равна 2400 бит/с. На этой скорости передачи данных производительность РЛС должна быть не менее 100 трасс ВО.

Результаты проведенных экспериментальных исследований отражены на рис. 3 и 4.

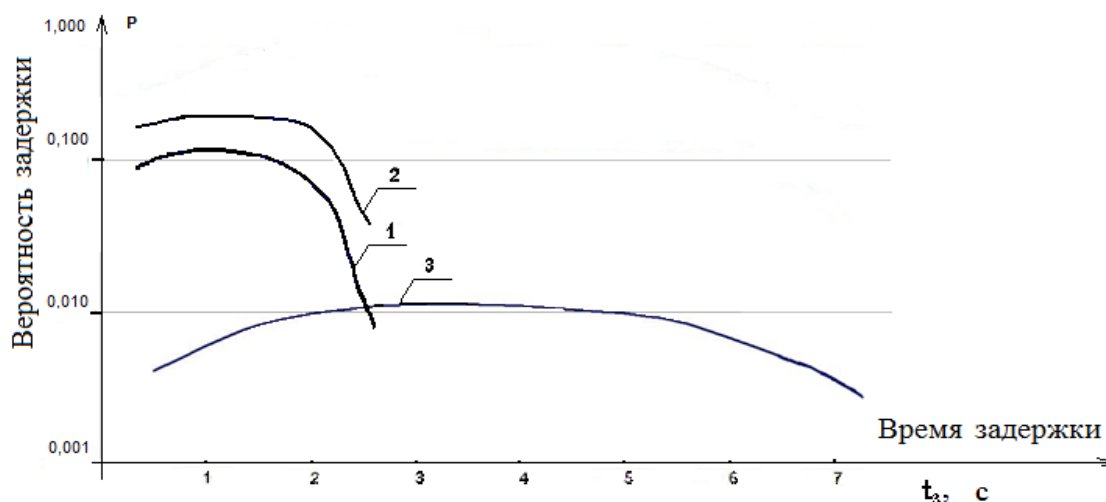


Рис. 3. Плотности распределения вероятности времени задержки кодограмм при выдаче в канал передачи данных для сектора 90° зоны обнаружения

Fig. 3. Probability density functions for the delay time at code message transfer to a data channel for 90° sector of detection zone

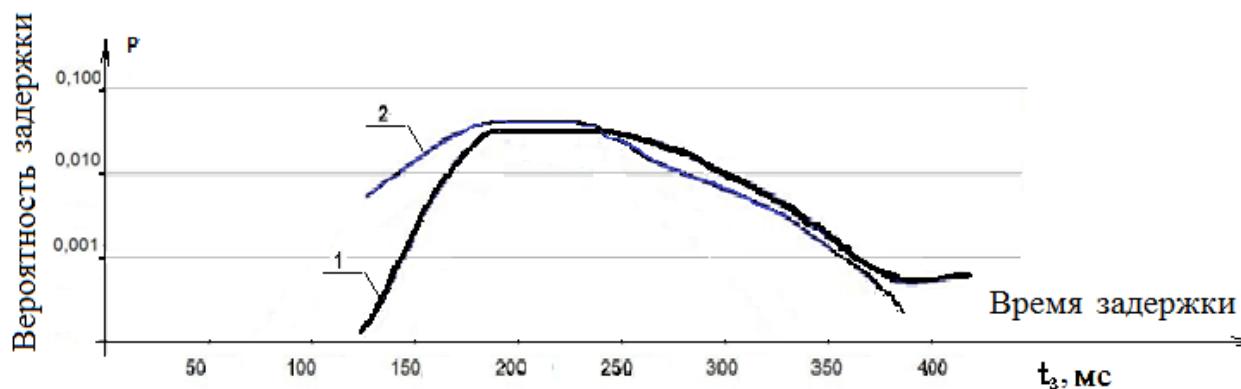


Рис. 4. Статистические плотности распределения вероятности времени задержки кодограмм при выдаче в канал передачи данных для зоны обнаружения 360°

Fig. 4. Statistical probability density functions for the delay time at code message transfer to a data channel for 360° detection zone

На рис. 3 представлено семейство зависимостей – статистические плотности распределения вероятности времени задержки кодограмм при выдаче в канал передачи данных, с учетом пространственного расположения ВО в секторе 90° зоны обнаружения РЛС. На этом рисунке кривая 1 соответствует наличию в секторе зоны обнаружения 60 трасс ВО, кривая 2 – 70 трасс ВО, а кривая 3 – 100 трасс ВО. Из рис. 3 следует, что с ростом числа трасс ВО в секторе 90° зоны обнаружения РЛС время задержки выдачи кодограмм в канал связи увеличивается. Так, для 60 и 70 трасс ВО время задержки выдачи сообщений в канал связи составляет 2,2-2,3 с. При расположении 100 трасс ВО в том же секторе время задержки становится более 7,5 с и последующие кодограммы должны «стирать» предыдущие как потерявшие актуальность.

На рис. 4 представлено семейство зависимостей – статистические плотности распределения вероятности времени задержки кодограмм при выдаче в канал передачи данных, с учетом равномерного пространственного расположения ВО во всей зоне обнаружения РЛС – 360°. Кривая 1 соответствует наличию во всей зоне обнаружения 60 трасс ВО, кривая 2 – 70 трасс ВО. Из рис. 4 следует, что время задержки выдачи кодограмм в канал связи увеличивается, не превышая при этом значения 400 мс. По графикам экспериментальных данных можно предположить, что полученные плотности вероятности временных задержек сообщений о ВО подчинены распределению Пуассона или распределению Рэля.

Пуассоновская модель обычно описывает схему событий с ожиданием: при некотором превышении плотности потока событий образуется «очередь» на обработку или последующий переход к следующему процессу. Такое изменение потока событий характерно, например, для теории массового обслуживания. Если количество испытаний n достаточно велико, а вероятность P появления события A в отдельно взятом испытании весьма мала (0,05-0,1 и меньше), то вероятность того, что в данной серии испытаний событие A появится ровно m раз, можно приближенно вычислить по формулам:

$$P = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}, \quad (1)$$

$$\lambda = np. \quad (2)$$

Стоит отметить, что это распределение по большей части зависит от параметра λ (математического ожидания), которое определяет максимум на графике плотности распределения Пуассона. На рис. 5 представлено распределение Пуассона для графиков экспериментальных данных, приведенных на рис. 3.

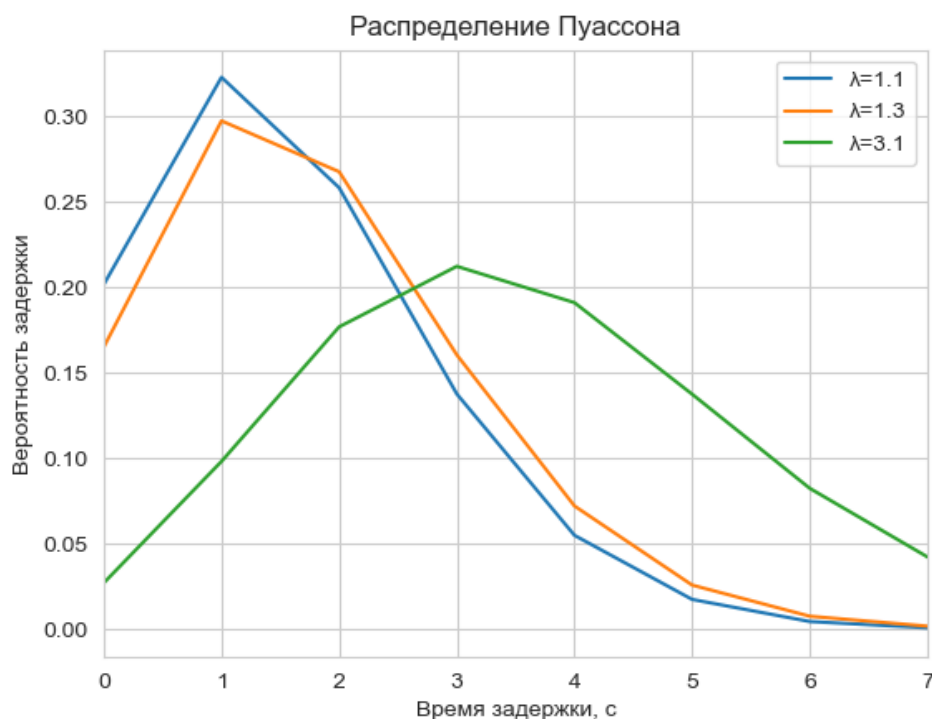


Рис. 5. Теоретические плотности распределения вероятности времени задержки кодограмм при выдаче в канал передачи данных без интерполяции

Fig. 5. Theoretical probability density functions for the delay time at code message transfer to a data channel without interpolation

Графики представляют собой ломаные линии ввиду того, что распределение является дискретным. Чтобы приблизить теоретический график и посчитать максимальное и среднее отклонения была проведена интерполяция базисными сплайнами с использованием модуля `interpolate` библиотеки `scipy` (рис. 6). В табл. 1 приведены значения невязки экспериментальных значений плотности распределения вероятностей с теоретическими.

Таблица 1.

Значения невязки

Table 1.

Misclosure values

Значение λ на графике	Максимальное отклонение	Среднее отклонение
1,1	0,0194=1,94 %	0,055=5 %
1,3	0,1342=13,42 %	0,12=12 %
3,1	0,195=19,5 %	0,185=18,5 %

Анализ значений невязки табл. 1 позволяет сделать вывод, что распределение Пуассона достаточно точно подходит для описания эксперимента с большим количеством измерений. Это, в свою очередь, согласуется с теоретическим представлением о распределении Пуассона, как распределения для «очереди с ожиданием».

Проведенные эксперименты и вычисления позволяют сделать следующие выводы:

- значения времени задержки могут составлять величины, существенно ухудшающие достоверность и своевременность информации;
- на участке сбора информации от источников до узлов обработки и ввода информации в систему необходимо применять более высокоскоростные линии передачи данных.

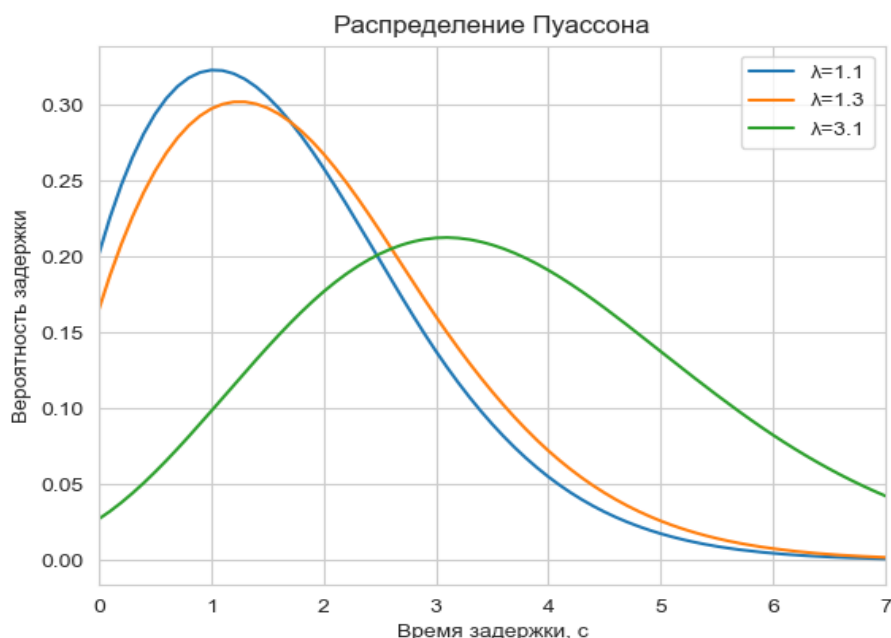


Рис. 6. Теоретические плотности распределения вероятности времени задержки кодограмм при выдаче в канал передачи данных с интерполяцией

Fig. 6. Theoretical probability density functions for the delay time at code message transfer to a data channel with interpolation

В этом отношении очень хорошо подходят протоколы семейства DSL, которые обладают несимметричностью в отношении пропускной способности (от источников скорость передачи информации значительно выше, чем от узлов обработки), а современные технологии позволяют поддерживать скорость передачи данных до 2 Мбит/с на расстояниях до 12-14 км. Это фактически полностью устраняет возможность перехода нормального или равномерного распределения воздушных объектов на входе источников (в зоне обнаружения воздушных объектов) в пуассоновское на их выходе.

Особенности передачи данных на протяженных участках

После сбора и обработки информации на серверах, являющимися узлами специализированной системы сетевой структуры, происходит конвертация в единый протокол системы обмена и обработки. Обмен между серверами также целесообразно осуществлять с использованием единых стандартов плезиохронной иерархии PDH, которая отвечает требованиям минимизации времени задержки при доставке информации от источников потребителю. Время задержки является составной частью времени нахождения информации в специализированной системе.

Как отмечалось выше, передача данных по стандартам PDH по медным линиям имеет серьезный недостаток – малая длина регенерационного участка. Решение этой проблемы возможно осуществить двумя основными способами. Первый – на протяженных участках осуществлять преобразование стандартов PDH в стандарты SDH с одновременным подключением к магистральным линиям передачи данных, в основном волоконно-оптическим, с использованием конвертеров E1 (PDH) – STM (SDH) [6]. Процесс прямого и обратного преобразования давно освоен при организации и эксплуатации цифровых линий связи, элементная база, применяемая при этом, также освоена отечественной промышленностью и разработчиками. Для обеспечения функционирования специализированной системы с заданной эффективностью необходима такая организация структуры системы, при которой отсутствовали бы промежуточные преобразования из базового потока 155 Мбит/с стандарта SDH, то есть внутри сетевой структуры предпочтительны связи между серверами по схеме «точка-точка».

Второй подход по обеспечению обмена на увеличенные расстояния более высокотехнологичен. Здесь имеется в виду технология «MetroEthernet» – передача синхронных потоков E1 в асинхронной среде Ethernet [7]. Указанная технология возможна только по схеме «точка-точка» и решается аппаратно-программным способом. Она обеспечивает гарантированную полосу пропускания с гарантированной задержкой, что позволяет синхронизировать цифровые потоки стандарта E1 PDH в асинхронной среде семейства стандартов IEEE 802,3 и эмулировать E1 окончание в существующих Ethernet или IP сетях. В ряде случаев такое решение представляется более удобным, при наличии высокоскоростных линий протяженностью до 40 км. Можно допустить, что эти технологические решения в настоящее время ограничено доступны.

При построении специализированной системы не требуется дорогостоящее серверное оборудование, использование магистральных цифровых потоков необходимо только на достаточно больших расстояниях между узлами сети, участки протяженностью 12-14 км реализуются на технологиях и протоколах стандартов DSL. Технические решения преобразования стандарта E1 возможны с использованием ПЛИС среднего уровня производительности на отечественной элементной базе. В специфических случаях, при расстояниях от источников до пунктов сбора и обработки информации в несколько сотен километров, при расположении их в труднодоступных районах, возможно использование спутниковой связи с комплексным применением стандартов TDMA и QPSK [8].

Выводы

Приведенный подход к построению структуры специализированной системы обработки и обмена информации позволяет:

- 1) обеспечить нормальное распределение на входе и выходе системы обработки информации, не допустить перехода нормального распределения в пуассоновское и тем самым нарушить функционирование системы, основанной на критерии минимизации времени нахождения информации в системе;
- 2) минимизировать технологические решения при построении структуры специализированной системы обработки и обмена информации. Основными технологиями при построении структуры являются освоенные отечественной промышленностью и разработчиками сочетания технологий, стандартов и протоколов, принадлежащих различным уровням моделей OSI и TCP/IP: DSL, IEEE 802.3, PDH (E1) и SDH (STM);
- 3) организационно и технически на этапе построения специализированной системы обеспечить ее «закрытость» и изолированность от сетей общего пользования;
- 4) при построении специализированных систем обработки и обмена информации массово применить относительно недорогое отечественное оборудование, что является решением вопроса импортозамещения в современных условиях.

Информационные системы, полностью или частично построенные на основе подобного комплексного подхода, применимы в таких областях [9-15], как системы управления воздушным движением; многолучевые, многопозиционные и многодиапазонные радары (орнитологические, метео- и др.), радары для охранных комплексов, некогерентные пространственно-разнесенные источники РЛИ, объединенные в систему.

Библиографический список

1. Пальгуев, Д.А. Сочетание алгоритмов обработки информации и структуры информационной системы как инструмент построения информационной системы сетевой структуры // Радиопромышленность. 2021. Т. 31. № 2. С. 49-60.
2. Пат. 135152 РФ, МПК G01S 13/91 (2006.01), G06F 13/00 (2006.01). Сервер сетевой информационной структуры / Пальгуев Д.А., Радаева А.С. Заявлен 24.06.2013. Оpubл. 27.11.2013; бюл. № 33.
3. RFC 1122, Requirements for Internet Hosts – Communication Layers, R. Braden (ed.), October 1989.
4. UTI-T Rec G.703 (11/2001)/ Physical/electrical characteristics of hierarchical digital interfaces. SERIES G: Transmission systems and media, digital systems and networks / Digital terminal equipments – General.
5. ITU-T Recommendations [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/index.aspx?ser=V> (дата обращения 09.07.2022).
6. Передача потока Ethernet по каналам E1/STM | QTECH [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.qtech.ru/solutions/operators/peredacha-potoka-ethernet-po-kanalam-e1-stm/?ysclid=15gk5a4499466138947> (дата обращения 11.07.2022).
7. TDMoIP шлюз | TERRATEL [Электронный ресурс] // Режим доступа: / <https://www.terratel.eu/ru/tdm-over-ip-gateway.html> (дата обращения 15.07.2022).
8. Пат. 159704 РФ, МПК H04B 7/00 (2006.01). Мобильная узловая станция спутниковой связи для совместной работы в стандартах «Full mesh» TDMA и QPSK / Пальгуев Д.А., Борцов Е.Н. № 2015138336/07; заявл. 08.09.2015; опубл. 20.02.2016; бюл. № 5.
9. Хомяков, А.В. Алгоритмы совместной траекторной обработки в многопозиционном радиолокационном комплексе / А.В. Хомяков, В.И. Филипченков, Ю.И. Мамон // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 2. С. 305-314.
10. Архимандритов, И.Б. Задача разработки модели цифровой платформы сбора, обработки и распространения пространственных данных, построенной с использованием сетевцентрической авиационной системы мониторинга / И.Б. Архимандритов, С.Г. Белов, В.С. Верба и др. // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 5. С. 8.
11. Коновалов, А.А. Алгоритм завязки траектории цели в асинхронном многопозиционном радиолокационном комплексе // Радиотехника. 2012. № 7. С. 50-55.

12. **Кирюшкин, В.В.** Межпозиционное отождествление результатов измерений и определение координат воздушных целей в многопозиционной радиолокационной системе на беспилотных летательных аппаратах / В.В. Кирюшкин, Н.С. Волков // Теория и техника радиосвязи. 2019. № 1. С. 107-116.
13. **Журавлев, А.В.** Алгоритм межпозиционного отождествления результатов измерений в суммарно-дальномерной многопозиционной радиолокационной системе в условиях многоцелевой обстановки / А.В. Журавлев, В.В. Кирюшкин, А.В. Коровин // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 180-189.
14. **Воронина, Н.Г.** Проблемные вопросы решения задач при вторичной и третичной обработке данных в системах освещения обстановки / Н.Г. Воронина, А.В. Шафранюк // Материалы конференции «Управление в морских системах» (УМС-2018). – СПб., 2018. С. 215-221.
15. Многолучевые радиолокаторы в составе охранных комплексов. Антитеррор / под ред. И.К. Антонова. – М: Радиотехника, 2017. – 216 с.

*Дата поступления
в редакцию: 11.08.2022*

*Дата принятия
к публикации: 18.10.2022*

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 532.2

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_56

О ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ДВОЙНИКАХ ВЗРЫВНЫХ НАГРУЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ПЛАЗМЫ

А.О. БликовORCID: 0000-0002-3585-7827 e-mail: mcleodjr@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Г.С. Яндубаев**ORCID: 0000-0003-4943-1410 e-mail: gsyandubaev@vniief.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***М.А. Мочалов**ORCID: 0000-0002-6549-8984 e-mail: mamochalov@vniief.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***С.В. Ерунов**ORCID: 0000-0002-3406-3208 e-mail: sverunov@vniief.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.А. Огородников**ORCID: 0000-0002-8301-8016 e-mail: vaogorodnikov@vniief.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Предложена расчетная схема взрывного нагружающего устройства для исследования экстремальных состояний неидеальной плазмы, реализующихся в устройствах термоядерной энергетики (гидродинамический двойник, ГДД). Она позволяет моделировать движение оболочек такого устройства с помощью задания на внешней границе камеры высокого давления граничного условия второго рода. Преимуществом подхода является удобство представления манеры счета посредством замены подбираемых входных параметров, характеризующих нагружающее устройство, диаграммой скорости наружной границы оболочки первого каскада, проверяемой экспериментально в опытах с газодинамическими макетами нагружающих устройств. Применение ГДД позволит осуществить валидацию имеющихся в России и за рубежом уравнений состояния, разработать более совершенные расчетные коды для численного моделирования устройств лазерного и газодинамического термоядерного синтеза.

Ключевые слова: термоядерный синтез, взрывные нагружающие устройства, квазиизэнтропическая сжимаемость, газодинамическое моделирование, неидеальная плазма, дейтерий, гелий.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бликов, А.О. О гидродинамических двойниках взрывных нагружающих устройств для исследования экстремальных состояний плазмы / А.О. Бликов, Г.С. Яндубаев, М.А. Мочалов, С.В. Ерунов, В.А. Огородников // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 56-65. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_56

ON HYDRODYNAMIC TWINS OF EXPLOSIVE LOADING DEVICES FOR INVESTIGATING THE EXTREME STATES OF PLASMAS

A.O. Blikov

ORCID: **0000-0002-3585-7827** e-mail: **mcleodjr@mail.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

G.S. Yandubaev

ORCID: **0000-0003-4943-1410** e-mail: **gsyandubaev@vniief.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.A. Mochalov

ORCID: **0000-0002-6549-8984** e-mail: **mamochalov@vniief.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

S.V. Erunov

ORCID: **0000-0002-3406-3208** e-mail: **sverunov@vniief.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.A. Ogorodnikov

ORCID: **0000-0002-8301-8016** e-mail: **vaogorodnikov@vniief.ru**
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. A simplified calculated scheme of an explosive loading device for researching the extreme states of non-ideal plasma realized in thermonuclear energy devices (hydrodynamic twin, HDT) is proposed. It allows simulating the motion of the shells of such device by specifying a second-type boundary condition on the external boundary of the high-pressure chamber. The advantage of this approach is convenience of representing the manner of counting by replacing the selected input parameters characterizing the loading device with the velocity diagram of the external boundary of the shell of the first cascade, which is verified experimentally in experiments with gas-dynamic models of loading devices. The application of HDT will make it possible to validate the equations of state available in Russia and abroad, to develop more advanced calculation codes for numerical simulation of laser and gas-dynamic fusion devices.

Key words: thermonuclear fusion, explosive loading devices, quasi-isentropic compressibility, gas-dynamic computation, non-ideal plasma, deuterium, helium.

FOR CITATION: A.O. Blikov, G.S. Yandubaev, M.A. Mochalov, S.V. Erunov, V.A. Ogorodnikov. On hydrodynamic twins of explosive loading devices for investigating the extreme states of plasmas. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. Pp. 56-65. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_56

Введение

Исследование свойств водорода, гелия, их смеси в области мегабарных давлений обусловлено их применением в объектах перспективной энергетики, включая устройства лазерного, газодинамического и комбинированного термоядерного синтеза [1]. Работа указанных устройств основана на иницировании ядерных реакций в сильно сжатом и разогретом ядерном топливе. Высокая концентрация энергии в таких объектах вызывает процессы термической ионизации и/или ионизацию давлением. При этом возникает плазма, физическое описание которой чрезвычайно затруднено в силу крайней сложности происходящих процессов. В мишенях управляемого термоядерного синтеза с инерционным удержанием плазмы харак-

терные термодинамические параметры составляют [1]: $P = 2 \cdot 10^7$ ГПа, $\rho = 150-200$ г/см³, $T = 10^{12}$ К. Данные экстремальные параметры вещества, исходя из современного уровня науки и техники, не могут быть достигнуты и экспериментально изучены в лабораторных условиях, следовательно, основным источником информации о физике работы перспективных термоядерных устройств является расчетно-теоретическое моделирование.

При моделировании физической схемы импульсного термоядерного реактора наиболее трудным является описание состояния неидеальной плазмы, когда энергия кулоновского взаимодействия частиц сравнима или превосходит кинетическую энергию их движения, а эффекты вырождения электронов существенны для расчета уравнений состояния (УРС) и степени ионизации такой плазмы. В данных состояниях теория предсказывает ряд качественно новых физических эффектов, таких как металлизация, плазменные фазовые переходы, диэлектризация и т. д., которые необходимо учитывать при построении УРС сильносжатой плазмы. Эти обстоятельства являются постоянно действующим стимулирующим фактором по экспериментальному изучению свойств неидеальной плазмы мощными ударными волнами, для возбуждения которых используются взрывные плоские, цилиндрические, полусферические и сферические устройства, легкогазовые пушки, мощные лазеры, электродинамические ускорители и взрывомагнитные генераторы.

Особое значение имеет экспериментальная техника мощных ударных волн, которая сегодня является важным источником информации о поведении плазмы в области рекордно высоких температур и давлений мегабарно-гигабарного диапазона, характерных для начального этапа термоядерных реакций. Впервые экспериментальные исследования свойств неидеальной плазмы в указанном диапазоне давлений проведены в 1970-х гг. во ВНИИЭФ, С.Б. Кормером с сотрудниками [2], с использованием взрывных устройств, в которых исходно газообразный водород сжимался серией падающих и отраженных ударных волн возрастающей амплитуды и медленно сходящейся к центру оболочкой. В эксперименте посредством безжелезных бетатронов на рентгеновскую пленку фиксировали форму и размер сжимаемой полости с газом на заданный момент времени. По серии опытов определяли состояние, соответствующее максимальному сжатию плазмы, из которого с использованием закона сохранения массы вычисляли ее среднюю плотность.

Применение такого метода, названного квазиизэнтропическим, позволяет значительно снизить нагрев плазмы, а значит и многократно превзойти диапазон термодинамических состояний однократного ударно-волнового сжатия. В опытах по исследованию квазиизэнтропической сжимаемости газов [2-5], проводимых в РФЯЦ-ВНИИЭФ, давление, реализующееся в газовой полости в момент максимального сжатия, определяется из «сквозного» газодинамического моделирования нагружающего устройства на фирменных комплексах [6-8] РФЯЦ-ВНИИЭФ. «Сквозным» этот газодинамический расчет называется, поскольку содержит исчерпывающую информацию о взрывном нагружающем устройстве, описывает все этапы его работы и все его компоненты с помощью УРС, верифицированных по результатам других экспериментов. Исходный код расчетного комплекса РФЯЦ-ВНИИЭФ, а также полная информация о задании подобного расчета не может быть раскрыта в открытой печати по соображениям защиты информации. Это делает невозможным прямое воспроизведение газодинамических расчетов, на основании согласия которых с результатами экспериментов обосновывается правильность расчетного давления в газовой полости.

В связи с этим перед исследователями встает задача нахождения представления экспериментальных результатов в форме, доступной для моделирования без применения указанных расчетных комплексов для газодинамических расчетов и без предоставления исчерпывающей информации о взрывном нагружающем устройстве. Такое представление позволит любому исследователю проводить перекрестные расчеты разработанных в РФЯЦ-ВНИИЭФ устройств для квазиизэнтропического сжатия газов и осуществлять валидацию различных уравнений состояния и расчетных комплексов.

В настоящей работе предложено представить нагружающее устройство с помощью его упрощенной схемы – гидродинамического двойника (ГДД) – позволяющего моделировать движение оболочек первого и второго каскадов с помощью задания на внешней границе камеры высокого давления граничного условия второго рода (зависимости от времени скорости наружной границы оболочки первого каскада).

Преимуществом такого подхода является бóльшая прозрачность и удобство представления манеры счета посредством замены подбираемых входных параметров, характеризующих нагружающее устройство, диаграммой скорости наружной границы оболочки первого каскада, проверяемой экспериментально в опытах с газодинамическими макетами нагружающих устройств цилиндрической [3-4] и сферической [2, 4, 5] геометрии. Схема экспериментов неоднократно приводилась в предыдущих работах [4-5], концепция численного моделирования изложена в [9].

Общие свойства гидродинамических двойников

Гидродинамический двойник включает в себя:

- 1) данные о начальной геометрии каскадов экспериментального устройства;
- 2) данные о начальных условиях в газовых полостях;
- 3) расчетную диаграмму скорости наружной границы оболочки первого каскада (в качестве граничного условия), полученную из верифицированного в эксперименте сквозного расчета;
- 4) экспериментальные результаты, отражающие динамику движения оболочек вблизи максимального сжатия газовой полости.
- 5) данные по использованным УРС, кроме непосредственно исследуемого газа.

На рис. 1-2 представлены одномерные срезы сквозного расчета и гидродинамического двойника для опыта по квазиизэнтропическому сжатию дейтерия до давления $P = 18500$ ГПа [5] и правое граничное условие для гидродинамического двойника.

В табл. 1 приведено сравнение расчетных термодинамических параметров, реализующихся в газовой полости на момент максимального сжатия, полученных в сквозном расчете и гидродинамическом двойнике с точностью до шестой значащей цифры. Графа «относительное отклонение расчетов» дает представление о величине относительной ошибки, вызываемой переходом от сквозного расчета к гидродинамическому двойнику. Расчеты проводились с помощью комплекса [6]. Здесь и далее времена отсчитываются от подрыва ВВ (без учета работы системы инициирования).

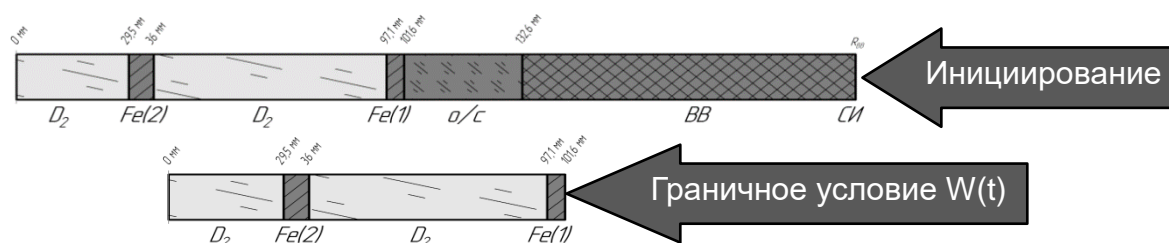


Рис. 1. Одномерные срезы сквозного расчета и гидродинамического двойника

Fig. 1. One-dimensional cuts of an end-to-end calculation and its hydrodynamic twin

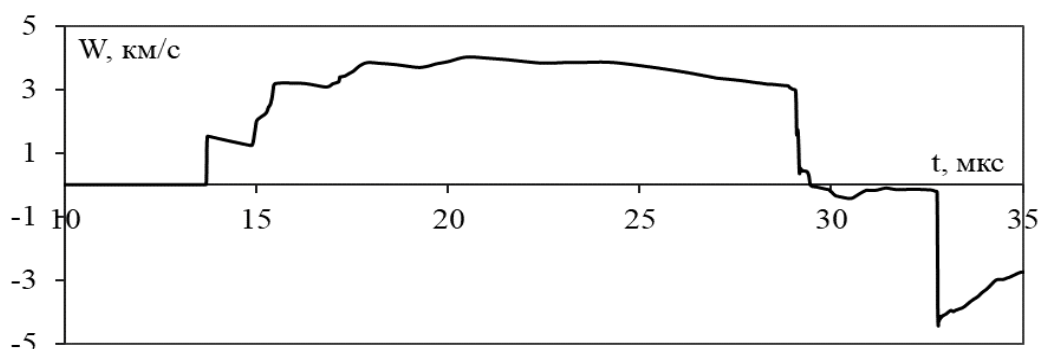


Рис. 2. Диаграмма скорости, задаваемая как «правое» граничное условие в ГДД

Fig. 2. Velocity diagram as «right» boundary condition in HDT

Таблица 1.

Сравнение расчетных средневзвешенных термодинамических параметров в газовой полости на момент максимального сжатия по сквозному расчету и ГДД до шестой значащей цифры

Table 1.

Comparison of calculated weighted average thermodynamic parameters in the gas cavity at the time of maximum compression by end-to-end calculation and HDT up to the sixth significant digit

		Р, ГПа	Т, К	ρ , г/см ³
Сквозной расчет	средневзвешенное	18550,64	56803,34	13,81451
	средневзвешенное отклонение	625,1535	34683,22	1,294620
Гидродинамический двойник	средневзвешенное	18551,55	56803,08	13,81447
	средневзвешенное отклонение	627,4126	34673,97	1,297090
Относительное отклонение расчетов	средневзвешенное	0,0049 %	0,00046 %	0,00029 %
	средневзвешенное отклонение	0,36 %	0,027 %	0,19 %

В расчетном комплексе [6] РФЯЦ-ВНИИЭФ для представления вещественных чисел используется двойная точность, что соответствует 15-значимым числам. Соответственно, полученная из сквозного расчета зависимости от времени скорость наружной границы оболочки первого каскада, используемая для задания граничного условия, может быть определена с такой же точностью. Однако для гидродинамического двойника задавать таким образом граничное условие не требуется. На рис. 3 проиллюстрированы зависимости относительного отклонения расчетных средневзвешенных термодинамических параметров в газовой полости на момент максимального сжатия, полученных из гидродинамических двойников с граничными условиями, заданными с различной длиной мантииссы. Эти отклонения рассчитаны относительно гидродинамического двойника, для которого в граничном условии заданы 15 значащих цифр, и сквозного расчета.

Таким образом, профиль скорости в гидродинамическом двойнике достаточно указывать с точностью до пятого знака после запятой. Это не приводит к отклонению газодинамических параметров на момент максимального сжатия свыше отклонения гидродинамического двойника от сквозного расчета. Также для граничного условия гидродинамического двойника не обязательно указывать всю зависимость скорости наружной оболочки первого каскада (НГО-1) от времени вплоть до разворота внутренней границы оболочки второго каскада (ВГО-2). Например, отсутствие участка торможения первого каскада на втором в зависимости скорости НГО-1 от времени не оказывает влияния на параметры максимального сжатия. На рис. 4 гидродинамический двойник построен на основе зависимости скорости НГО-1 от времени, полученной из сквозного расчета без второго каскада (присутствовали только первый каскад и газ во внешней полости), при этом непосредственно в двойнике были заданы оба каскада.

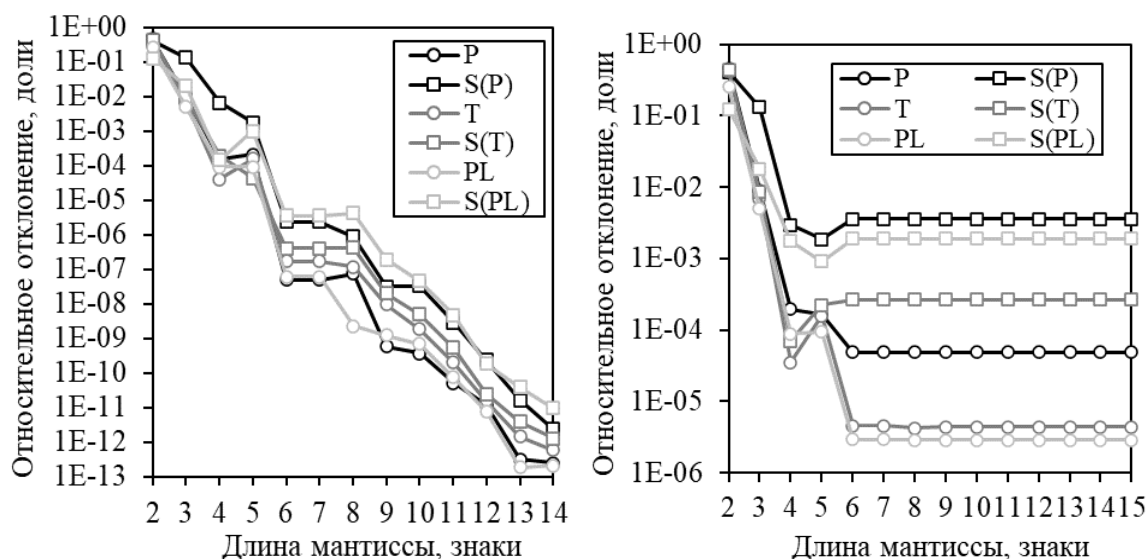


Рис. 3. Относительное отклонение средневзвешенных расчетных параметров в газовой полости на момент максимального сжатия при уменьшении мантиисы в граничном условии: относительно двойника с граничным условием, заданным 15 значащими цифрами (слева) и относительно сквозного расчета (справа)

Fig. 3. The relative deviation of the weighted average calculated parameters in the gas cavity at the time of maximum compression with a decrease in the mantissa in the boundary condition: relative to the HDT with the boundary condition given by 15 significant digits (left) and to the end-to-end calculation (right)

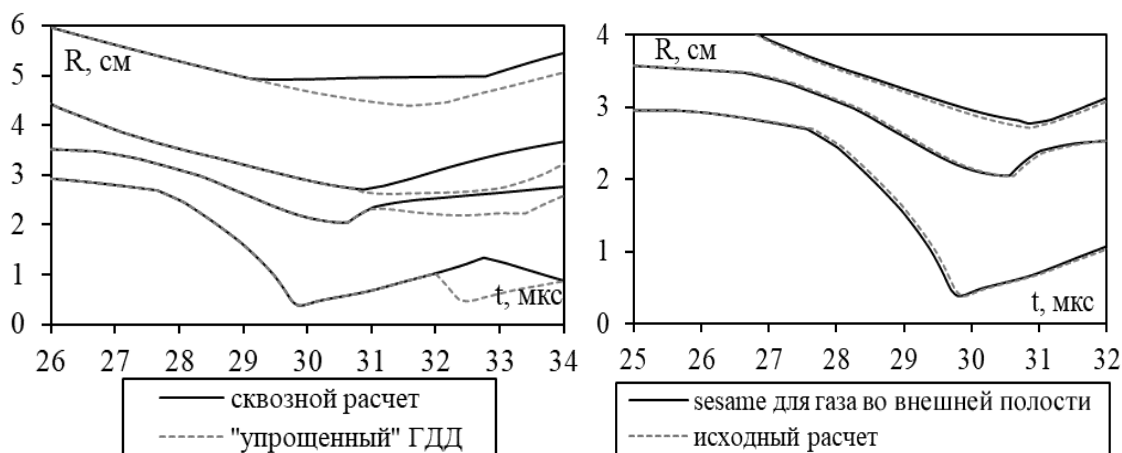


Рис. 4. Сравнение сквозного расчета и ГДД, построенного на основе расчета без второго каскада (слева) и сравнение сквозного расчета с УРС Копышева-Хрусталева [10] и ГДД, построенного на основе этого сквозного расчета, с SESAME [11-12] в качестве УРС газа во внешней полости (справа)

Fig. 4. Comparison of end-to-end calculation and HDT based on calculation without second cascade (left) and comparison of end-to-end calculation with Kopyshv-Khrustalev EOS [10] and HDT based on this end-to-end calculation with EOS SESAME [11-12] for gas in the external cavity (right)

Такое упрощение допустимо, поскольку вызывает возмущение, проявляющееся позже максимального сжатия. Можно сказать, что участок зависимости скорости НГО-1 от времени, на котором проявляется торможение первого каскада на втором, не влияет на термодинамические параметры в газовой полости при максимальном сжатии и может быть исключен в целях оптимизации представляемых данных. Для повторного анализа результатов экспери-

мента независимому исследователю потребуется провести серию газодинамических расчетов с указанным граничным условием и собственным УРС газа, с целью подбора его параметров, позволяющих описать экспериментальные результаты. Однако если использовать другое УРС газа во внешней полости, например, SESAME, мы будем наблюдать отклонения как по радиусу разворота ВГО-2, так и по времени максимального сжатия. Сравнение этих расчетов приведено на рис. 4 и табл. 2. Отклонения термодинамических параметров при использовании SESAME в качестве УРС газа во внешнем каскаде вместо УРС Копышева-Хрусталева составляют 0,1-2,0 %. Отклонение по времени составляет 0,07 мкс. Эти отклонения не превосходят экспериментальной погрешности, однако демонстрируют важность широкодиапазонности тестируемого УРС.

Таблица 2.

Сравнение расчетных средневзвешенных термодинамических параметров в газовой полости на момент максимального сжатия по сквозному расчету и ГДД, использующему SESAME в качестве УРС газа во внешнем каскаде

Table 2.

Comparison of calculated weighted average thermodynamic parameters in the gas cavity at the time of maximum compression by end-to-end calculation and HDT using EOS SESAME for the external cascade gas

		Р, ГПа	Т, К	ρ , г/см ³
Сквозной расчет	средневзвешенное	18550,64	56803,34	13,81451
	средневзвешенное отклонение	625,1535	34683,22	1,294620
Гидродинамический двойник с SESAME	средневзвешенное	18433,26	55690,68	13,80180
	средневзвешенное отклонение	588,4958	35136,60	1,280616
Относительное отклонение расчетов	средневзвешенное	0,63 %	2,0 %	0,092 %
	средневзвешенное отклонение	5,9 %	1,3 %	1,1 %

ГДД для опыта с дейтерием в диапазоне давлений до 18000 ГПа

Приведем пример построения гидродинамического двойника на основе эксперимента по квазиизэнтропическому сжатию дейтерия давлением ≈ 18000 ГПа с двухкаскадным нагружающим устройством (устройство № 1 из [5]). Начальные условия в газовой полости на момент подрыва устройства приведены в табл. 3. Геометрия камеры высокого давления приведена на рис. 5.

Таблица 3.

Начальные параметры газа в эксперименте

Table 3.

Initial parameters of gas in the experiment

Газ	P_0 , ГПа	t , °С	ρ_0 , г/см ³	R_0 , мм
Дейтерий	0,01831392	9,2	0,035985	29,5

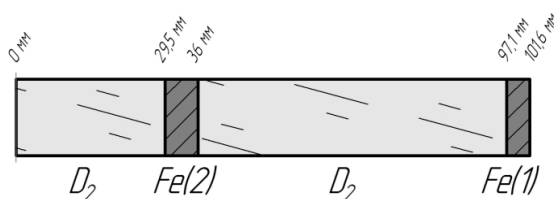


Рис. 5. Начальная геометрия камеры высокого давления

Fig. 5. Initial geometry of the high-pressure chamber

В табл. 4 приведены данные, полученные методом импульсной рентгенографии.

Таблица 4.

Данные рентгенографирования, полученные в опыте

Table 4.

Radiography data obtained in the experiment

Время, мкс	Радиус ВГО-2, см	Радиус НГО-2, см	Время, мкс	Радиус ВГО-2, см	Радиус НГО-2, см
28,37	2,248	–	29,78	0,459	2,203
28,75	1,841	–	29,97	0,460	2,160
29,34	1,199	2,442	30,16	0,706	1,989
29,61	0,717	–			

Совокупность экспериментальных данных, полученных в опыте устройством №1 и его полусферическим макетом, представлена на рис. 6 вместе с расчетными R(t)- и W(t)-диаграммами.

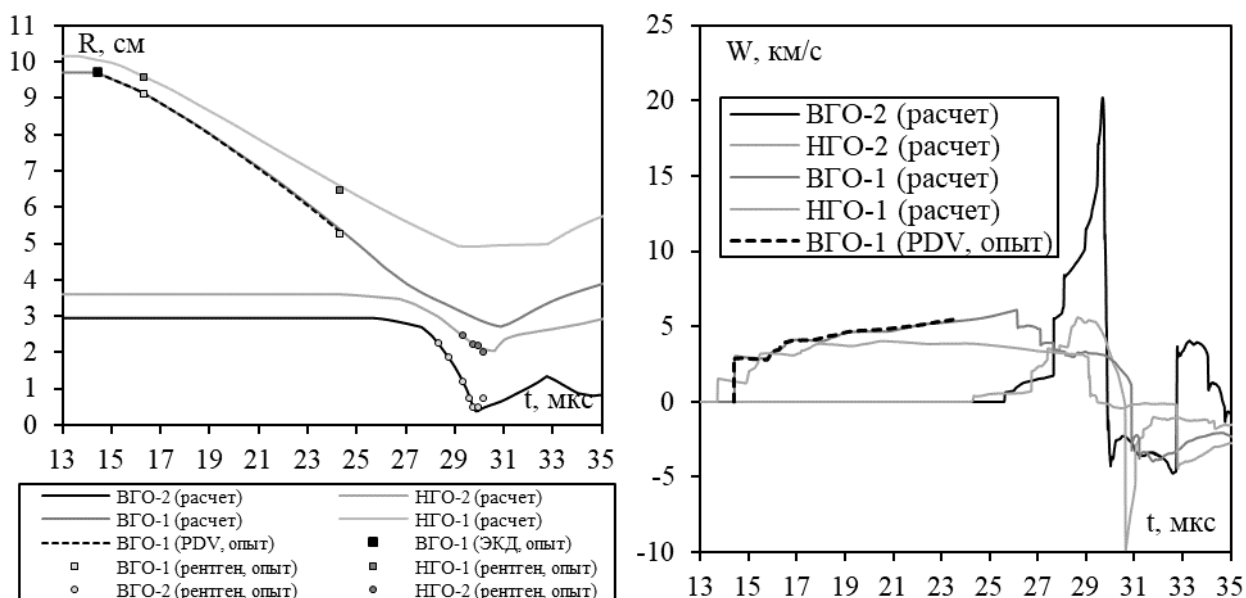


Рис. 6. Совокупность расчетных R(t)-диаграмм (слева) и W(t)-диаграмм (справа) с экспериментальными данными, полученными в опытах с устройством № 1 и его полусферическим макетом

ЭКД – электроконтактные датчики, PDV – гетеродин-интерферометр [13]

Fig. 6. Set of calculated R(t) diagrams (left) and W(t) diagrams (right) with experimental data obtained in experiments with device No. 1 and its hemispherical model

ЭКД – electric contact sensors, PDV – heterodyne interferometer [13]

Совокупность данных, необходимых для расчета гидродинамического двойника устройства №1, включает: начальную геометрию устройства (рис. 5), начальные термодинамические параметры дейтерия в газовой полости (табл. 3), результаты рентгенографирования, приведенные к расчетному времени (табл. 4) и непосредственно данные по скорости НГО-1 для формирования граничного условия (рис. 6). Для подбора параметров УРС дейтерия независимому исследователю потребуется провести расчет с указанной начальной геометрией, параметрами, граничным условием, а затем сравнить с результатами рентгенографирования.

Заключение

Разработано новое представление нагружающих устройств для проведения газодинамических расчетов – гидродинамические двойники, обоснована точность представления их параметров. Показана возможность использования гидродинамических двойников нагружающих устройств для перекрестных расчетов в диапазоне термодинамических величин, характерных для начального этапа термоядерных реакций.

В дальнейшем предполагается разработка гидродинамических двойников для всей совокупности экспериментов по квазиизэнтропическому сжатию с целью создания российской базы данных и валидации уравнений состояния дейтерия, гелия, инертных и благородных газов и программных комплексов, применяющихся для моделирования импульсных термоядерных реакторов в Госкорпорации «Росатом» и институтах Российской Академии Наук.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках программы по созданию молодежных лабораторий (научная тема № FSWE-2021-0010 «Газодинамика и физика взрыва»).

Библиографический список

1. **Фортов, В.Е.** Экстремальные состояния вещества / В.Е. Фортов. – М.: Физматлит, 2009. – 304 с.
2. **Григорьев, Ф.В.** Экспериментальное определение сжимаемости водорода при плотностях 0.5-2 г/см³ / Ф.В. Григорьев, С.Б. Кормер, О.Л. Михайлова, А.П. Толочко, В.Д. Урлин // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1972. Т. 16. Вып. 5. С. 286-290.
3. **Fortov, V.E.** Phase Transition in a Strongly Nonideal Deuterium Plasma Generated by Quasi-Isentropic Compression at Megabar Pressures / V.E. Fortov, R.I. Il'kaev, V.A. Arinin, V.V. Burtzev, V.A. Golubev, I.L. Iosilevskiy, V.V. Khrustalev, A.L. Mikhailov, M.A. Mochalov, V.Ya. Ternovoi, and M.V. Zhernokletov // Physical Review Letters, 2007, vol. 99, 185001.
4. **Мочалов, М.А.** Квазиизэнтропическая сжимаемость сильнонеидеальной плазмы дейтерия при давлениях до 5500 ГПа: эффекты неидеальности и вырождения / М.А. Мочалов, Р.И. Илькаев, В.Е. Фортов, А.Л. Михайлов, А.О. Бликов, В.А. Огородников, В.К. Грязнов, И.Л. Иосилевский // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2017. Т. 151. № 3. С. 592-620.
5. **Мочалов, М.А.** Сжимаемость неидеальной плазмы дейтерия и гелия до 20 ТПа / М.А. Мочалов, Р.И. Илькаев, В.Е. Фортов, С.В. Ерунов, В.А. Аринин, А.О. Бликов, В.А. Комраков, И.П. Максимкин, В.А. Огородников, А.В. Рыжков, В.К. Грязнов, И.Л. Иосилевский, П.Р. Левашов, Я.С. Лавриненко, И.В. Морозов, Д.В. Минаков, М.А. Парамонов, А.В. Шутов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2021. Т. 160. № 5 (11). С. 735-756.
6. **Гаврилов, Н.Ф.** Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе / Н.Ф. Гаврилов, Г.Г. Иванова, В.И. Селин, В.Н. Софронов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1982. Вып. 3. С. 11-14.
7. **Авдеев, П.А.** Комплекс программ ЛЭГАК для расчета нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы реализации комплекса на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью / П.А. Авдеев, М.В. Артамонов, С.М. Бахрах, С.В. Величко, Н.А. Володина, Н.М. Воробьева, С.П. Егоршин, Е.Н. Есаева, А.Д. Ковалева, М.В. Лучинин, С.Н. Проневич, В.Ф. Спиридонов, И.Ю. Тарадай, А.Н. Тарасова, Е.В. Шувалова // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2001. Вып. 3. С. 14-18.
8. **Бахрах, С.М.** Методика ЛЭГАК-3D расчета трехмерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды и принципы ее реализации на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью / С.М. Бахрах, С.В. Величко, В.Ф. Спиридонов, П.А. Авдеев, М.В. Артамонов, Е.А. Бакулина, И.Ю. Безрукова, В.В. Борляев, Н.А. Володина, А.О. Наумов, Н.Э. Огнева, Т.В. Резвова, А.А. Резяпов, С.В. Стародубов, И.Ю. Тарадай, А.П. Тихонова, К.В. Циберев, А.А. Шанин, М.О. Ширшова, Е.В. Шувалова // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 4. С. 41-50.

9. **Бликов, А.О.** Доопытное численное моделирование квазиизэнтропической сжимаемости дейтерия и гелия в области высоких давлений по методике «ЛЭГАК» / А.О. Бликов, М.А. Мочалов, Е.В. Шувалова, Е.А. Бакулина, Е.А. Пронин // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2022. Вып. 2, С. 40-52.
10. **Копышев, В.П.** Уравнение состояния водорода до 10 Мбар / В.П. Копышев, В.В. Хрусталеv // Прикладная механика и техническая физика. 1980. Т. 21. № 1. С. 122-128.
11. **Kerley, G.I.** Equation of State and Phase Diagram of Dense Hydrogen // Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1972, vol. 6, pp. 78-82.
12. **Kerley, G.I.** Theoretical Equation of State for Deuterium. Scientific Report. LA-4776 / G.I. Kerley. – LANL. 1972. – 28 p.
13. **Strand, O.T.** Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques / O.T. Strand, D.R. Goosman, C. Martinez, T.L. Whitworth, and W.W. Kuhlow // Review of Scientific Instruments, 2006, vol. 77, 083108.

*Дата поступления
в редакцию: 01.09.2022*

*Дата принятия
к публикации: 21.11.2022*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ И ПЕРЕНОСА ВОДОРОДА В ПЕРВОМ КОНТУРЕ ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРОВ С ГАЗОВОЙ СИСТЕМОЙ КОМПЕНСАЦИИ ДАВЛЕНИЯ И ЕГО ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

В.И. Полуничев

ORCID: 0000-0003-1859-9616 e-mail: dep59@okbm.nnov.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

Д.И. Новиков

ORCID: 0000-0001-6419-4295 e-mail: grey1ngreen27@gmail.com

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

М.А. Дюжий

ORCID: 0000-0002-1094-7623 e-mail: dyuzhii.maxim@bk.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Нижний Новгород, Россия

Представлен вариант логической взаимосвязи процессов образования, переноса и накопления водорода в теплоносителе и оборудовании первого контура судовых реакторных установок с газовой системой компенсации давления и его химического взаимодействия с контактирующими конструкционными материалами. Даны интегральные выражения для определения равновесной концентрации растворенного в теплоносителе первого контура газа, условий его выделения, а также опытные данные по эксплуатации реакторных установок атомных судов с аммиачным водно-химическим режимом. Рассмотрены вероятные причины, механизмы и результаты наводораживания конструкционных материалов реакторных установок, в частности, оболочек тепловыделяющих сборок из циркониевого сплава и трубных систем парогенераторов из титанового сплава. Полученные выводы целесообразно учитывать при создании и обосновании надежности перспективных реакторных установок для судов и атомных станций малой мощности с длительным ресурсом.

Ключевые слова: газоперенос, наводораживание, нодульная коррозия, газовая система компенсации давления, водно-химический режим, судовые реакторные установки, газовыделение, «газовое» кипение.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Полуничев, В.И. Исследование процессов образования и переноса водорода в первом контуре водо-водяных реакторов с газовой системой компенсации давления и его химического взаимодействия с конструкционными материалами / В.И. Полуничев, Д.И. Новиков, М.А. Дюжий // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 66-76. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_66

THE RESEARCH OF HYDROGEN GENERATION AND TRANSITION IN THE PRIMARY CIRCUIT OF PRESSURIZED WATER REACTORS WITH GAS PRESSURIZER SYSTEM AND ITS CHEMICAL INTERACTION WITH STRUCTURAL MATERIALS

V.I. Polunichev

ORCID: 0000-0003-1859-9616 e-mail: dep59@okbm.nnov.ru

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

Nizhny Novgorod, Russia

D.I. Novikov

ORCID: 0000-0001-6419-4295 e-mail: grey1ngreen27@gmail.com

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

Nizhny Novgorod, Russia

M.A. Dyuzhiy

ORCID: 0000-0002-1094-7623 e-mail: dyuzhii.maxim@bk.ru

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

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The authors describe a variant of logical relationship between hydrogen generation, transition and accumulation in the primary circuit of marine reactor plants with gas pressurizer systems and its chemical interaction with structural materials coming into contact. Integral expressions to determine the steady-state concentration of the gas dissolved in the coolant of the primary circuit and the conditions for its evolution is given, as well as experimental data on nuclear vessel reactor facilities operation along with nitrogen water-chemistry conditions. Probable reasons, mechanisms and results of hydrogenation of structural materials in reactor facilities, particularly of fuel rod cladding made of zirconium alloy and steam generator tubing made of titanium alloy, are considered. It is recommended to take the conclusions reached into account while building up and substantiating the reliability of advanced low-power long-living reactor facilities for vessels and nuclear plants.

Key words: gas transfer, flooding, hydrogenation, nodule corrosion, gas pressure compensation system, water-chemical regime, ship reactor installation, gas release, gas boiling.

FOR CITATION: V.I. Polunichev, D.I. Novikov, M.A. Dyuzhiy. The research of hydrogen generation and transition in the primary circuit of pressurized water reactors with gas pressurizer system and its chemical interaction with structural materials. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. Pp. 66-76.

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_66

Введение

В процессе эксплуатации реакторов на атомных судах выявились определенные процессы, препятствующие существенному увеличению ресурса активных зон при использовании циркониевого сплава Э-110 в качестве оболочечного материала твэлов, и трубных систем парогенераторов, выполненных из титанового сплава. Основной причиной ограничения ресурса явились нодульная (очаговая) коррозия, наводороживание (гидрирование) циркония и наводороживание титанового сплава трубной системы [1]. В научно-технической литературе опубликовано достаточно много информации по проблеме нодульной коррозии циркониевых оболочек элементов активных зон, хотя вопрос до настоящего времени остается открытым. Существенно меньше исследовано гидрирование циркония и титана и, кроме того, результаты данных исследований достаточно противоречивы.

Особенностями отечественных судовых реакторных установок по сравнению с установками атомных станций типа ВВЭР являются: газовая (азотная) система компенсации давления, аммиачный водно-химический режим (АВХР), высокая энергонапряженность активных зон, наличие кипения, в том числе, «газового», на оболочках твэлов в определенных ре-

жимах, повышенный температурный перепад теплоносителя в активной зоне, использование титанового сплава в качестве материала трубной системы парогенераторов.

Газовая система компенсации давления и газоперенос

В мировой атомной энергетике используются реакторные установки (РУ) с двумя типами систем компенсации давления теплоносителя первого контура – паровой и газовой. Исторически первая отечественная судовая реакторная установка ОК-150 атомного ледокола «Ленин» была создана с паровой системой компенсации давления, которая достаточно успешно работала до снятия РУ с эксплуатации. Другая установка – ОК-900, заменившая первую на этом же ледоколе, включала уже газовую (азотную) систему компенсации. Мотивацией замены послужили, вероятно, простота конструкции газовой системы и режима управления, а также пассивный принцип работы без потребления внешней энергии, что было важно для корабельной энергетике. Сыграло роль и отсутствие достаточных знаний о ее влиянии на тепло-гидравлические характеристики и водно-газовый и химический режим первого контура ВВР. Тем не менее, эта система тиражируется на всех современных отечественных судовых реакторных установках и АСММ, и, соответственно, требует объективной оценки результатов ее эксплуатации, влияния на надежность работы оборудования первого контура и всестороннего обоснования при использовании в перспективных проектах. В отечественных и зарубежных энергетических установках типа ВВЭР применяется только паровая система компенсации.

Традиционно газовая система компенсации давления включает компенсаторы давления (КД) и газовые баллоны (рис. 1). В некоторых вариантах весь газ сосредоточен в компенсаторах давления.

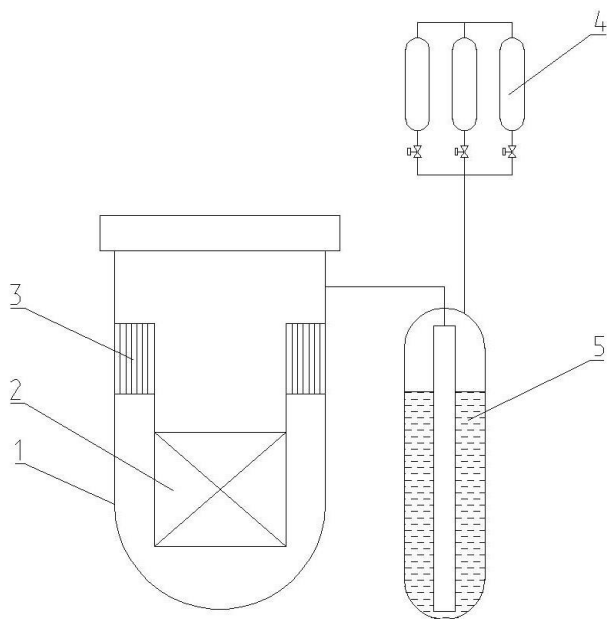


Рис. 1. Газовая система компенсации давления:
 1 – реактор; 2 – активная зона; 3 – парогенератор;
 4 – баллоны газа высокого давления; 5 – компенсатор давления

Fig. 1. Gas pressurizer system:
 1 – reactor; 2 – active zone; 3 – steam generator;
 4 – high-pressure gas chamber; 5 – pressurizer

В качестве рабочего газа в системе используется азот. В процессе работы установки в азот поступает водород, генерируемый в реакторе. Газ растворяется в воде компенсатора и за счет массообмена переносится в теплоноситель основного контура циркуляции, достигая достаточно высокой равновесной концентрации (1200-1800 нсм³/кг).

Выражение, определяющее предельную концентрацию газа в воде КД [2]:

$$C_{\text{КД}}^{\text{H}} = K(T_{\text{КД}}) \cdot (P_{1\text{К}} - P_{\text{S}}(T_{\text{КД}})) \quad (1)$$

где $K(T_{\text{КД}})$ – коэффициент растворимости Генри при температуре в КД; $P_{1\text{К}}$ – давление в КД (принимается равным давлению в первом контуре); $P_{\text{S}}(T_{\text{КД}})$ – давление насыщения при температуре воды в КД.

Изменение концентрации азота в воде КД с течением времени описывается формулой:

$$V_{\text{КД}} \cdot \frac{dC_{\text{КД}}}{d\tau} = \alpha \cdot S \cdot (C_{\text{КД}}^{\text{H}} - C_{\text{КД}}) \quad (2)$$

где $V_{\text{КД}}$ – объем воды в КД; $C_{\text{КД}}$ – концентрация газа в воде КД; S – площадь поверхности раздела фаз; α – коэффициент массообмена между водной и газовой фазой; $C_{\text{КД}}^{\text{H}}$ – предельная концентрация растворенного в воде газа, определяемая из выражения (1).

При условиях $\tau = 0$ $C_{1\text{К}} = 0$ уравнение (2) имеет решение в следующем виде:

$$C_{\text{КД}} = C_{\text{КД}}^{\text{H}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha S}{V_{\text{КД}}} \tau}\right) \quad (3)$$

Скорость переноса газа из компенсатора в первый контур и обратно описывается формулой (3):

$$G_{1\text{К}} \cdot \frac{dC_{1\text{К}}}{d\tau} = \beta \cdot (C_{\text{КД}}^{\text{H}} - C_{1\text{К}}) \quad (4)$$

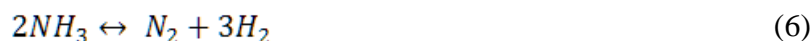
где $G_{1\text{К}}$ – масса воды в первом контуре; $C_{1\text{К}}$ – концентрация газа в воде первого контура; β – коэффициент массообмена между первым контуром и КД; $C_{\text{КД}}^{\text{H}}$ – предельная концентрация растворенного в воде газа, определяемая из выражения (1).

При условиях $\tau = 0$ $C_{1\text{К}} = 0$ уравнение (4) имеет решение в следующем виде:

$$C_{1\text{К}} = C_{\text{КД}}^{\text{H}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\beta}{G_{1\text{К}}} \tau}\right) \quad (5)$$

Аммиачный водно-химический режим

Для рассмотрения процессов образования, переноса и взаимодействия газов между собой и с конструкционными материалами в первом контуре судовых реакторов с газовой системой компенсации необходимо привести краткую характеристику используемого аммиачного водно-химического режима. Выбор этого режима основан на многолетнем опыте его применения на установках данного типа. Аммиачный водно-химический режим считается саморегулируемым, устойчивым и простым в поддержании [3]. Саморегулируемость режима обеспечивается за счет динамического равновесия между растворенными в теплоносителе первого контура аммиаком, азотом и водородом, устанавливающегося во время работы реакторной установки на мощности, по формуле:



Основным источником азота в теплоносителе является система компенсации давления. Источниками водорода являются радиолитическое разложение аммиака, коррозионные процессы циркониевых оболочек твэлов и других элементов активных зон при контакте с теплоносителем и радиолиз воды.

Стехиометрия коррозионного процесса циркония имеет вид:



Процесс образования водорода при радиолитическом разложении воды происходит по реакции:



Аммиак вводится в теплоноситель специально. Поступивший молекулярный водород принимает участие в двух процессах: подавлении радиолитического разложения, приводящего к снижению в теплоносителе содержания окислителей (O_2 и H_2O_2), и радиационно-химической фиксации растворенного азота с образованием аммиака по реакции (5). За меру скорости коррозионного процесса обычно принимается скорость повышения концентрации аммиака [4]. По результатам измерений концентраций аммиака и водорода в теплоносителе первого контура в судовых РУ эмпирически установлено, что для нормированного диапазона концентраций аммиака (10-100 мг/кг) на 1 мг/кг аммиака приходится около 2 нсм³/кг водорода. Этим соотношением удобно пользоваться при оценке содержания водорода в теплоносителе по результатам измеренной концентрации аммиака, поскольку общее содержание газа, и водорода в частности, в теплоносителе судовых РУ не контролируется.

Таблица 1.

Состав теплоносителя первого контура РУ атомных судов

Table 1.

Coolant chemistry in the primary circuit of nuclear vessel reactor facilities

Объект	Условия отбора	Содержание компонентов ВХР				
		NH ₃ , мг/кг	Общее содержание газов, нсм ³ /кг	H ₂ , нсм ³ /кг	N ₂ ^{**} , нсм ³ /кг	N ₂ ^{R***} , нсм ³ /кг
«Севморпуть»	Q=1,903 ТВт·ч N=22% Nном P=12,16 МПа	246	1180	195	985	1100
«Севморпуть»*	N – остановлена P=8,34 МПа	204	890	135	755	735
«Арктика» (РУ-2)	Q=1,173 ТВт·ч N=21% Nном P=12,94 МПа	23	290	61	229	1160
«Арктика» (РУ-2) ^{***}	Q=1,308 ТВт·ч N – остановлена P=7,94 МПа	62	780	87	693	725
«Советский Союз»*	Q=1,66 ТВт·ч N – остановлена P= 8,62 МПа t _к = 43 °С	175	1200 – 1300	150	1100	755

* Пробоотбор проводился на расхоженных РУ при давлении в контуре 8-9 МПа и температуре теплоносителя 43-72 °С.
 ** Концентрация азота вычислена как разность между общим газосодержанием и концентрацией H₂.
 *** Рассчитано как: $K_{N_2}(P_{\Sigma} - P_s - P_{H_2})$, где K_{N_2} – константа Генри для азота, P_{Σ} , P_s , P_{H_2} – давление в контуре, парциальное давление паров воды и водорода соответственно.

Для иллюстрации соотношений реально измеренных концентраций элементов АВХР в табл. 1 приведены некоторые систематизированные данные по содержанию азота, водорода и аммиака, полученные на атомных судах «Севморпуть», «Арктика» и «Советский Союз» при аномально высоком содержании аммиака в теплоносителе первого контура [5].

Из табл. 1 следует, что концентрация аммиака в теплоносителе первого контура может значительно превышать нормативные значения. Это происходит в случае поступления в первый контур повышенного количества водорода, образующегося при интенсивной общей и нодульной коррозии оболочек твэлов, чехловых труб и других элементов активных зон из циркониевого сплава Э-110. При этом равновесие в реакции (6) смещается в сторону синтеза аммиака. Повышение концентрации аммиака в теплоносителе первого контура имеет место, как правило, к концу кампании активных зон с циркониевыми оболочками и предопределяет их выход из строя по причине разгерметизации твэлов. Эта тенденция проиллюстрирована на рис. 2, где приведены графики изменения концентраций аммиака в теплоносителе первого контура в реакторных установках с одним из вариантов циркониевых активных зон в зависимости от энерговыработки [1].

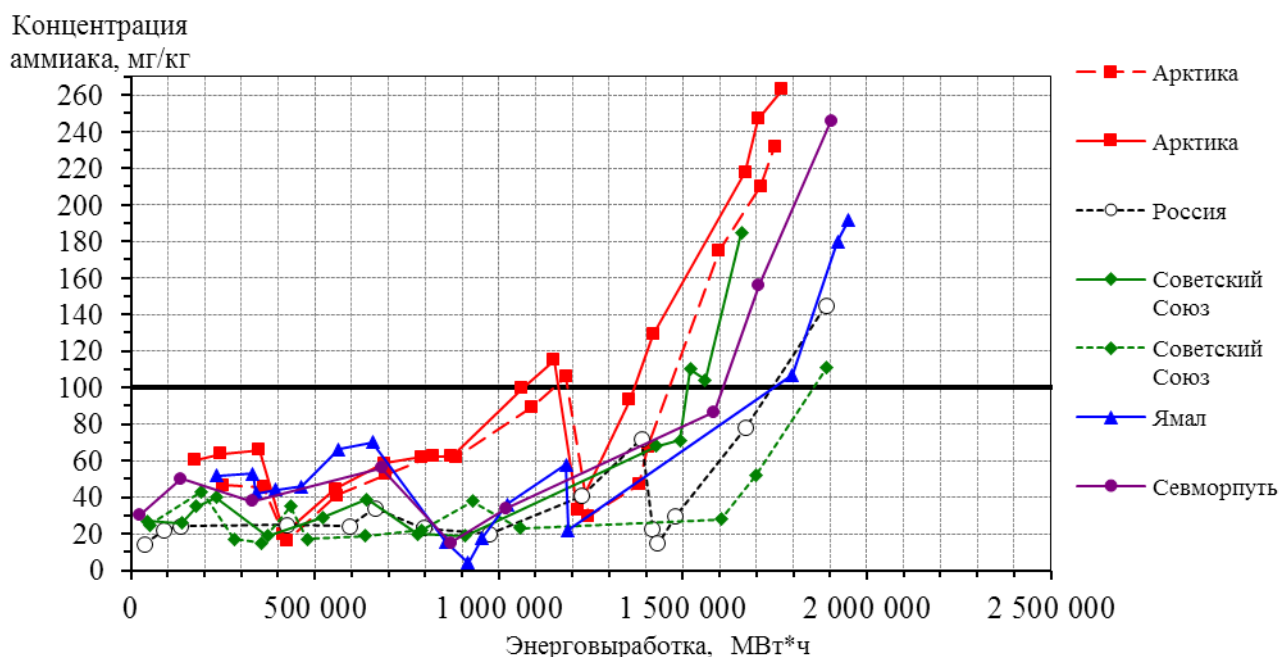


Рис. 2. Изменение концентрации аммиака в теплоносителе 1 контура при эксплуатации циркониевых активных зон

Fig. 2. Change in ammonia concentration in coolant in the 1 circuit during the operation of active zones containing zirconium

Из табл. 1 и рис. 2 следует, что в аномальных ситуациях концентрация аммиака может достигать 250 и более мг/кг, а концентрация водорода соответственно – 500 нсм³/кг и выше. При работе установки водород растворяется в теплоносителе, перемешиваясь с раствором азота, образовавшаяся смесь циркулирует в оборудовании первого контура, поступает в компенсаторы давления и за счет массообмена концентрация газов поддерживается в объеме всего первого контура практически равновесной, но не постоянной, так как концентрация водорода, по опыту, всегда растет.

Концентрация насыщения каждого газа при давлении и температуре компенсатора определяется по формуле [2]:

$$C_k = 10^{-2} \cdot K(t) \cdot P \cdot X \quad (9)$$

где P – общее давление газов в компенсаторе, $K(t)$ – коэффициент Генри данного газа при температуре в компенсаторе, X – объемное содержание данного газа в смеси газов компенсатора, %.

Объемное содержание водорода определяется по измеренной концентрации аммиака, а азота – как разность между общим газосодержанием и содержанием водорода. При равновесной концентрации растворенного азота и водорода в первом контуре и компенсаторе объемное содержание водорода в газе КД может составлять до 20 % от общего объема газов (табл. 1).

Из приведенного анализа следует, что при АВХР в теплоносителе первого контура всегда присутствует аммиак, и, следовательно, водород, который может взаимодействовать с конструкционными материалами оборудования первого контура. По поводу саморегулируемости аммиачного водно-химического режима высказываются некоторые сомнения. Согласно [6], при поступлении в теплоноситель водорода физико-химическая система перестает быть замкнутой и в системе растет содержание аммиака. Вследствие этого у АВХР исчезает свойство «саморегулируемости» – одно из условий обеспечения пассивной безопасности установки. Это подтверждается и практикой поддержания режима. Например, для предотвращения превышения нормативных значений концентрации аммиака предусмотрено поэтапное снижение давления в первом контуре до атмосферного и газоудаление из оборудования, дозагрузка ионообменного фильтра специальным сорбентом и др.

Выделение и перенос газов в первом контуре

Азот и водород при определенных условиях могут выделяться из теплоносителя, и образовавшаяся парогазовая смесь может локализоваться в верхних полостях реактора, приводов СУЗ, парогенераторов, насосов и компенсаторов давления [7]. Рассмотрим процесс выделения газов из теплоносителя в активной зоне на примере азота (рис. 3).

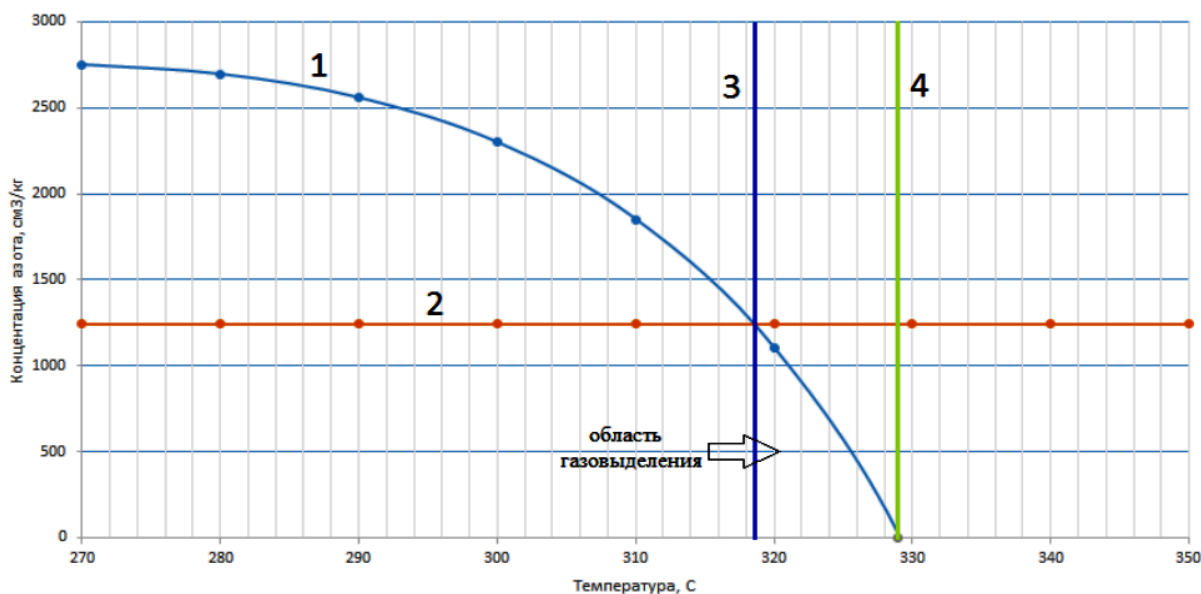


Рис. 3. График определения интервала температур возможного выделения азота из теплоносителя в активной зоне

Fig. 3. The chart of temperature ranges for probable nitrogen evolution from coolant in the active zone

График построен для давления теплоносителя 12,7 МПа и температуры в компенсаторе 60 °С. При анализе возможного выделения азота из теплоносителя в активной зоне необходимо учитывать температуру не только в основном потоке, но и в пристенном слое оболочек ТВЭЛов и других элементов активной зоны, где температура теплоносителя выше, а также изменение давления, особенно в переходных режимах.

Аналитически температура начала выделения азота из газонасыщенного теплоносителя пристенного слоя твэлов определяется из равенства концентраций азота, растворенного в КД и пристенном слое [8].

$$C_{\text{КД}} = K(T_{\text{КД}}) \cdot (P_{1\text{К}} - P_5(T_{\text{КД}})) \quad (10)$$

$$C_{1\text{К}} = K(T_{\text{п.с.}}) \cdot (P_{1\text{К}} - P_5(T_{\text{п.с.}})) \quad (11)$$

где $C_{\text{КД}}$ – равновесная концентрация растворенного газа в воде КД; $K(T_{\text{КД}})$ – коэффициент Генри при температуре в КД; $P_{1\text{К}}$ – давление в первом контуре; $P_5(T_{\text{КД}})$ – давление насыщенных паров воды при температуре в КД; $K(T_{\text{п.с.}})$ – коэффициент Генри при температуре теплоносителя в пристенном слое; $P_5(T_{\text{п.с.}})$ – давление насыщенных паров воды при температуре теплоносителя в пристенном слое.

Из графика на рис. 3 следует, что выделение газа из пристенного слоя оболочки твэл («газовое» кипение) начинается при температуре значительно ниже температуры насыщения при давлении в первом контуре. Реально в судовых установках выделение газа из пристенного слоя тепловыделяющего элемента при номинальной мощности начинается практически от входа в активную зону. При определении начала выделения конкретного газа из раствора нескольких газов необходимо пользоваться выражением (9).

Традиционно принято считать, что высокая концентрация водорода при аммиачном ВХР обеспечивает глубокое подавление радиолитического распада кислорода в теплоносителе при работе реактора на мощности не более 10 мкг/кг. Однако в работе [5] обосновывается возможность более высокого содержания кислорода в теплоносителе за счет повторного поступления парогазовых пузырьков, выделившихся на оболочках твэлов и содержащих повышенную концентрацию радиолитического кислорода и водорода, на вход в активную зону. С этим трудно не согласиться, но только этим трудно объяснить преимущественно коррозионное повреждение циркониевых оболочек в нижней части твэлов, механизм переноса газа из пузырька, находящегося в основном потоке теплоносителя, к поверхности оболочки твэла, проникновения его через защитную окисную пленку и их химического взаимодействия. Процесс генерации водорода и кислорода на оболочках и механизм проникновения их через защитную окисную пленку циркония к основному металлу видится определяющими в процессах гидрирования и коррозии циркониевых оболочек элементов активных зон. Соответственно, представляет интерес дополнительная версия прохождения этих процессов [1].

На начальной стадии «газового» кипения пузырьки газа, выделившегося из воды пристенного слоя в нижней части твэлов, содержат пар, азот и водород и локализуются на греющей поверхности. При этом степень недогрева воды в общем потоке до температуры насыщения, парциальное давление газа (азота и водорода) в пузырьках и время нахождения их на поверхности твэла максимальное. Естественно предположить, что условия теплоотдачи от оболочки к теплоносителю в точках контакта пузырьков наихудшие, что провоцирует локальное повышение температуры под пузырьком и максимальный термоцикл при отрыве и поступлении на его место теплоносителя существенно недогретого до температуры насыщения из общего потока. Высокочастотная точечная термопульсация вызывает разрушение поверхностного защитного окисного слоя циркониевого сплава оболочки твэла с образованием трещин [8,10]. Правомочность такого предположения согласуется с данными экспериментальных исследований термической усталости образца из нержавеющей стали, разогретого до температуры 310 °С, на который подавались капли воды с температурой 20 °С частотой 1 Гц [11]. Начало образования трещин зафиксировано в диапазоне $(1-3) \cdot 10^6$ циклов падения капель. Амплитуда термоцикла в стали составляла около 150 °С. При длительности испытаний в 3-4 раза большей начальной глубина трещин достигала 100-2000 мкм. В работе [12]

также утверждается, что развитие трещины и процесс гидридного растрескивания ускоряются при термоциклировании и повышении напряжений.

Водород характеризуется высокой диффузионной подвижностью в решетке циркония, которая с увеличением температуры растет. При образовании трещины в оксидной пленке водород начинает быстро проникать в металл, его концентрация в приповерхностном слое увеличивается и, если парциальное давление велико, может превысить предельную растворимость в цирконии при данной температуре с образованием гидридов. Кроме того, радиолитический парогазовый режим в трещине оксидного слоя приводит к возникновению особого водно-химического режима внутри ее объема, способствует повышенной концентрации радиолитического водорода и кислорода. Процесс зарождения и роста трещин, приводящих к хрупкому разрушению изделия, происходящему в основном по механизму замедленного гидридного растрескивания, считается наиболее опасным. На рис. 4 представлен поперечный шлиф циркониевого сплава Э110 после наводороживания при температуре 350 °С и давлении в камере 2 атм, полученный при исследовании влияния концентрации водорода на толщину гидридного растрескивания [13].



Рис. 4. Поперечный шлиф циркониевого сплава Э110 после наводороживания

Fig. 4. Э110 zirconium alloy cross-section after hydrogenation

В работе [2] также отмечается, что радиолитический водород более интенсивно происходит в кипящих реакторах и является мощным источником образования радиолитического водорода и кислорода. Известно, что скорость коррозии пропорциональна паросодержанию [14]. Например, скорость коррозии циркониевых оболочечных сплавов в условиях реакторов кипящего типа (РБМК) в 5-10 раз выше, чем в реакторах под давлением (ВВЭР), в которых отсутствует кипение. Очевидно, что содержание парогазовой смеси в теплоносителе судовых ВВР существенно меньше, чем пара в кипящих реакторах, но с учетом дополнительного выделения газа («газового» кипения недогретой до температуры насыщения воды) может быть значимым для интенсификации радиолитического парогазового режима в пузырьках и повышения термоциклической нагрузки.

Из результатов исследований коррозионного состояния оболочек твэлов, отработавших в судовых активных зонах, реакторных петлях и электрообогреваемых экспериментальных стендах из различных материалов и при разных параметрах, следует [1]:

- максимальное коррозионное повреждение и гидрирование имеют место в области начала пристенного «газового» кипения максимально недогретой до температуры насыщения воды;

- характер распределения указанных повреждений для разных материалов и теплотехнических условий хорошо коррелирует с дислокацией пристенного «газового» кипения недогретой воды, что подтверждает их взаимосвязь;
- распределение окислов и гидридов качественно совпадает со степенью недогрева общего потока воды до температуры насыщения при пристенном кипении и концентрацией газов в парогазовых пузырьках на оболочках твэлов.

Аналогичного влияния других факторов на интенсивность коррозии и гидрирования и характер их распределения не выявлено. Как было отмечено ранее, все присутствующие газы в судовых реакторных установках находятся в теплоносителе в двух состояниях – растворенными в воде и в виде парогазовой смеси, в зависимости от температуры и давления в оборудовании первого контура, режимов эксплуатации, оказывая существенное влияние на его работоспособность. Другой проблемой, связанной с наличием водорода в теплоносителе, является аномально высокое локальное наводороживание титановых труб парогенераторов судовых РУ, приводящее к охрупчиванию металла и образованию межконтурных течей [6]. Измеренное содержание водорода в образцах металла на порядок превышает максимальное прогнозируемое проектное наводороживание материалов трубной системы.

В качестве наиболее вероятной причины может быть обозначена локализация выделившегося из теплоносителя в активной зоне газа (в том числе, водорода) в верхней застойной зоне питательных труб парогенератора. Концентрация водорода в газовой фазе при температуре, характерной для области наводороживания, в десятки раз выше по сравнению с концентрацией в жидкости.

Заключение

В настоящее время вопросы, связанные с коррозией и наводороживанием циркониевых материалов элементов активных зон и титановых трубных систем парогенераторов в судовых реакторных установках, остаются открытыми, и для их решения необходим дальнейший обстоятельный анализ. Представленные результаты, не будучи исчерпывающими, вполне содержательны, чтобы быть принятыми во внимание при проектировании перспективных реакторных установок для судов и атомных станций малой мощности следующего поколения.

Библиографический список

1. **Полуничев, В.И.** Возможные пути повышения ресурса активных зон с циркониевыми элементами ТВС для перспективных судов и АСММ / В.И. Полуничев, А.Ф. Филимонов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 4. С. 104-112.
2. **Герасимов, В.В.** Водный режим атомных станций / В.В. Герасимов, А.И. Касперович, О.И. Мартынова. – М.: Атомиздат, 1976. – 398 с.
3. **Касперович, А.И.** Водно-химические процессы в реакторных установках атомных ледоколов и плавучих энергоблоков / А.И. Касперович, Б.И. Колесов, Н.Г. Сандлер // Атомная энергия. 1996. Т. 81. Вып. 4. С. 261-265.
4. **Шовиков, Г.П.** Исследование методов управления (снижения) концентрации аммиака в процессе эксплуатации ледокольных активных зон. Тех. отчет. Инв. №31-36-37-07 / Г.П. Шовиков, Б.И. Колесов, А.В. Лузаков. – М.: РНЦ «Курчатовский институт». 2007. – 56 с.
5. **Карнаухов, В.Е.** Разработка математических моделей для учета влияния неконденсирующихся газов на работоспособность оборудования ЯЭУ. Дисс. ... к-та тех. наук. М.: ФГУ НИЦ «Курчатовский институт», 2019.
6. **Воробьев, Ю.Б.** Особенности массопереноса при эксплуатации парогенераторов атомных ледоколов / Ю.Б. Воробьев, Ю.В. Долгополов, А.Л. Малышева и др. // Вестник МЭИ. 2022. № 2. С. 11-20.

7. **Филимонов, А.Ф.** Газовыделение и газоперенос в оборудовании первого контура реакторной установки с газовой системой компенсации / А.Ф. Филимонов, В.И. Полуничев, А.Е. Помысухина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. № 3. С. 101-110.
8. **Зверев, Д.Л.** Реакторная установка нового поколения РИТМ-200 для перспективного атомного ледокола / Д.Л. Зверев, А.Н. Пахомов, В.И. Полуничев и др. // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 6. С. 323-328.
9. Подкипание теплоносителя первого контура судовых ЯЭУ как фактор интенсификации коррозии циркониевых оболочек твэлов. Доклад НИЦ «Курчатовский институт»./ Межотраслевая научно-техническая конференция «Исследовательскому комплексу ИВВ-2М – 45 лет», г. Заречный, 26-27 мая 2011 г. – Заречный: ОАО «ИРМ», 2011. – 71 с.
10. **Arkhipov, O.P.** Verification of computer code for calculation of coolant radiolysis in the VVER reactor code with regard for boiling in its upper part / O.P. Arkhipov, S.A. Kabakchi // The 2010 International Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems. October 3-7, 2010, Quebec, Canada.
11. **Бесчеров, Д.Е.** Верификация методики расчета усталостной прочности оборудования реакторных установок при нестационарных термоциклических нагрузках / Д.Е. Бесчеров, М.А. Большухин, А.В. Козин и др. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. №1 (124). С.81-91.
12. **Кудияров, В.Н.** Закономерности формирования гидридного обода в оболочечных трубах из циркониевого сплава Э110 при газофазном наводороживании / В.Н. Кудияров. – Томск: ТПУ, 2017. – 118 с.
13. **Крицкий, В.Г.** Методический подход к прогнозированию коррозии циркониевых сплавов в водном теплоносителе ядерных реакторов // Атомная энергия. 2011. Т. 110. Вып. 4. С. 219-227.
14. **Березина, И.Г.** Особенности коррозионного поведения сплава Zr-1%Nb в теплоносителе АЭС с РБМК-1000 // Теплоэнергетика. 1998. № 7. С. 62-67.

*Дата поступления
в редакцию: 31.08.2022*

*Дата принятия
к публикации: 01.11.2022*

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.33

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_77

МЕТОД ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОБУСА БОЛЬШОГО КЛАССА ОТ БОКОВОГО ОПРОКИДЫВАНИЯ

А.В. АнтонянORCID: 0000-0002-5566-6569 e-mail: AntonyanAV@kamaz.ruООО «Инновационный центр «КАМАЗ», Инновационный центр «Сколково»
Москва, Россия

Разработан метод защиты электробуса большого класса от бокового опрокидывания в повороте. Для снижения риска возникновения отрыва колес внутреннего борта предлагается снижение тягового момента электропривода по мере приближения угловой скорости вращения кузова к критическим значениям. При разработке системы приняты допущения и выведены необходимые зависимости для формирования закона управления тяговым электроприводом. Проведены виртуальные испытания двух электробусов, в одном из которых задействована система защиты от опрокидывания, а в другом – нет. В качестве критерия работоспособности и эффективности применено сравнение математических ожиданий углов крена и нормальных реакции заднего колеса внутреннего борта обоих электробусов.

Ключевые слова: электробус, центр масс, тяговая аккумуляторная батарея, тяговый электропривод, движение в повороте, боковое опрокидывание, поперечная устойчивость, сигмовидная кривая, математическое моделирование, угол крена, нормальная реакция.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Антонян, А.В. Метод защиты электробуса большого класса от бокового опрокидывания // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 77-84. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_77

THE METHOD FOR PROTECTION OF A LARGE CLASS ELECTRIC BUS FROM SIDE DUMPING

A.V. AntonyanORCID: 0000-0002-5566-6569 e-mail: AntonyanAV@kamaz.ruKAMAZ Innovation Center LLC, Skolkovo Innovation Center
Moscow, Russia

Abstract. The method for protection of a large class electric bus from side dumping at cornering is developed. To reduce the risk of wheel breakaway at inner bead, it is proposed to decrease the traction torque of an electric drive as the angular velocity of the body approaches critical values. During system development, some assumptions are taken and the necessary relationships are derived to define the control law for the electric traction drive.

Two electric buses are tested virtually, the first has the system of dumping protection embedded, and the second does not. The comparison of the expected values of heeling angle and the normal response of rear wheel at inner bead of both electric buses is applied as a performance and effectiveness criterion.

Key words: electric bus, center of mass, traction battery, electric traction drive, cornering maneuver, side dumping, transverse stability, sigmoid curve, mathematical simulation, heeling angle, normal response.

FOR CITATION: A.V. Antonyan. The method for protection of a large class electric bus from side dumping. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. Pp. 77-84. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_77

Введение

Электрические автономные транспортные средства завоевывают большую популярность. К ним относятся электромобили и электробусы. Особенно заметно появление электробусов на дорогах крупных городов. Быстрое увеличение автопарка автономными пассажирскими электрическими транспортными средствами объясняется тем, что электробусы являются экологически чистым видом транспорта с нулевым уровнем выбросов, требуют меньше затрат на эксплуатацию в сравнении с классическими автобусами, обладают большей пассажироместимостью за счет отсутствия моторной шахты в заднем свесе, а также низким уровнем шума и повышенным уровнем комфорта, в том числе – низким уровнем пола. В большей степени эти преимущества достигаются за счет применения тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ). Однако для обеспечения низкого уровня пола электробуса и наличия пространства в заднем свесе ТАБ и другие электрические компоненты обычно размещаются на крыше [1]. Это обстоятельство приводит к увеличению высоты центра масс [2] и, как следствие, к повышенному риску бокового опрокидывания. Обеспечить безопасность транспортного средства с точки зрения поперечной устойчивости можно с помощью тягового электропривода путем превентивного снижения тягового момента. Снижение тягового момента возможно по мере приближения фактических (измеренных) параметров движения к критическим.

Целью работы является повышение устойчивости от бокового опрокидывания за счет снижения тяги тягового электропривода и обоснование работоспособности и эффективности разработанной системы безопасности.

Разработка системы защиты от опрокидывания

Поперечное опрокидывание транспортного средства может возникнуть при движении в повороте, на косогоре, при резком повороте рулевого колеса, при заносе с последующим ударом колес [3]. В работе рассматривается опасность опрокидывания при движении в повороте. При разработке системы защиты от опрокидывания электробуса принимаются следующие допущения:

- движение осуществляется по недеформируемой ровной горизонтальной поверхности;
- опрокидывание электробуса возможно до наступления заноса;
- при опрокидывании происходит отрыв колес обеих осей внутреннего борта одновременно;
- жесткость и демпфирование системы поддрессоривания не учитывается;

В работах [3, 4] критическая скорость колесной машины по опрокидыванию вычисляется следующим образом:

$$v_{\text{кр.оп}} = \sqrt{\frac{B_{\text{к}} R_{\text{к}} g}{2h_{\text{ц}}}}; \quad (1)$$

где:

$B_{\text{к}}$ – колея колес, м;

$R_{\text{к}}$ – кинематический радиус поворота колесной машины, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$h_{\text{ц}}$ – высота центра масс, м.

Уравнение (1) применимо для оценки поперечной устойчивости колесной машины в условиях испытаний [3]. В нем подразумевается, что транспортное средство совершает поворот по «идеальной» кинематической схеме поворота без увода колес. На практике следует в качестве радиуса поворота использовать отношение линейной скорости колесной машины $v_{\text{х км}}$ к угловой $\omega_{\text{з км}}$, так как есть возможность измерения угловой скорости вращения и оценки линейной скорости движения электробуса [5]. При разработке системы управления

рассматривается движение в повороте, поэтому уравнение (1) удобнее всего преобразовать таким образом, чтобы можно было оперировать угловыми скоростями вращения транспортного средства. В качестве ограничения, по которому ориентируется система защиты, принимается критическая скорость вращения автомобиля по опрокидыванию при мгновенной скорости движения:

$$\omega_{кр.оп} = \sqrt{\frac{B_{кр} R_{п} g}{2 h_{ц}}} / R_{п}; \tag{2}$$

$$R_{п} = \frac{v_{x\text{ км}}}{\omega_{z\text{ км}}};$$

где:

$R_{п}$ – радиус поворота колесной машины, м;

$v_{x\text{ км}}$ – скорость движения колесной машины, м/с;

$\omega_{z\text{ км}}$ – угловая скорость вращения колесной машины вокруг вертикальной оси, рад/с.

В уравнении (2) проводится вычисление критической угловой скорости по опрокидыванию. Такая форма записи уравнения удобна с точки зрения формирования фазовой переменной, для закона управления тягой тягового электропривода. В качестве фазовой переменной, изменяющейся во временном интервале, используется относительное отклонение фактической скорости вращения колесной машины $\omega_{z\text{ км}}$ от критической угловой скорости по опрокидыванию $\omega_{кр.оп}$:

$$x_{кр.оп}(t) = \frac{\omega_{кр.оп}(t) - \omega_{z\text{ км}}(t)}{\max(\omega_{кр.оп}(t), \omega_{z\text{ км}}(t))}. \tag{3}$$

Согласно уравнению (3), если фактическая скорость вращения приближается к критической угловой скорости $\omega_{z\text{ км}} \rightarrow \omega_{кр.оп}$ то $x_{кр.оп}(t) \rightarrow 0$, если фактическая скорость вращения стремится к нулю $\omega_{z\text{ км}} \rightarrow 0$ то $x_{кр.оп}(t) \rightarrow 1$. В качестве управляющего воздействия используется сомножитель $h_{кр.оп}(t) = [0; 1]$, который умножается на величину положения педали хода:

$$M_{req} = M_{ref} h_{педаль} h_{кр.оп};$$

где:

M_{req} – запрашиваемый крутящий момент, посылаемый на тяговый инвертор, Н·м;

M_{ref} – опорный крутящий момент, относительно которого формируется запрашиваемый крутящий момент, Н·м;

$h_{педаль}$ – степень нажатия на педаль $h_{педаль} = [0; 1]$.

На практике применяются различные регуляторы для формирования управляющего воздействия, среди которых: ПИД-регуляторы, регуляторы типа «нечеткой» логики, нейронные сети и др. Для выбора регулятора и закона управления требуется описать условия работы разрабатываемой системы (табл. 1).

Таблица 1.

Условия работы системы

Table 1.

System operating conditions

Внешнее условие	Фазовая переменная	Управляющее воздействие
$\omega_{z\text{ км}} \rightarrow \omega_{кр.оп}$	$x_{кр.оп}(t) \rightarrow 0$	$h_{кр.оп}(t) \rightarrow 0$
$\omega_{z\text{ км}} \rightarrow 0$	$x_{кр.оп}(t) \rightarrow 1$	$h_{кр.оп}(t) \rightarrow 1$

Для выполнения условий закона управления, выраженных в табл. 1, может быть применена логистическая функция, также известная как сигмовидная кривая [6]:

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}.$$

Внешний вид сигмовидной кривой представлен на рис. 1 а).

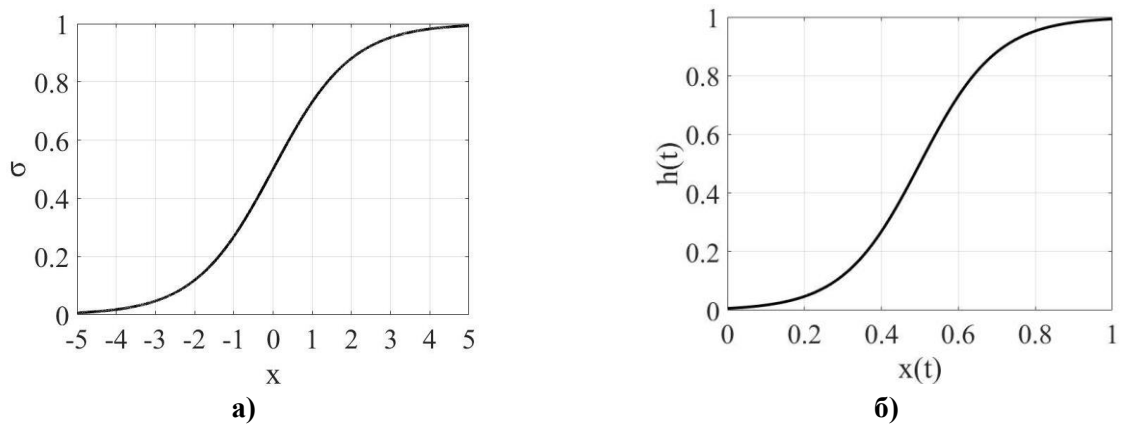


Рис. 1. Внешний вид логистической функции:

а) стандартной, б) преобразованной

Fig. 1. Logistic function appearance:

a) standard, b) modified

Однако сигмовидную кривую следует преобразовать в несколько ином виде, учитывая, что входная переменная имеет диапазон $x_{кр.оп}(t) = [0; 1]$ и $h_{кр.оп}(t) = [0; 1]$. Тогда внешний вид сигмовидной функции примет вид, представленный на рис. 1 б. Уравнение в этом случае будет выглядеть следующим образом:

$$h_{кр.оп}(t) = \frac{1}{1 + e^{-k(x_{кр.оп}(t)-0.5)}};$$

где k – коэффициент нарастания логистической кривой.

Блок-схема показывающая общий принцип формирования запрашиваемого крутящего момента представлена на рис. 2.

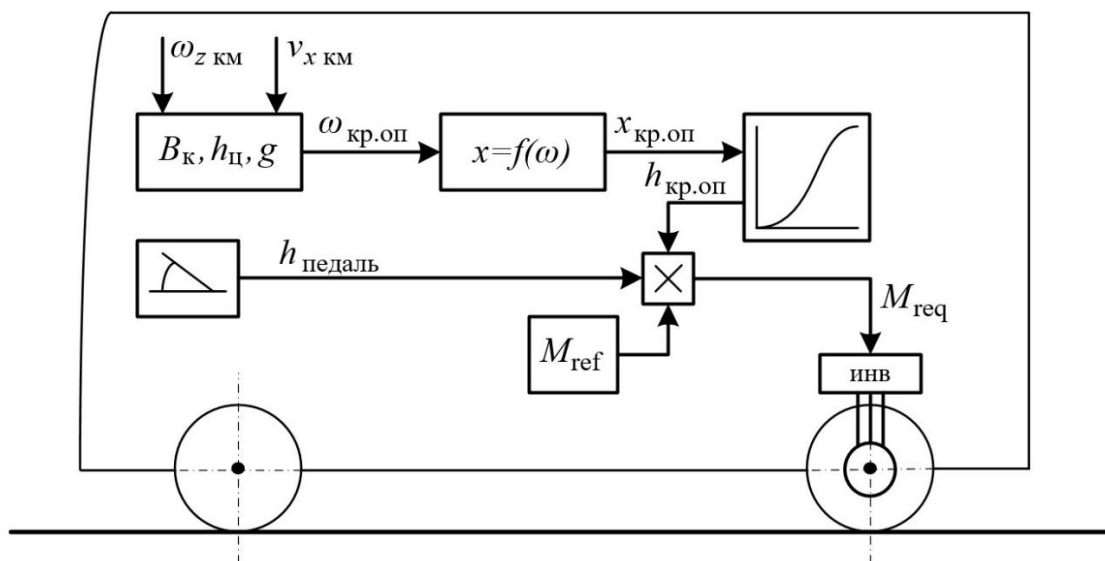


Рис. 2. Блок-схема формирования запрашиваемого крутящего момента

Fig. 2. Flow chart of acquiring the requested torque moment

После разработки алгоритма и закона управления следует провести виртуальные заезды с целью обоснования работоспособности и эффективности разработанной системы.

Моделирование движения транспортного средства и обоснование работоспособности системы защиты от опрокидывания

Существуют различные математические описания движения транспортных средств. Подавляющее большинство математических моделей позволяют моделировать криволинейное движение транспортного средства по горизонтальной поверхности, не учитывая при этом крен автомобиля [7]. Поэтому перед тем, как проводить оценку работоспособности и эффективности, следует разработать математическую модель пространственного движения, учитывающую крен автомобиля и деформацию колес. В связи с этим разработана математическая модель пространственного движения транспортного средства, основанная на работах [8-11] в среде MATLAB&Simulink.

Для оценки работоспособности и эффективности разработанной системы проводится моделирование движения по опорному основанию «асфальт», положение управляемых колес изменяется 0° до 20° с 1 сек. по 2 сек., начало движения происходит на 5 сек. Проводятся имитационные заезды электробусов, в одном из которых задействована система защиты от опрокидывания (Электробус 1), а в другом эта система не задействована (Электробус 2).

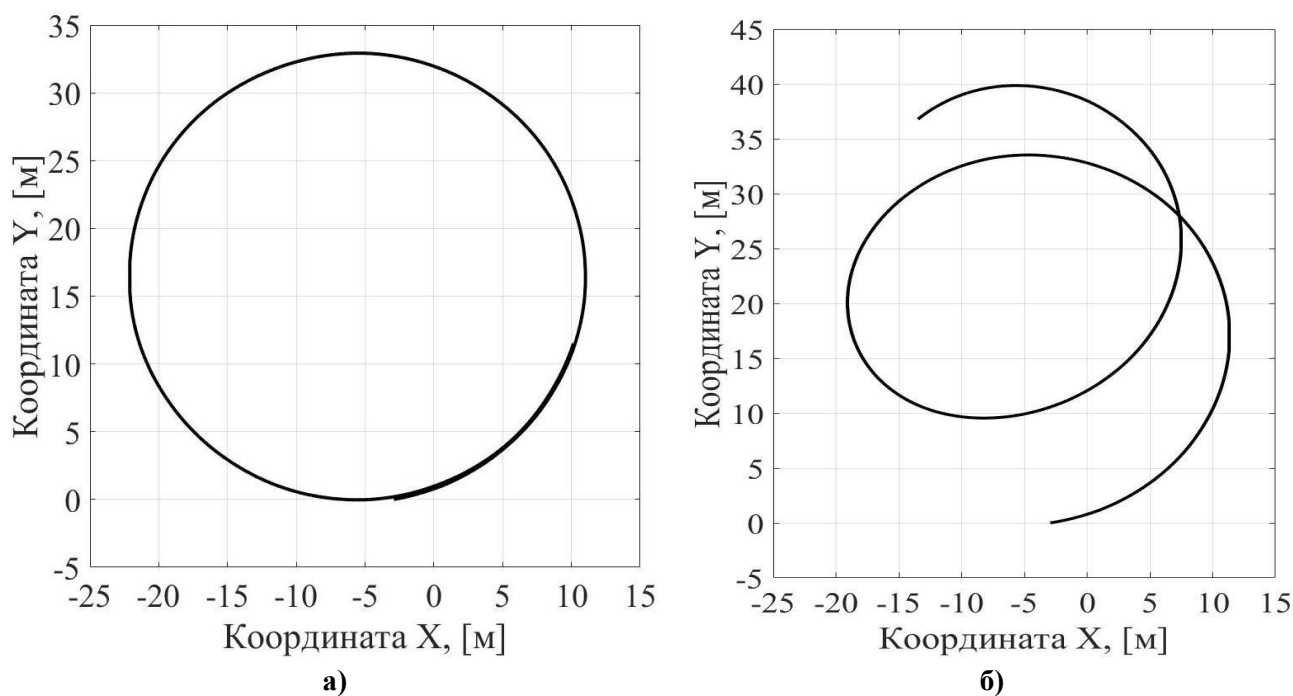
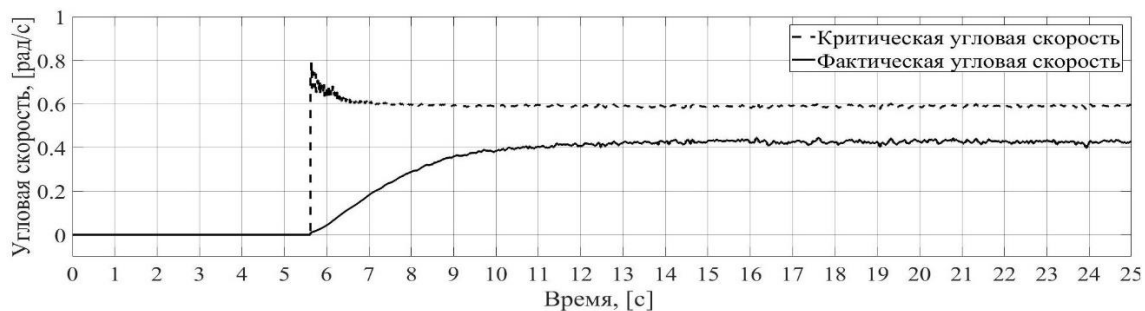


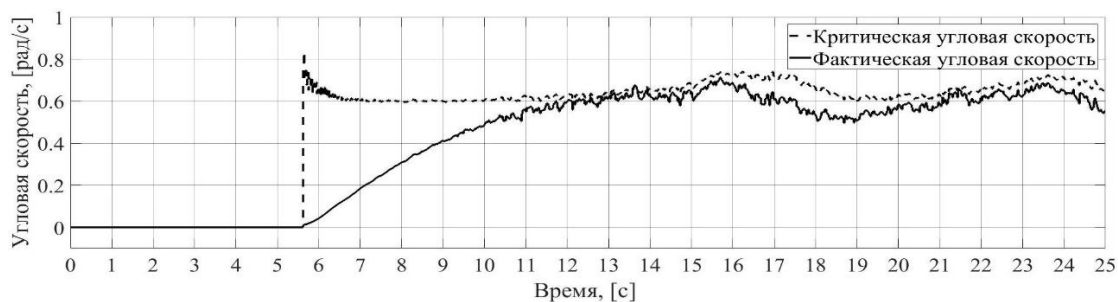
Рис. 3. Траектория движения:
а) «Электробуса 1», б) «Электробуса 2»

Fig. 3. Path of travel:
а) «Electric bus 1», б) «Electric bus 2»

На рис. 3 показаны траектории виртуального движения электробусов. На рис. 3 а видно, что «Электробус 1», в котором задействована система защиты от опрокидывания, движется, сохраняя траекторию движения по окружности, в то время как у «Электробуса 2», на рис. 3 б, траектория движения нарушается. Также на рис. 4 представлены графики критической угловой скорости по опрокидыванию и фактической угловой скорости кузова.



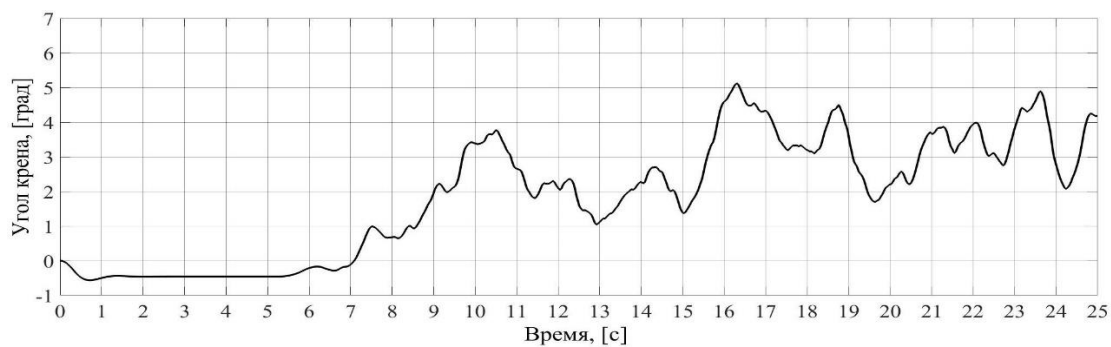
а)



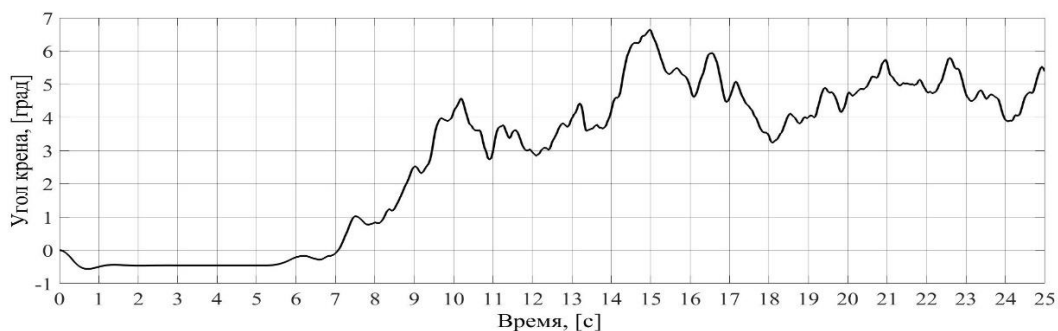
б)

Рис. 4. Графики критической и фактической угловых скоростей:
пунктирная линия – критическая угловая скорость по опрокидыванию,
сплошная линия – фактическая угловая скорость вращения кузова:
 а) «Электробуса 1», б) «Электробуса 2»

Fig 4. Graph plots for critical and actual angular velocities: dashed line is for damping critical angular velocity, solid line is for actual angular velocity of the bus body:
 а) «Electric bus 1», б) «Electric bus 2»



а)



б)

Рис. 5. График угла крена: а) «Электробуса 1», б) «Электробуса 2»

Fig. 5. Graph plot for heeling angle: а) «Electric bus 1», б) «Electric bus 2»

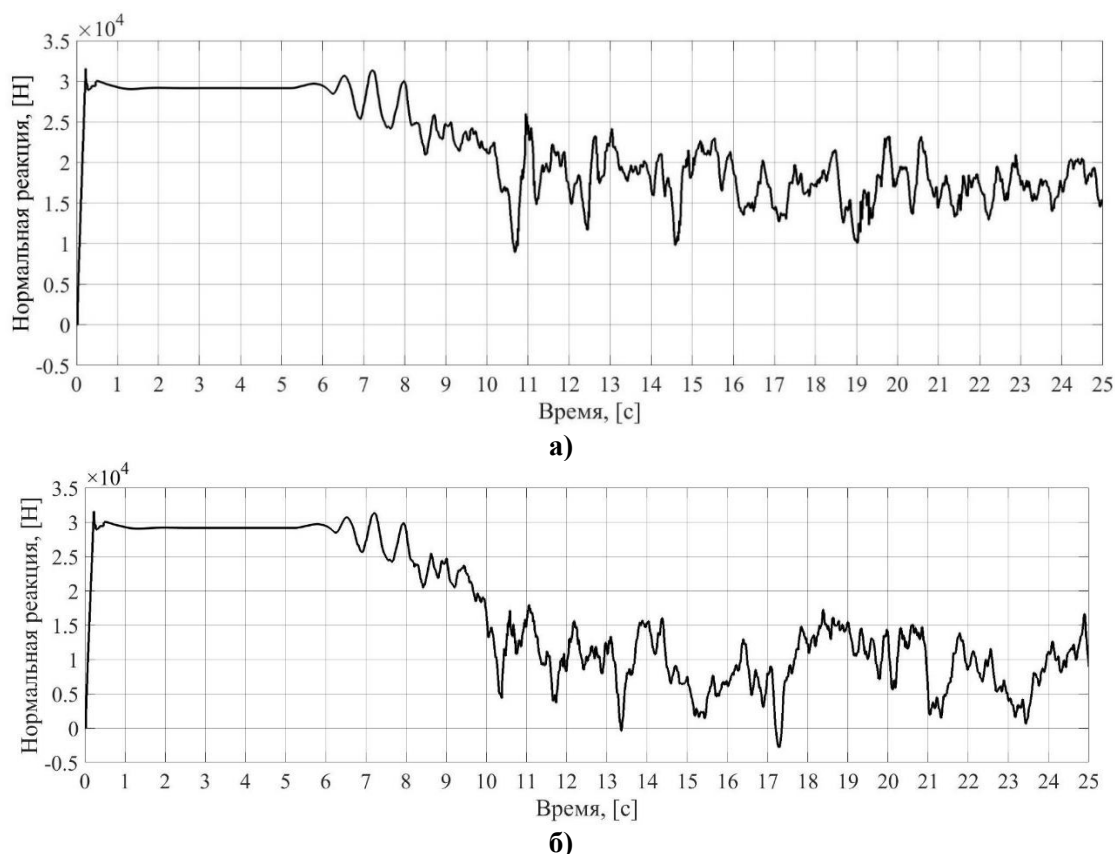


Рис. 6. График нормальной реакции заднего колеса:

а) «Электробуса 1», б) «Электробуса 2»

Fig. 6. Graph plot for back wheel normal response:

а) «Electric bus 1», б) «Electric bus 2»

Из рис. 4 а видно, что при движении «Электробуса 1» фактическая угловая скорость кузова $\omega_{z\text{ км}}$ не достигла критического значения $\omega_{\text{кр.оп}}$ и с 10-й секунды осталась неизменной. Показано, что при движении «Электробуса 2» фактическая угловая скорость кузова $\omega_{z\text{ км}}$ достигла критического значения $\omega_{\text{кр.оп}}$. На графике рис. 4 а видно, что «Электробус 1» при совершении поворота, обладает запасом по боковому опрокидыванию, о чем так же свидетельствуют графики угла крена (рис. 5) и графики нормальной реакции заднего колеса внутреннего борта (рис. 6).

Для получения количественной оценки эффективности проводится сравнение математических ожиданий и пиковых значений углов крена и нормальных реакций заднего колеса внутреннего борта обоих электробусов. В табл. 2 представлены результаты вычислений и эффективность разработанной системы. Под знаком «+» понимается повышение эффективности системы, под знаком «-», соответственно, понижение.

Таблица 2.

Результаты вычислений

Table 2.

Calculated results

Наименование критерия	Электробус 1	Электробус 2	Относительная эффективность
$M(\psi)$	3,01°	4,52°	+33,4 %
$M(R_z)$	17459 Н	9524 Н	+83,3 %
ψ_{max}	5,17°	6,64°	+22,14 %
$R_{z\text{ min}}$	8206 Н	0 Н	+100 %

При сравнении математических ожиданий углов крена относительная эффективность повысилась на +33,4 %, а при сравнении математических ожиданий нормальных реакций относительная эффективность повысилась на +83,3 %. При сравнении пиковых значений углов крена относительная эффективность повысилась на +22,14 %, а при сравнении математических ожиданий нормальных реакций относительная эффективность повысилась на +100 %.

Выводы

Разработана система защиты от поперечного опрокидывания электробуса, для которой была выведена формула расчета критической угловой скорости вращения кузова и сформулирован закон управления тягой тягового электропривода. Методом имитационного моделирования доказана эффективность разработанной системы защиты от поперечного опрокидывания электробуса. Применение системы на «Электробусе 1» показало, что математическое ожидание угла крена уменьшилось на 33,4 %, а математическое ожидание нормальной реакции повысилось на 83,3 %, что свидетельствует о меньшей склонности электробуса к опрокидыванию.

В результате моделирования движения выявилось, что «Электробус 1» с задействованной системой защиты от опрокидывания совершал движение в повороте, сохраняя траекторию движения по окружности.

Библиографический список

1. **Kim, J.**, Song, I., Choi W. An Electric Bus with a Battery Exchange System // MDPI. Energies №8, 6806 – 6819 (2015).
2. **Fan, Y.**, Du, Ch., Wang, Q. Study on the Influence of the Center of Gravity of Fuel Cell City Bus on its Handling Characteristics // Mechanica. Volume 26(5), 416-425 (2020).
3. **Тарасик, В.П.** Теория движения автомобиля / В.П. Тарасик. – СПб.: БХВ-Петербург, 2022. – 576 с.
4. **Ларин, В.В.** Теория движения полноприводных колесных машин: учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 391 с.
5. **Лобусов, Е.С.** Алгоритм определения фактической скорости для обеспечения работы автоматизированной системы управления движением колесной машины / Е.С. Лобусов, М.М. Жилейкин // Известия вузов. Машиностроение. 2017. № 7. С. 34-40.
6. **Тадеусевич, Р.** Элементарное введение в технологию нейронных систем с примерами программ / Р. Тадеусевич, Б. Боровик, Т. Гончаж, Б. Леппер. – М.: Горячая линия-Телеком, 2011. – 408 с.
7. **Liu, W.** Khajepour, A., He, H., Wang, H., Huang, Y. Integrated Torque Vectoring Control for a Three-Axle Electric Bus Based on Holistic Cornering Control Method // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1-13 (2017).
8. **Жилейкин, М.М.** Теоретические основы повышения показателей устойчивости и управляемости колесных машин на базе методов нечеткой логики. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 238 с.
9. **Жилейкин, М.М.** Моделирование систем транспортных средств / М.М. Жилейкин, Г.О. Котиев. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. – 239 с.
10. **Вольская, Н.С.** Математическая модель прямолинейного качения эластичного колеса по неровному деформируемому опорному основанию / Н.С. Вольская, М.М. Жилейкин, А.Ю. Захаров // Известия вузов. Машиностроение. 2017. № 10. С. 25-33.
11. **Жилейкин, М.М.** Математическая модель качения эластичного колеса по неровностям недеформируемого опорного основания / М.М. Жилейкин, Б.В. Падалкин // Известия вузов. Машиностроение. 2016. № 3. С. 24-29.

*Дата поступления
в редакцию: 19.08.2022*

*Дата принятия
к публикации: 20.11.2022*

УДК 623.113

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_85

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ЧИСЛЕННОГО ПОВЕДЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ

Д.А. Жителев

ORCID: 0000-0002-8080-1419 e-mail: zhitelevda@student.bmstu.ru

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

Т.Д. Поздняков

ORCID: 0000-0001-8966-1806 e-mail: t.pozdnyakov@bmstu.ru

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

Д.А. Сулегин

ORCID: 0000-0003-3359-3829 e-mail: d_sulegin@bmstu.ru

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

В.Н. Наумов

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

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

Анализируется проблема обеспечения пассивной безопасности пилотов гоночных автомобилей за счет применения каркаса безопасности. Разработана конечно-элементная модель (КЭМ) каркаса безопасности. Поведение материала труб каркаса описано пластичным типом, с изотропным упрочнением, который позволяет учесть нелинейность свойств. Смоделированы испытания, регламентированные Российской Автомобильной Федерацией (РАФ). При горизонтальном нагружении главной дуги деформации в два раза превышают установленный допуск. Для выполнения требований РАФ и обеспечения пассивной безопасности пилотов необходимо дополнительное исследование с применением топологической оптимизации. С целью верификации КЭМ моделируется испытание на трехточечный изгиб трубы, а также проведен натурный эксперимент. Для исследования выбраны два образца из среднеуглеродистой стали, и два образца из легированной высококачественной стали. Трубы из легированной стали выдерживают нагрузку на 23 % большую, чем трубы из среднеуглеродистой стали. Расхождение результатов моделирования и эксперимента не превышают 9 %, что подтверждает достоверность передачи КЭМ поведения реальной конструкции.

Ключевые слова: каркас безопасности, пассивная безопасность, конечно-элементная модель, деформация, сталь, боковой удар, трехточечный изгиб, верификация.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Жителев, Д.А. Исследование экспериментального и численного поведения тонкостенных труб при квазистатическом режиме нагружения / Д.А. Жителев, Т.Д. Поздняков, Д.А. Сулегин, В.Н. Наумов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 85-96. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_85

THE RESEARCH OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL PERFORMANCE OF THIN-WALLED TUBES AT QUASI-STATIC LOAD CONDITIONS

D.A. Zhitelev

ORCID: 0000-0002-8080-1419 e-mail: zhitelevda@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

T.D. Pozdnyakov

ORCID: **0000-0001-8966-1806** e-mail: **t.pozdnyakov@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

D.A. Sulegin

ORCID: **0000-0003-3359-3829** e-mail: **d_sulegin@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

V.N. Naumov

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

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. The authors analyze the problem of passive safety assurance for racing car drivers using safety cages. Finite-element model (FEM) of a safety cage is developed. Cage tubing material performance is described as elastic-type, equipped with isotropic strain hardening allowing to account for non-linear properties. The simulation tests regulated by the Russian Automobile Federation (RAF) are carried out. At horizontal load on the main arch, the strains exceed the established tolerance twice. To meet RAF requirements and ensure passive safety for drivers, additional, topologically optimized, testing is needed. FEM is verified through a three-point bending simulation test and a full-scale experiment. The investigators have chosen two samples made of medium carbon steel and two samples made of compound high-grade steel for the study. Tubes of compound steel can resist 23 % higher load than tubes of medium carbon steel. The discrepancy between simulation results and experimental results does not exceed 9%, assuring that the FEM shows the performance of an actual structure.

Key words: safety cage, passive safety, finite-element model, strain, steel, side impact, three-point bending, verification.

FOR CITATION: D.A. Zhitelev, T.D. Pozdnyakov, D.A. Sulegin, V.N. Naumov. The research of experimental and numerical performance of thin-walled tubes at quasi-static load conditions. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. С. 85-96. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_85

Введение

В целях обеспечения пассивной безопасности пилотов гоночных автомобилей обязательным требованием для допуска к соревнованиям является установка каркаса безопасности. Конструкция каркаса безопасности должна быть легкой, а также должна соответствовать требованиям РАФ касательно структуры и прочности [1]. Основные силовые элементы каркасов состоят из тонкостенных труб, соединенных между собой, как правило, сварными швами. Каркас безопасности, как и другие силовые элементы конструкции автомобиля, при ударе испытывает изгиб, потерю устойчивости и смятие. Для силовых конструкций исследования прочности проводятся как экспериментально, так и посредством метода конечных элементов (МКЭ). Существует ряд работ, описывающий особенности создания КЭМ при исследовании пассивной безопасности [2-8]. При ударном взаимодействии снижается способность каркасных элементов воспринимать нагрузку так же, как и при трехточечном изгибе [9]. На несущую способность труб влияет как материал, из которого они изготовлены, так и форма поперечного сечения. При изготовлении конструкций, обеспечивающих пассивную безопасность, следует использовать трубы круглого сечения [10]. Трубы квадратного сечения выдерживают меньшую по величине нагрузку и разрушаются в местах концентрации напряжений. В работе Mohanty проводился обзор работ на тему сравнения характеристик различных материалов для разработки каркасов безопасности [11]. Наиболее прочной сталью, используемой при изготовлении каркасов, является AISI 4130, наиболее доступной – AISI 1018. Российским аналогом стали AISI 1018 является сталь 15, которая может быть заменена на сталь 20. Аналогом стали

AISI 4130 является сталь 30ХМ, а также сталь 30ХГСА [12]. Особое внимание в данной работе уделяется численному моделированию поведения труб при квазистатическом режиме нагружения при помощи МКЭ. Проведено сравнение поведения труб из более прочной стали, но и более дорогой, а также из менее прочной стали. Для верификации теоретических положений приведены результаты стендового эксперимента.

Анализ напряженно-деформированных состояний (НДС) каркаса безопасности

В качестве объекта исследования выбран автомобиль ВАЗ-2104, как наиболее популярный в дисциплине «Дрифт» в зимних чемпионатах. По внутренним параметрам данного автомобиля создана стержневая модель (рис. 1).

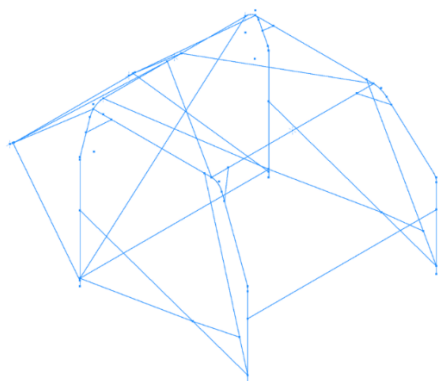


Рис. 1. Стержневая модель

Fig. 1. Rod model

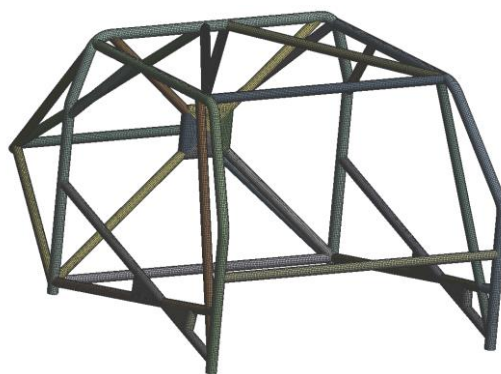


Рис. 2. КЭМ каркаса безопасности

Fig. 2. FEM of the safety cage

Согласно статье 253 приложения J, конструкция основана на главной дуге и двух боковых полудугах, а также дополнена обязательными V-образными элементами в плоскости крыши и X-образными – в боковых поверхностях, повторяющих профиль дверей автомобиля [1]. Основные элементы выполнены из труб диаметром 45x2,5 мм, дополнительные – из труб диаметром 40x2 мм. При создании КЭМ (рис. 2) выбран размер конечного элемента (КЭ) равный 7 мм, что характерно для среднеуровневых моделей [13]. Количество элементов – 96413. Сетка КЭ смоделирована преимущественно четырехузловыми оболочечными элементами типа Бельчко-Лина-Цая. Сварные швы моделировались при помощи сшивания сетки и связи узлов соседних элементов (рис. 3).

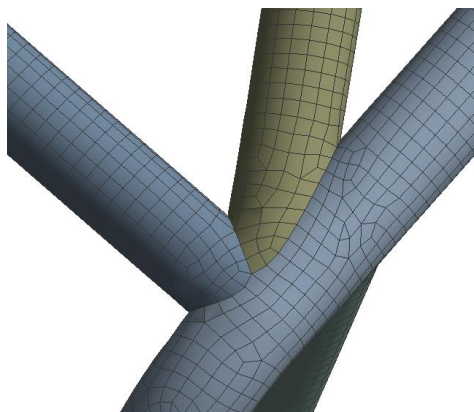


Рис. 3. КЭМ каркаса безопасности (моделирование сварных швов)

Fig. 3. FEM of the safety cage (modeling of welds)

В качестве материала труб выбрана сталь 20. Данный вид стали относится к классу среднеуглеродистых. При больших ударных нагрузках такой материал работает в зоне накопления пластических деформаций (возникающие напряжения превосходят по величине предел текучести), следовательно, для получения корректных результатов моделирования следует учитывать физическую нелинейность свойств. В этом случае использовался материал типа 3 – пластичный, с изотропным упрочнением [14]. Характеристики данного материала задаются при помощи двухлинейной аппроксимации (рис. 4).

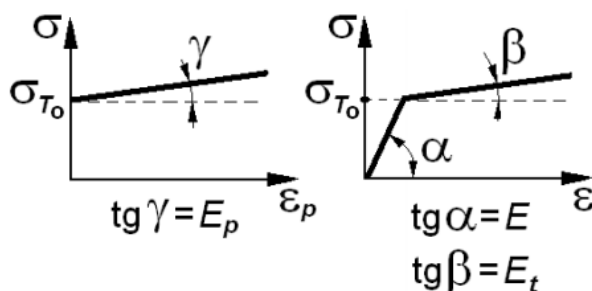


Рис. 4. Линейная аппроксимация характеристики упруго-пластического материала

Fig. 4. Linear approximation of elastoplastic material characteristic

Такой способ представления характеристик описывается следующими формулами:

$$E_p = \frac{\partial \sigma_T}{\partial \varepsilon_p} = \frac{\partial \sigma_T}{\partial \left(\varepsilon_p - \frac{\sigma_T}{E} \right)}; \quad (1)$$

$$\sigma_T = E_p \varepsilon_p + \sigma_{T0}; \quad (2)$$

$$E_p = \frac{E \cdot E_t}{E - E_t}. \quad (3)$$

Характеристики для стали 20 представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Характеристики материала

Table 1.

Material characteristics

	Сталь 20
Плотность, кг/м ³	7859
Коэффициент Пуассона	0,3
Модуль Юнга, ГПа	213
Предел текучести, МПа	245
Предел прочности, МПа	412
Относительное удлинение, %	21

Также задана кусочно-линейная диаграмма зависимости между напряжением и деформацией для стали 20 ($E_t = 1044$ МПа) (рис. 1). Испытания каркаса безопасности регламентируются РАФ [1]. При испытании на главной дуге каркаса безопасности в сборе должен выдерживать вертикальную нагрузку, приложенную к вершине главной дуги через жесткий штамп, вычисляемую по формуле (4):

$$P_1 = 7,5 \cdot g \cdot (m + 150), \quad (4)$$

где $g = 9,81 \frac{m}{c^2}$ – ускорение свободного падения; $m = 1020$ кг – сухой вес автомобиля ВАЗ 2104.

Следовательно,

$$P_1 = 7,5 \cdot 9,81 \cdot (1020 + 150) = 86053 \text{ Н.}$$

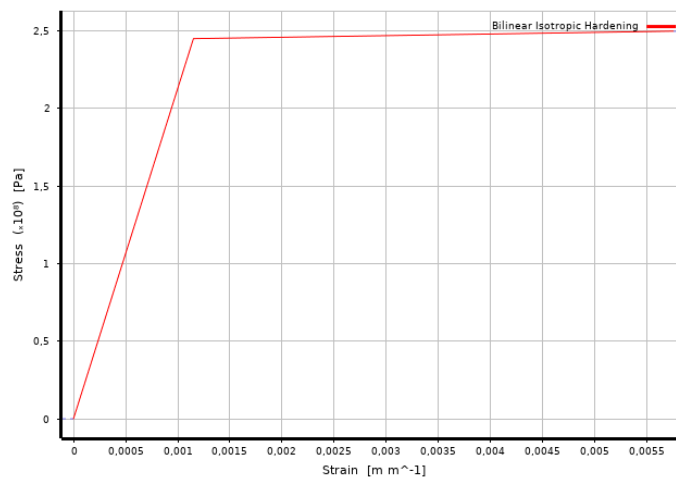


Рис. 5. Кусочно-линейная характеристика стали 20

Fig. 5. Piecewise linear characteristic of steel 20

При испытании во всей структуре не должно возникнуть деформаций, превышающих 50 мм в направлении приложения нагрузки. Схема установки для проведения испытания приведена на рис. 6.

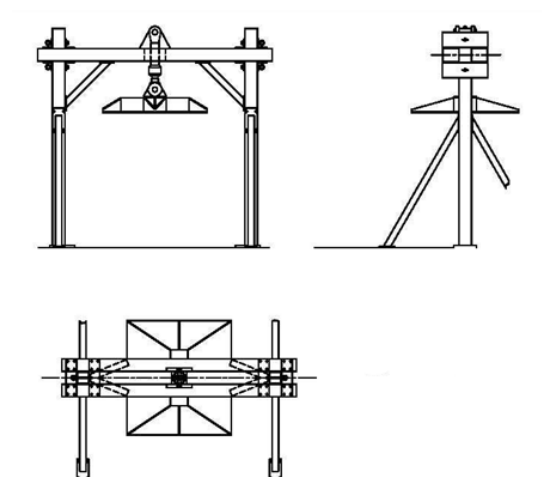


Рис. 6. Схема установки для проведения испытания на главной дуге

Fig. 6. Layout of the unit for main arch testing

При проведении испытания на передней дуге каркас должен выдерживать нагрузку, вычисляемую по формуле (5):

$$P_2 = 3,5 \cdot g \cdot (m + 150), \tag{5}$$

$$P_2 = 3,5 \cdot 9,81 \cdot (1020 + 150) = 40158 \text{ Н.}$$

Нагрузка прикладывается при помощи плиты (рис. 7).

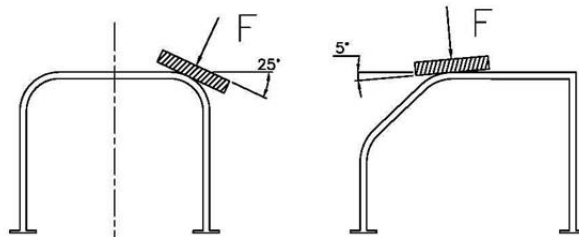


Рис. 7. Схема нагрузки при испытании на передней дуге

Fig. 7. Load pattern for front arch testing

При испытании во всей структуре не должно возникнуть деформаций, превышающих 100 мм в направлении приложения нагрузки. При горизонтальном испытании главной дуги величина нагрузки также рассчитывается по формуле (2). Нагрузка прикладывается горизонтально к вертикальной части главной дуги. При испытании во всей структуре не должно возникнуть деформаций, превышающих 50 мм в направлении приложения нагрузки. В результате моделирования испытаний получена картина деформированного состояния, представленная на рис. 8, 9.

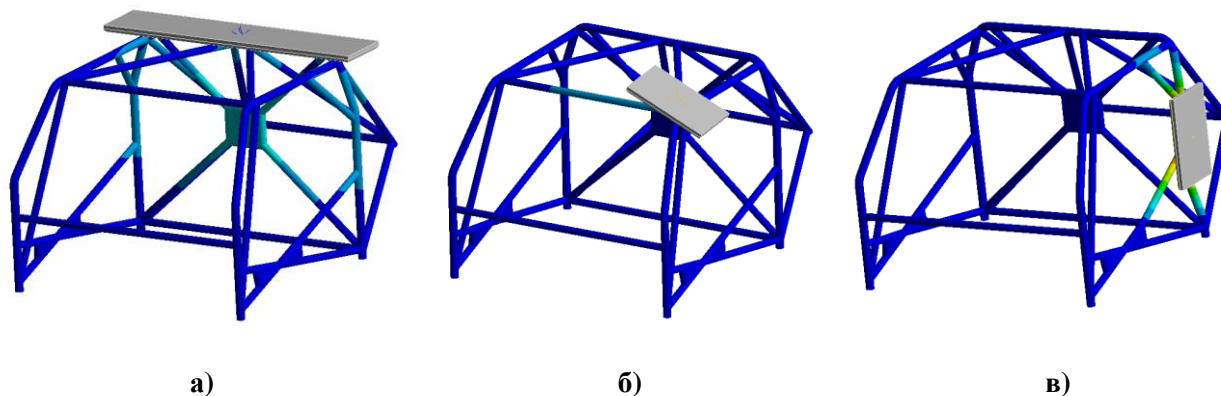


Рис. 8. Перемещения в конструкции под нагрузкой (с нагружающей плитой):

а – испытание на главной дуге; б – испытание на передней дуге; в – боковое испытание главной дуги

Fig. 8. Displacements in loaded structure (with a loading plate):

a) main arch testing; b) front arch testing; c) side impact main arch testing

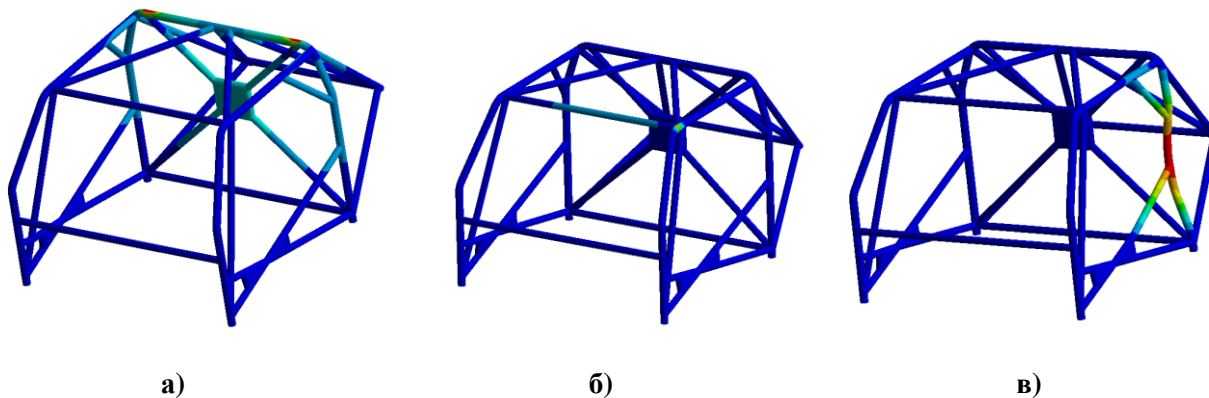


Рис. 9. Перемещения в конструкции под нагрузкой (без нагружающей плиты):

а – испытание на главной дуге; б – испытание на передней дуге; в – боковое испытание главной дуги

Fig. 9. Displacements in loaded structure (without a loading plate):

a) main arch testing; b) front arch testing; c) side impact main arch testing

При испытании на главной дуге наибольшие деформации наблюдаются по краям горизонтальной части главной дуги. Труба преимущественно деформируется в своем сечении. Нагрузку также воспринимает X-образная распорка главной дуги. При испытании на передней дуге деформируется боковая полудуга в своем сечении в зоне приложения нагрузки. Нагрузка передается на переднюю верхнюю распорку. При горизонтальном испытании главной дуги большие перемещения наблюдаются по всей вертикальной части главной дуги. Наибольшие перемещения в зоне приложения нагрузки. Под действием силы за вертикальной частью главной дуги «утягиваются» боковая X-образная распорка и верхняя укосина. Результаты моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Результаты моделирования испытаний каркаса безопасности

Table 2.

Results of the safety sage simulation testing

	Максимальные напряжения, МПа	Максимальные деформации, мм	Допускаемые деформации, мм
Испытание на передней дуге	311,8	4,34	100
Испытание на главной дуге	276,4	1,06	50
Горизонтальное нагружение главной дуги	452,9	102,2	50

При первых двух испытаниях каркас деформировался незначительно. При горизонтальном испытании главной дуги деформация превысила более чем в два раза установленный допуск. Таким образом, конструкция каркаса требует дополнительного исследования. Для устранения существующих недостатков должна быть проведена топологическая оптимизация конструкции, на что будет направлено дальнейшее исследование.

Исследование численного поведения тонкостенных труб

Испытания металлических изделий на изгиб регламентируется ГОСТ 14019-2003. На рис. 10 представлена схема испытания.

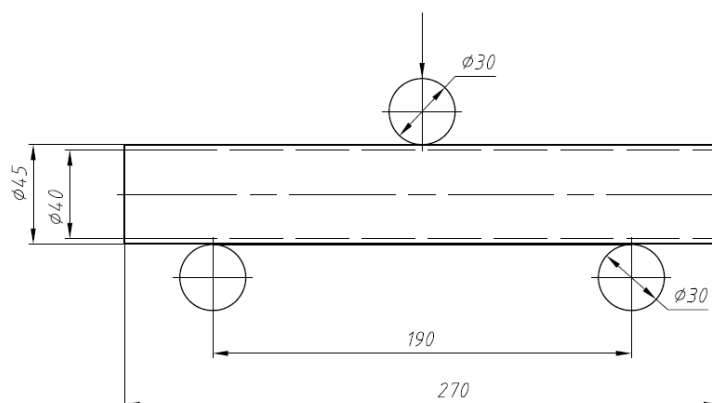


Рис. 10. Схема испытания на трехточечный изгиб

Fig. 10. Pattern of the three-point bending test

Моделирование трехточечного изгиба проводится в два шага: на первом шаге оправка перемещается на 30 мм перпендикулярно оси трубы; на втором, возвращается в исходное положение. При создании КЭМ принималось допущение о симметричности модели. Выбран размер КЭ, равный 2,5 мм, что характеризует высокую точность модели [13]. Сетка моделировалась при помощи четырехузловых оболочечных элементов типа Белычко-Лина-Цая. Сетка состоит из 1908 элементов. КЭМ представлена на рис. 11. В качестве материала использовалась сталь 20, описанная ранее. и сталь 30ХГСА. Характеристики стали 30ХГСА представлены в табл. 3 и на рис. 12.

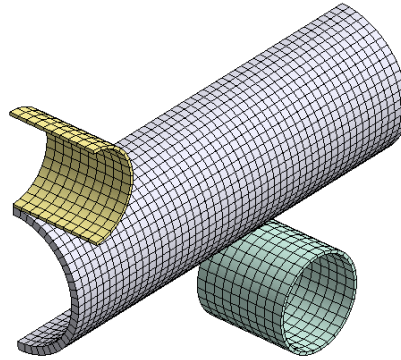


Рис. 11. КЭМ трубы с опорой и оправкой

Fig. 11. FEM of the bedded tube with a mandrel

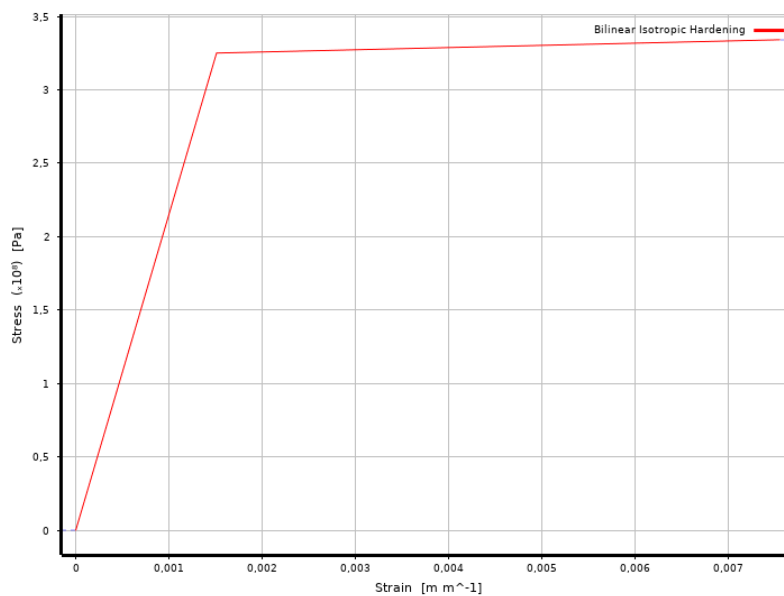
Характеристика стали 30ХГСА

Characteristic of steel 30ХГСА

Таблица 3.

Table 3.

	30ХГСА
Плотность, кг/м ³	7850
Коэффициент Пуассона	0,3
Модуль Юнга, ГПа	215
Предел текучести, МПа	325
Предел прочности, МПа	491
Относительное удлинение, %	18

Рис. 12. Билинейная характеристика стали 30ХГСА ($E_t = 1500$ МПа)Fig. 12. Bilinear characteristic of steel 30ХГСА ($E_t = 1500$ МПа)

Деформированное состояние представлено на рис. 13.

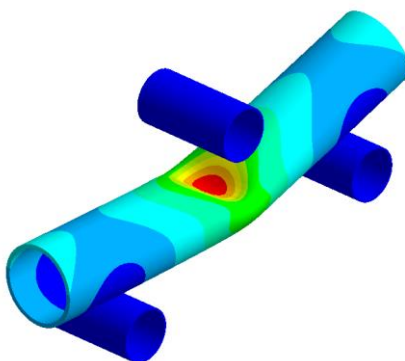


Рис. 13. Перемещения в трубе под нагрузкой

Fig. 13. Displacements in a loaded tube

На рис. 14 представлены расчетные кривые, показывающие зависимость силы реакции от перемещения нагружающего элемента.

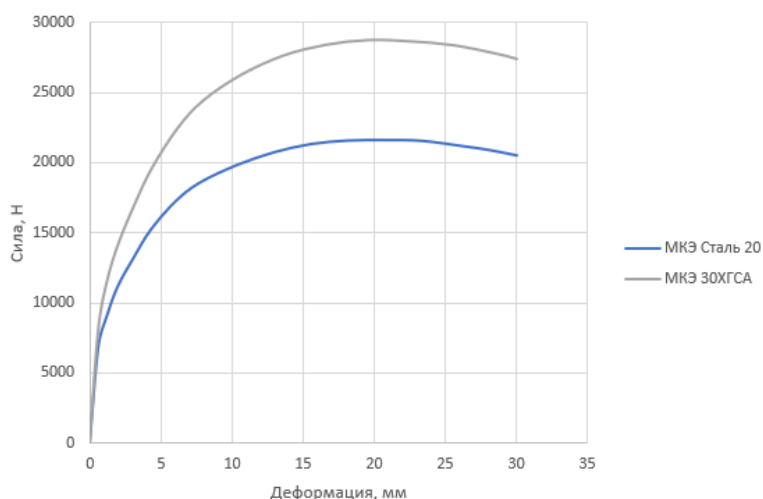


Рис. 14. Кривые нагружения при расчете МКЭ

Fig. 14. Load curves for FEM calculation

Результаты расчета представлены в табл. 4.

Таблица 4.

Результаты расчета трехточечного изгиба МКЭ

Table 4.

Results of the FEM three-point bending calculation

Труба	Максимальное воспринимаемое усилие, Н
45 мм x 2,5 мм Сталь 20	21605
45 мм x 2,5 мм 30ХГСА	28705

Анализ показал, что труба из стали 30ХГСА воспринимает нагрузку на 24 % большую, чем труба из стали 20. Следовательно, можно предположить, что в случае применения труб из стали 30ХГСА при изготовлении каркаса безопасности, можно улучшить жесткостные характеристики, что, в свою очередь, положительно скажется на прохождении каркасом регламентированных испытаний.

Верификация конечно-элементного моделирования

В целях верификации проведены натурные эксперименты с четырьмя образцами труб: образец 1,2 – труба 45 мм х 2,5 мм сталь 20; образец 3,4 – труба 45 мм х 2,5 мм сталь 30ХГСА. Образец 1 показан на рис. 15.



Рис. 15. Исходное состояние испытуемой трубы

Fig. 15. Initial condition of the tested tube

Трехточечный изгиб проводился на испытательной машине Zwick Z100 (рис. 16) согласно схеме, представленной на рис. 10. В процессе испытания посредством скругленной оправки со скоростью 5 мм/мин на трубу передавалась нагрузка, которая измерялась при помощи датчиков установки и выводилась с помощью программного обеспечения. В табл. 5 и на рис. 17 представлены результаты эксперимента.



Рис. 16. Испытательная машина Zwick Z100

Fig. 16. Zwick Z100 testing machine

Результаты эксперимента

Results of the experiment

Таблица 5.

Table 5.

Труба	Номер образца	Максимальное воспринимаемое усилие, Н
45 мм х 2,5 мм Сталь 20	1	22113
	2	21775
45 мм х 2,5 мм 30ХГСА	3	29108
	4	29252

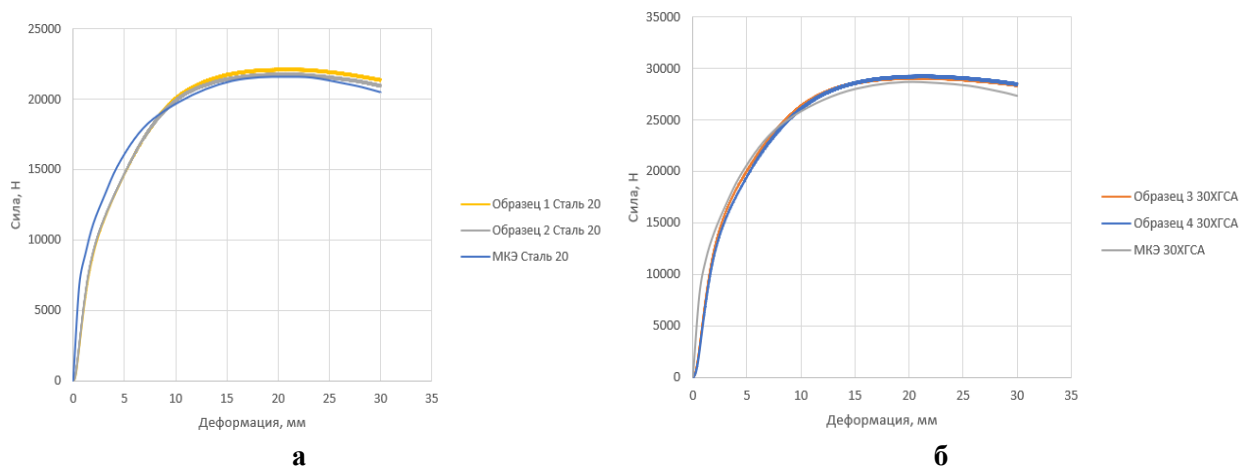


Рис. 17. Диаграммы нагружения образцов труб: а – Сталь 20; б – 30ХГСА

Fig. 17. Load curves for tube samples: a – Steel 20; б – 30ХГСА

На рис. 18 показано деформированное состояние образца 1 после проведения натурного эксперимента. На рис. 19 показано деформированное состояние всех четырех образцов.



Рис. 18. Деформированное состояние образца 1

Fig. 18. Strained condition of sample 1



Рис. 19. Трубы после натурного эксперимента

Fig. 19. Tubes after the full-scale experiment

Анализа результатов показывает, что предложенная КЭМ дает приемлемую точность при моделировании, так как максимальная погрешность не превышает 9 %. Необходимо отметить, что при перемещении более 25 мм воспринимаемая нагрузка уменьшается, и трубы теряют свою несущую способность.

Заключение

Разработана конечно-элементная модель каркаса безопасности спортивного автомобиля и трубы, применяемой при изготовлении силовых конструкций каркасов безопасности. Проведено моделирование испытания на трехточечный изгиб. С целью верификации проведен натурный эксперимент.

1. КЭМ показывает поведение тонкостенных труб с погрешностью не более 9 %, что подтверждает ее применимость для многовариантных расчетов.
2. При выборе материала труб для изготовления силовых конструкций каркасов следует оценивать целесообразность применения легированных сталей с точки зрения улучшения технических характеристик и увеличения стоимости конструкции (труба из стали 30ХГСА воспринимает максимальную нагрузку на 24 % больше, чем труба из стали 20; стоимость одного метра трубы из стали 30ХГСА на 37 % выше, чем трубы из стали 20).

3. Топологическая оптимизация конструкции каркаса может улучшить характеристики в сравнении с конструкцией, выполненной по регламенту РАФ.

Библиографический список

1. Оборудование безопасности: приложение J. Статья 253. [Электронный ресурс] // Режим доступа <http://www.raf.su/kst/category/74-prilozheniya-j> (дата обращения 15.05.2022).
2. **Шабан, Б.А.** Особенности моделирования каркасных элементов кузовов и кабин автомобилей при исследовании пассивной безопасности / Б.А. Шабан, В.Н. Зузов // Наука и образование: научное издание НГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 11. С. 81-104.
3. **Шабан, Б.А.** Анализ влияния конструктивных факторов кабины на пассивную безопасность грузовых автомобилей при ударе по передним стойкам / Б.А. Шабан, В.Н. Зузов // Наука и образование: научное издание НГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 11. С. 95-106.
4. **Шабан, Б.А.** Анализ влияния конструктивных факторов на пассивную безопасность кабины грузового автомобиля при фронтальном ударе / Б.А. Шабан, В.Н. Зузов // Наука и образование: научное издание НГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 8. С. 91-108.
5. **Гончаров, Р.Б.** Проблемы поиска оптимальных конструктивных параметров бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности / Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2018. № 3 (122). С. 130-136.
6. **Гончаров, Р.Б.** Проблемы поиска оптимальных решений для обеспечения пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей при минимальной массе / Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов // Известия МГТУ «МАМИ». 2018. № 4 (38). С. 92-102.
7. **Зузов, В. Н.** Исследование влияния на энергоемкость основных силовых элементов кузова автомобиля в зоне бокового удара / В.Н. Зузов, Д.А. Сулегин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2020. Т. 20. № 4. С. 20-34.
8. **Сулегин, Д.А.** Исследование влияния усиливающих элементов двери автомобиля на пассивную безопасность при боковом ударе / Д.А. Сулегин, В.Н. Зузов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2021. № 1(132). С. 86-97.
9. **Гончаров, Р.Б.** Моделирование поведения тонкостенных труб с разными наполнителями при предельном нагружении применительно к решению проблем пассивной безопасности автомобилей / Р.Б. Гончаров, В.Н. Зузов, Д.Н. Чайко // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 3(87). С. 3.
10. **Sarang Chandrakant Saraf.** Design & Experimentation of Side Impact Beam for Hyundai Verna / Sarang Chandrakant Saraf, Prashantkumar S. Vajaj. [Electronic resource]. Access mode: <https://irjet.org/volume-4-issue-06-june-2017>
11. **Aditya Kumar Mohanty.** Design and Development of Roll Cage: A Review / Aditya Kumar Mohanty, Ankit Jambhulkar, Bhupesh Sarode [Electronic resource]. Access mode: <https://irjet.org/volume-5-issue-03-mar-2018>
12. **Сорокин, В.Г.** Стали и сплавы. Марочник: Справ. изд. / В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев. – М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. – 608 с.
13. **Шабан, Б.А.** Особенности построения конечно-элементных моделей кабин для исследования пассивной безопасности при ударе в соответствии с правилами ЕЭК ООН № 29 / Б.А. Шабан, В.Н. Зузов // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 3. С. 129-156.
14. **Орлов, Л.Н.** Основы разработки конечно-элементных моделей кузовных автотранспортных средств. Расчеты на безопасность и прочность: учеб. пособие / Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, Е.В. Кочанов. – Н. Новгород: НГТУ им. П.Е. Алексеева, 2014. – 144 с.

*Дата поступления
в редакцию: 12.10.2022*

*Дата принятия
к публикации: 01.12.2022*

УДК 656.1

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_97

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНО-ВИНТОВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ СНЕГОБОЛОТОХОДНЫХ АМФИБИЙНЫХ МАШИН

С.А. КарасеваORCID: 0000-0002-1666-777X e-mail: geliosveta@gmail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Обоснована актуальность разработки и исследования амфибийных снегоболотоходных машин с роторно-винтовым двигателем (РВД). Определены основные условия эксплуатации машин с РВД. Построены графики для одиночного и tandemного РВД с различными углами наклона винтовой лопасти. Приведены графики кривых действия (коэффициент упора, коэффициент момента, пропульсивный коэффициент). Приведена визуализация результатов численного моделирования гидродинамики шнеков с водной средой. Проведен структурный анализ гидродинамического взаимодействия с водной средой элементов поверхности шнеков. Установлено, что зона эффективности работы шнеков ограничивается первыми четырьмя элементами винтовых линий, включая входной. Приведена методика расчета эффективности амфибийных снегоболотоходных машин с РВД, включающая в себя совокупность взаимодополняющих критериев: эффективность по скорости, эффективность по курсовой ориентации, эффективность по поддержанию подвижности, эффективность по устранению критических ситуаций.

Ключевые слова: роторно-винтовой двигатель (РВД), амфибийная машина, кривые действия, численное моделирование, подвижность, эффективность, снег, лед, вода.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Карасева, С.А. Разработка методики расчета и выбор рациональных параметров роторно-винтовых двигателей снегоболотоходных амфибийных машин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 97-112. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_97

DEVELOPMENT OF CALCULATION PROCEDURE AND CHOICE OF PRACTICAL PARAMETERS OF ROTARY-SCREW PROPULSION UNITS OF SNOW AND SWAMP-GOING AMPHIBIOUS VEHICLES

S.A. KarasevaORCID: 0000-0002-1666-777X e-mail: geliosveta@gmail.ruNizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper considers the relevancy of development and research of snow and swamp-going amphibious vehicles with rotary-screw propulsion units (RSP). The main performance conditions of RSP are determined. The diagrams for single and tandem rotary-screw propulsors with different helix angles are plotted. The diagrams of performance curves are given (thrust coefficient, torque coefficient, propulsive coefficient). The visualization of the results of computer simulation of hydrodynamics of Archimedes screws in water area is given. The structural analysis of hydrodynamical interaction between water area and elements of Archimedes screws surface is carried out. There is received that the efficiency area of Archimedes screws performance is limited by the first four elements of helixes including the helix input element. The calculation procedure of efficiency of snow and swamp-going amphibious vehicles with RSP is given including complex of complementary criteria: speed efficiency, direction orientation efficiency, mobility maintenance efficiency, efficiency in elimination of critical situations.

Key words: rotary-screw propulsion unit (RSP), amphibious vehicle, performance curves, computer simulation, mobility, efficiency, snow, ice, water.

FOR CITATION: Karaseva S.A. Development of calculation procedure and choice of practical parameters of rotary-screw propulsion units of snow and swamp-going amphibious vehicles. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. С. 97-112. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_97

Введение

Развитие промышленности и недропользования в районах Арктики и Крайнего Севера повышает интерес к снегоболотоходным амфибийным машинам с роторно-винтовыми движителями (РВД). Разрабатываются новые проекты амфибий и транспортно-технологических комплексов на их основе. В отличие от специализированных амфибий с РВД, таких как: технологическая машина *MudMaster* фирмы *Residue Solutions*, не предполагающая движения по воде, или *Riverine Utility Craft* фирмы *Chrysler*, скорее являющаяся плавательным средством, снегоболотоходные амфибии предназначены для движения в разных средах (например, машина ТП-2401 фирмы ООО «Завод Вездеходных Машин»). При проектировании РВД подобных амфибий геометрические характеристики шнеков должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить оптимальное сочетание эффективности при движении по суше и воде с учетом назначения и районов применения.

Сухопутные свойства РВД изучены достаточно глубоко. Существенный вклад в разработку эффективных конструкций амфибий с РВД и теорию взаимодействия шнека с опорной поверхностью внесли советские исследователи. В ОГК СТ ЗИЛ (Отделе главного конструктора специальной техники ЗИЛ) под руководством В.А. Грачева был разработан и испытан целый ряд удачных конструкций машин с РВД. В ОКБ РАЛСНЕМГ (Опытном конструкторском бюро разработки льда, снега и мерзлого грунта) и ОНИЛ ВМ (Отраслевой научно-исследовательской лаборатории вездеходных машин) при Горьковском политехническом институте им. А.А. Жданова (ныне Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева) во второй половине XX в. было проведено значительное количество научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по исследованию транспортных средств с роторно-винтовым движителем при эксплуатации по грунтам, и особенно – по снегу. Огромное значение в этой сфере имеют труды А.Ф. Николаева, С.В. Рукавишника, А.П. Куляшова, В.И. Вологодина, В.Е. Колотилина, В.А. Шапкина, А.А. Аникина, И.Г. Куклиной и многих других. В настоящее время прямым продолжателем данных работ является Научно-исследовательская лаборатория транспортных машин и транспортно-технологических комплексов (НИЛ ТМиТТК) при НГТУ им. П.Е. Алексеева.

Водоходные свойства РВД являются малоисследованной областью. Их изучение зачастую ограничивалось замером тяги на швартовах и максимальной достижимой скорости на плаву в режиме полной мощности. В настоящее время фактически отсутствуют методики расчета движения РВД в воде, нацеленные на получение оптимальных водоходных качеств. М.Ю. Сандаков и М.Л. Мухина в своей работе изучают мореходность роторного движителя и возможность оптимизации корпуса транспортного средства для движения по воде. М.С. Крашенинников в своих исследованиях предлагает универсальную модель РВД, применимую при движении транспортного средства по любой опорной поверхности. В работе А.В. Согина и В.А. Шапкина в теории рассматривается движение ротора в воде, в том числе, в частично погруженном состоянии, выводятся аналитические зависимости тяги от геометрии, степени погружения и частоты вращения шнеков. Однако все эти работы исследуют либо конкретные модели, либо, напротив, описывают общие аналитические решения, чего недостаточно для разработки методики расчета и оптимизации водоходных параметров РВД. При этом все большее распространение получают роторно-винтовые машины с тандемной конструкцией движителей, в настоящее время слабоизученные.

Таким образом, во-первых, во многих сферах есть острая потребность в роторно-винтовых транспортных средствах (ТС), и, во-вторых, существует необходимость в разработке методики расчета рациональных параметров РВД для амфибийных ТС.

Для решения данных проблем была поставлена цель исследования, а именно: разработка методики расчета водоходных параметров РВД и выбор рационального сочетания геометрических параметров шнеков РВД с точки зрения требуемого соотношения водоходных и сухопутных характеристик в зависимости от назначения ТС.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- разработать методику расчета рациональных геометрических параметров полупогруженного РВД при работе на воде;
- провести структурный анализ силового взаимодействия элементов шнека РВД при взаимодействии с водой;
- провести анализ взаимодействия двух тандемно расположенных РВД при работе на воде;
- получить кривые действия шнеков типовых РВД снегоболотоходных амфибийных машин;
- разработать методику расчета и математическую модель для расчета параметров взаимодействия РВД со снегом и льдом;
- разработать методику расчета и выбор рациональных характеристик движителей снегоболотоходных роторно-винтовых амфибий при движении по воде, льду и снегу.

Анализ ранее выполненных исследований

В работе [1] сравниваются транспортные средства с различными движителями, а также приводятся преимущества ТС с РВД перед ТС с воздушной подушкой. В работах [2, 3] приводится история роторно-винтовых движителей, а также технические характеристики существующих роторно-винтовых машин различного назначения. В работах [4-6] рассматриваются современные проекты уже созданных и перспективных снегоболотоходных роторно-винтовых амфибий (СБРВА): от вездеходов для Арктики до поисково-спасательного робота. Работа [7] касается вопросов перспективы применения ТС с РВД в комплексе с авиацией для спасения людей в Арктических регионах. В работе [8] описана универсальная с точки зрения применимости математическая модель роторно-винтового движителя. В работе [9] описывается общий случай моделирования прямолинейного движения СБРВА. В работе [10] приведен расчет погружения РВД в снег, в работах [11, 12] – прочностной расчет в программном комплексе Ansys. В работе [13] исследуется мореходность транспортных средств с РВД посредством компьютерного моделирования, приведен статический расчет на воде. В работах [14-16] авторы проводят теоретические исследования движения роторно-винтовой машины в воде, в мелком битом и крупном битом льду, выход машины из полыньи на лед; разработаны методики расчета параметров движения СБРВА по этим опорным основаниям; однако не учитывается работа РВД в водо-воздушной среде при расчете сил трения, к примеру, а также сложная картина гидродинамики рабочей среды. Также в работе [15] определяются параметры, наиболее существенно влияющие на плавучесть, проходимость, тягу и т.д., а в работах [17, 18] проводится исследование зависимости скорости движения транспортного средства от угла наклона винтовой линии при эксплуатации на заболоченной местности.

На основании анализа литературных источников, цели и задач была определена следующая последовательность данного исследования:

- 1) изучение особенностей работы РВД снегоболотоходных машин на воде;
- 2) создание и верификация расчетной модели РВД на воде;
- 3) исследование и сравнительный анализ различных конструкций РВД при работе на воде;
- 4) расчет движения по снегу и льду выбранных моделей РВД;
- 5) определение эффективности СБРВА при движении по воде, снегу и льду;
- 6) создание методики расчета эффективности снегоболотоходных машин с РВД по воде, снегу и льду.

Анализ условий движения амфибийных роторно-винтовых машин

В результате анализа эксплуатации роторно-винтовых снегоболотоходных машин с учетом рациональности использования были выделены следующие типовые опорные поверхности: вода, шуга, битый лед в воде, чистый лед, заснеженный лед, неглубокий и глубокий снег, болото, ил, жидкая грязь, песок, мерзлые грунты, пересеченная местность. Данные виды опорных оснований встречаются в различных комбинациях, например, в регионах Арктики, Крайнего Севера, Урала и Сибири, в некоторых дальневосточных областях.

Необходимо отметить, что не все перечисленные опорные основания permanently присутствуют в типовых регионах эксплуатации; многие из них имеют сезонный характер. Поэтому было решено классифицировать выявленные опорные основания с учетом сезонности эксплуатации. Предлагаемый способ разделения представлен на рис. 1. Необходимо отдельно подчеркнуть, что предлагаемая схема классификации достаточно условна в сезонности; разумеется, есть несколько типов опорных оснований, которые встречаются в разные времена года практически в неизменном виде. Такие опорные основания были отнесены к какому-либо сезону, исходя из логических соображений и некоторых условных взаимосвязей этих оснований с другими. В других сезонах вышеуказанные спорные основания не отмечались, несмотря на их возможное наличие.

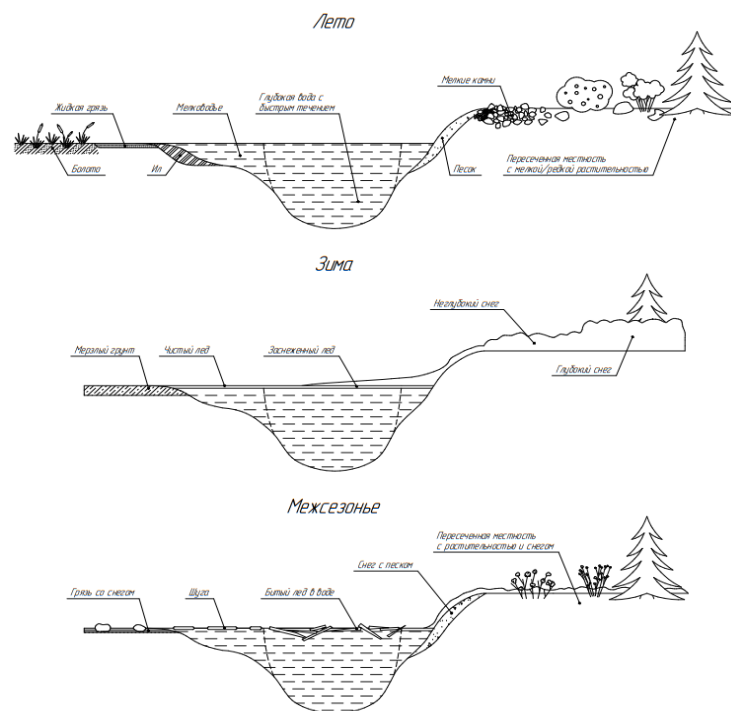


Рис. 1. Графическая иллюстрация типовых опорных оснований для движения амфибийных роторно-винтовых машин

Fig. 1. Graphical illustration of typical bearing surfaces for motion of amphibious rotary-screw vehicles

Согласно общему анализу поведения роторно-винтовых снегоболотоходных машин на различных основаниях, наиболее изученной является работа РВД на неглубоком и глубоком снегу, на льду, на болоте; наименее изученной – на воде, шуге, иле, на битом льду в воде.

Исследование движения снегоболотоходных роторно-винтовых амфибий по воде

При анализе водоходных свойств амфибийных машин с РВД принципиально важно учитывать ряд особенностей функционирования их движителей. Рассмотрим три характерных особенности работы РВД на воде. Первой из них является полупогруженный режим работы, так как на воде шнеки РВД не только обеспечивают тягу, но и в существенной мере формируют водоизмещение амфибии, в связи с чем из-за специфики конструкции в большинстве случаев они погружены в воду не полностью. В результате находящаяся над водой часть спирали шнека в создании тяги участия не принимает. Более того, погружаясь при вращении в воду, спирали шнека увлекают за собой воздух. Формируемая таким образом эмульсия имеет меньшую по сравнению с водой плотность, что изменяет условия работы и, следовательно, пропульсивные характеристики шнека.

Плотность эмульсии в этом случае должна определяться зависимостью:

$$\rho = k_{\text{аэр}}\rho_w, \quad (1)$$

где ρ_w – плотность воды, $k_{\text{аэр}}$ – коэффициент аэрации, определяющий степень насыщения воды воздухом.

Вторая отличительная особенность – это важность фактора взаимодействия с корпусом, так как, в отличие от других водоходных движителей, располагаемых за кормой или в тоннелях корпуса, шнеки РВД взаимодействуют с корпусом амфибии по всей длине. Это взаимодействие приводит к существенному возрастанию сопротивления корпуса и выступающих частей при работе движителя. В общем случае данный эффект учитывается коэффициентом засасывания. Руководствуясь многолетним опытом, при проектировании амфибийных машин с гребными винтами этот коэффициент принимают в диапазоне $t = 0,2 \dots 0,3$.

Третья важная отличительная черта РВД проявляется в наиболее распространенной в настоящее время тандемной конструкции. В этом случае по каждому борту расположено по два шнека с противоположным направлением навивки, вращающихся в разные стороны. При движении по грунтам со скоростью 5 км/ч и выше такая компоновка имеет ряд преимуществ перед двухроторной; угол поворота четырехроторных машин при таких условиях больше, чем у двухроторных, управляемость выше.

При работе на воде между шнеками борта возникает сложное взаимодействие. Особенно специфичны условия работы заднего шнека, работающего в кильватерном следе переднего. Набегающий на задний шнек поток ускорен и закручен в направлении, противоположном его вращению. Отличие продольной скорости натекающего на рабочий орган движителя потока от скорости движения транспортного средства принято учитывать коэффициентом попутного потока. Для большинства амфибийных машин с традиционными водоходными движителями коэффициент попутного потока лежит в диапазоне $w = 0,15 \dots 0,25$. Очевидно, что для задних шнеков тандемных РВД он может принимать отрицательные значения. Закрутку потока на входе в задний шнек можно рассматривать как частный случай неравномерности натекания и учитывать коэффициентом неравномерности, характеризующим изменение упора и момента рабочего органа движителя в возмущенном потоке. Известно, что значения коэффициента неравномерности для гусеничных и колесных амфибийных машин, оборудованных гребными винтами, находятся в диапазонах $i = 0,75 \dots 0,8$; его составляющих коэффициента неравномерности по моменту $i_Q = 1,15 \dots 1,3$, коэффициента неравномерности по упору $i_T = 0,9 \dots 0,97$. Сложность прогнозирования пропульсивных характеристик заднего шнека тандемного РВД обуславливается разнонаправленностью влияния поступательной и вращательной составляющих набегающего потока. Первая разгружает шнек, снижая тягу и момент сопротивления вращению. Вторая противодействует вращению, одновременно повышая тягу. Общая картина работы заднего шнека дополнительно усложняется аэрацией и возмущением свободной поверхности воды, вызванными работой переднего шнека.

В связи с этим разработку полноценной методики выбора рациональных параметров РВД необходимо разбить на несколько этапов. В данном исследовании решалась задача оценки эффективности РВД в первом приближении, а именно – в свободной воде без учета влияния корпуса. При моделировании решались уравнения Навье-Стокса, осредненные по Рейнольдсу (RANS) с использованием k - ε -модели турбулентности. Дискретная модель расчетной области содержит 3,2 млн ячеек типа «trimmer» (усеченные прямоугольные ячейки) с измельчением в зоне работы шнеков. Моделирование вращения шнеков обеспечено их размещением в цилиндрических подобластях, сопряженных с основной расчетной областью по принципу накладывающийся сетки «overset mesh».

Для оценки адекватности и точности полученных данных численная модель в данном случае была отработана и проверена на близком по топологии, работающем в аналогичных условиях гребном винте серии Трооста (табл. 1). Для верификации был выбран пятилопастной гребной винт с максимальным из серии дисковым отношением для более адекватного сравнения. Такой выбор обуславливается спецификой конструкции РВД, обладающего достаточно высоким дисковым отношением.

Таблица 1.

Параметры модели гребного винта

Table 1.

Parameters of propeller model

Параметр	Обозначение	Значение
Диаметр, мм	D	800
Количество лопастей, шт	z	5
Шаговое отношение	H/D	1,4
Ступичное отношение	d/D	0,325
Дисковое отношение	θ	1,05

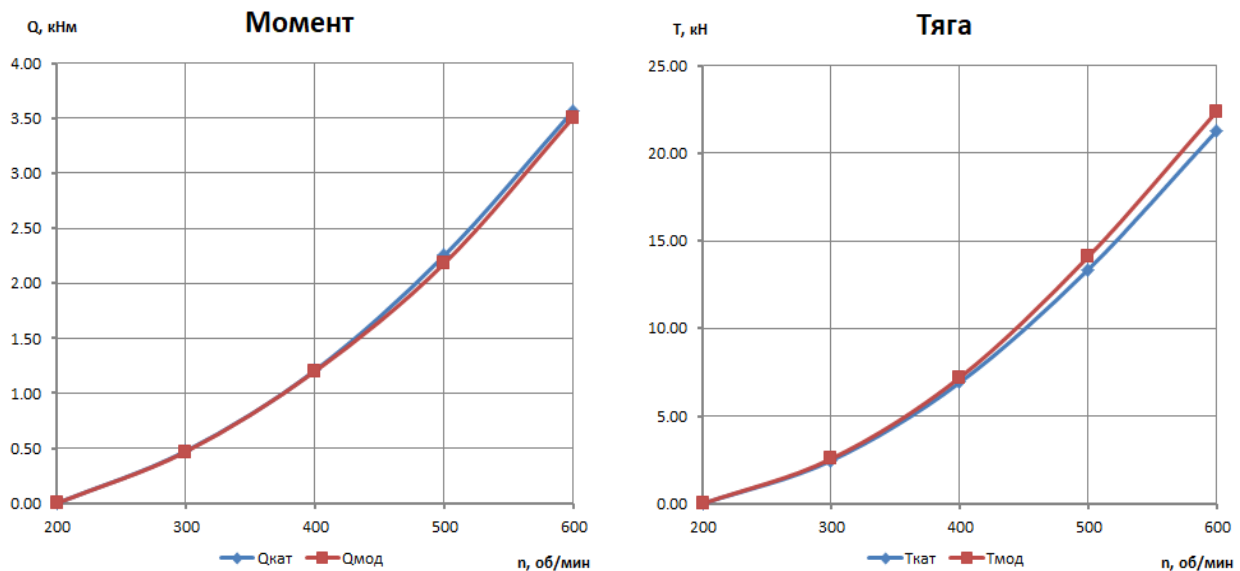


Рис. 2. Сравнение результатов численного моделирования с каталожными результатами модельных испытаний гребного винта в опытовом бассейне: момент (слева) и тяга (справа)

Fig. 2. Comparison of the results of computer simulation and the catalog results of model trials of propeller in experimental tank: torque (left) and thrust (right)

В результате численного эксперимента были получены зависимости тяги и момента винта в свободной воде при скорости потока 4 м/с в диапазоне частот вращения от 200 до 600 об/мин. Диаграммы на рис. 2 показывают, что максимальное расхождение значений тяги и момента, полученных при физическом и численном моделировании, отличаются не более чем на 5 и 2 % соответственно. Такая погрешность вполне приемлема для сравнительного анализа.

Таблица 2.

Параметры модели РВД

Table 2.

Parameters of RSP model

Параметр	Модель №1	Модель №2	Модель №3
D	800	800	800
z	3	3	3
H/D	1,4	1,8	2,5
d/D	0,8	0,8	0,8
θ	3,48	2,91	2,35
φ	24	30	39

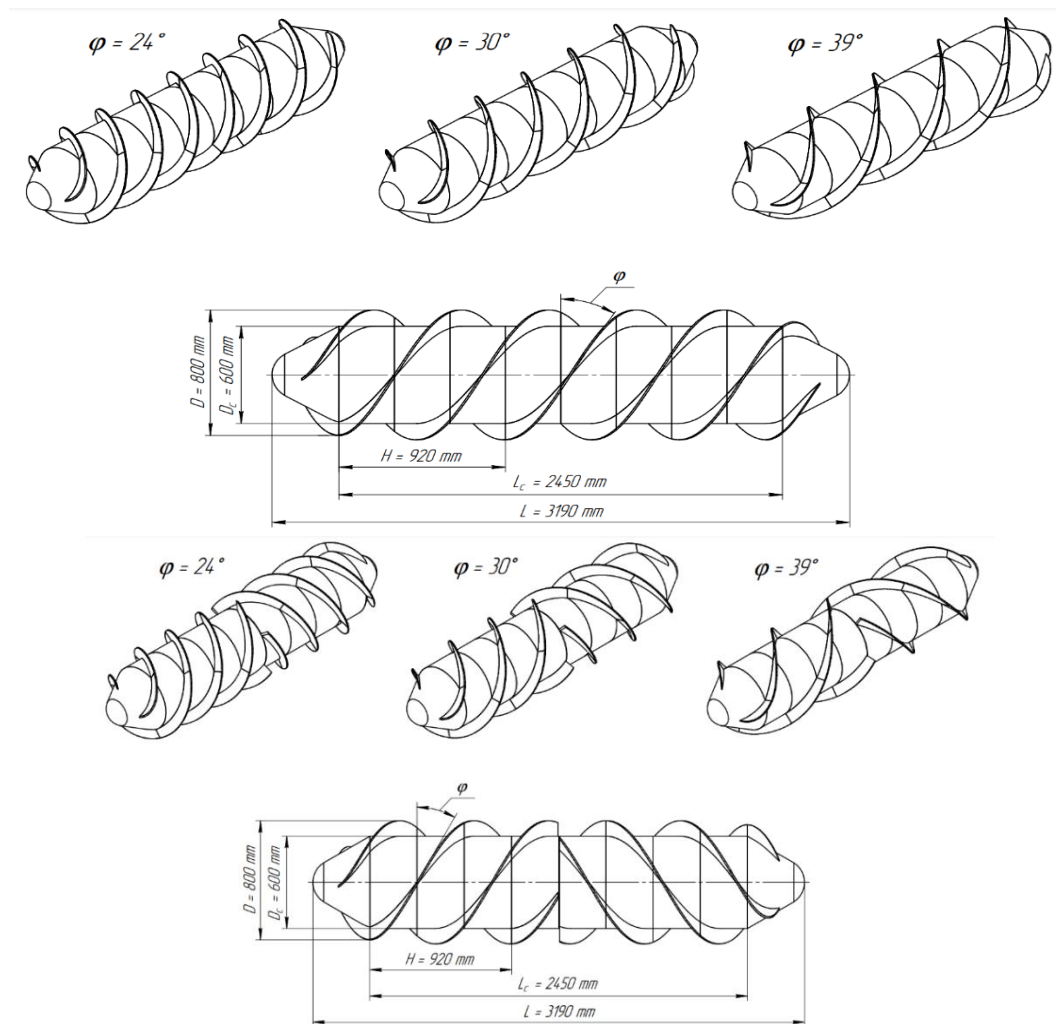


Рис. 3. Модели РВД одиночной и тандемной конструкции

Fig. 3. RSP models with single and tandem design

Параметры моделируемых РВД подбирались, исходя из результатов анализа существующих снегоболотоходных машин. Одним из основных факторов, определяющих динамические характеристики РВД на воде, является угол наклона винтовой линии φ . Данный параметр существенно влияет на упор и момент движителя, при постоянной угловой скорости эти характеристики возрастают по мере увеличения угла φ . Для первоначальной оценки эффективности РВД при работе на воде в полностью погруженном состоянии были созданы три модели одиночной и тандемной конструкции с крайними и средними значениями параметра φ (табл. 2, рис. 3). Численное моделирование для рассматриваемых вариантов конструктивного исполнения шнеков выполнялось для ходового режима ($v = 4$ м/с, $n = 200 \dots 1000$ об/мин) и швартовного режима ($n = 200 \dots 600$ об/мин). Оценка эффективности водоходных движителей и, соответственно, выбор оптимальных параметров в судостроении осуществляется при помощи кривых действия. Данные графики отражают построенные в относительных координатах зависимости безразмерных коэффициентов – коэффициента упора, коэффициента момента и пропульсивного коэффициента – от относительной поступи.

На рис. 4 приведено сравнение кривых действия шнеков РВД одиночной конструкции с различными углами наклона винтовой линии. На рис. 5 представлено сравнение кривых действия одиночного и тандемного роторно-винтовых движителей с различными углами наклона винтовой лопасти. У тандемного движителя с углом наклона 24° коэффициент упора выше, чем у одиночного, более чем в 2,5 раза; у тандемных движителей с углами 30 и 39° он больше в 3 раза. Коэффициент момента тандемного движителя с углом 24° больше, чем у одиночного, в 1,5 раза; с углом 30° – больше в 2 раза; с углом 39° – в 2,5 раза. Наиболее ярко характеризуют преимущества тандемной схемы представленные графики пропульсивного коэффициента. Тандемные движители в среднем в 1,5-2 раза эффективнее, чем соответствующие движители одиночной конструкции.

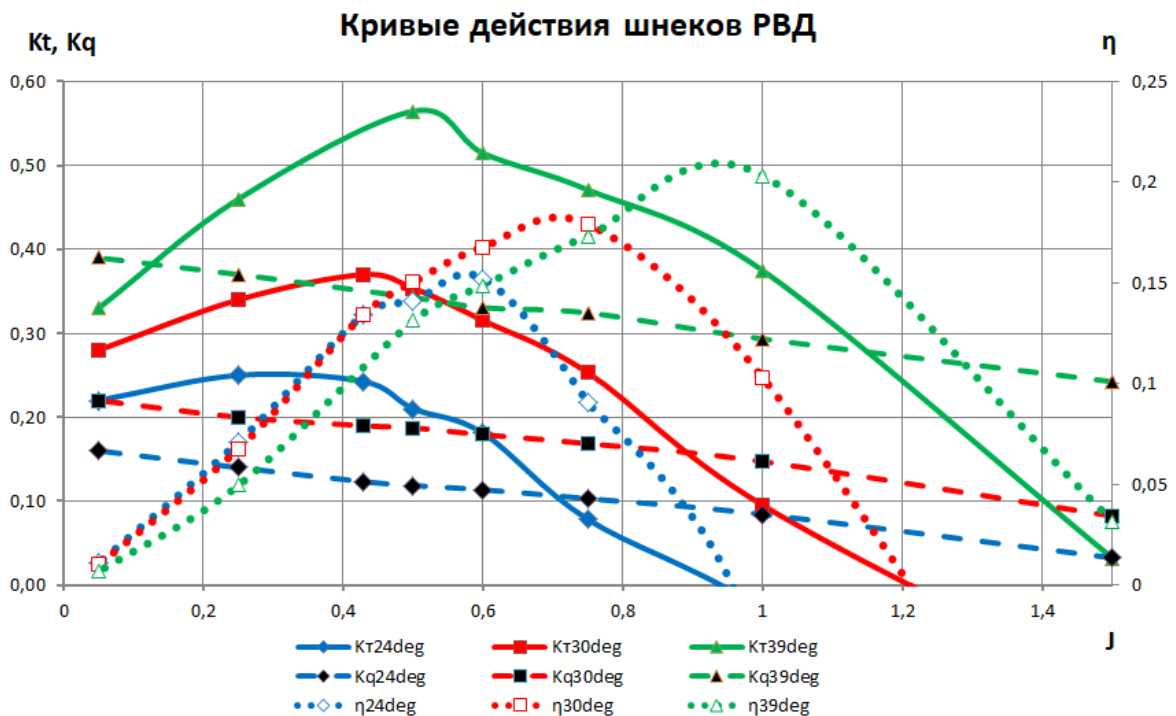


Рис. 4. Кривые действия

Fig. 4. Performance curves

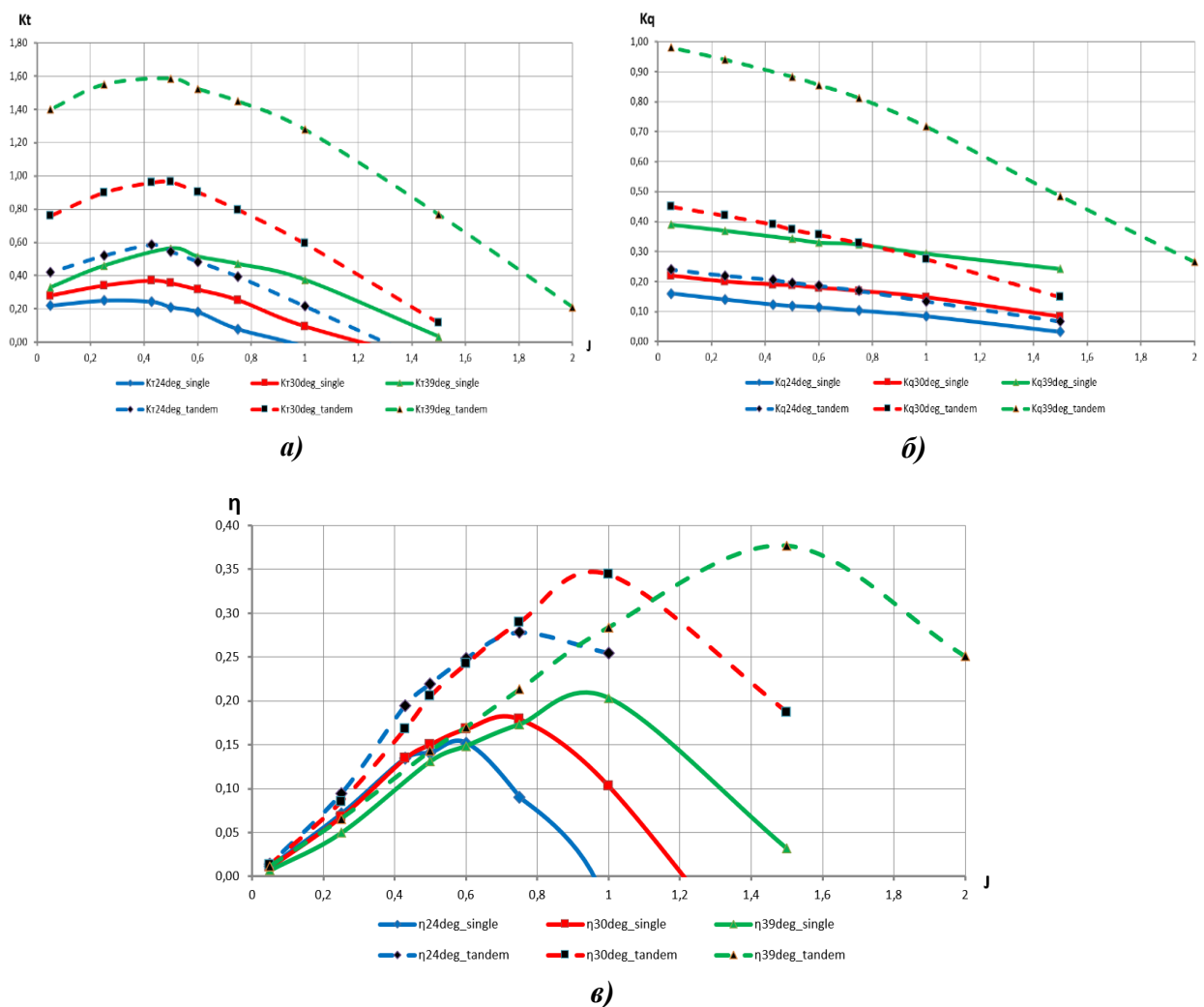


Рис. 5. Кривые действия РВД одиночной и тандемной конструкции:
 а) коэффициент упора; б) коэффициент момента; в) пропульсивный коэффициент

Fig. 5. Performance curves of RSP with single and tandem design:
 а) thrust coefficient; б) torque coefficient; в) propulsive coefficient

Таким образом, при сравнительном анализе видно, что коэффициенты упора и момента, а также пропульсивный коэффициент (т.е. КПД) движителей тандемного типа выше, чем движителей одиночного типа. Анализ картин визуализации результатов (рис. 6) численного моделирования гидродинамики шнеков подтвердил сложность характера их взаимодействия с водной средой, в частности показав существенную неравномерность распределения нагрузок по отдельным элементам. Для оценки вклада элементов шнека в создание полезной тяги и структуру затрат мощности на вращение шнека при движении по воде был проведен структурный анализ рассмотренных выше моделей РВД. В данной статье приведен пример структурного анализа для одиночного шнека.

Для получения возможности структурного анализа гидродинамического взаимодействия с водной средой поверхности моделей шнеков были разделены на элементы, на каждом из которых в процессе моделирования регистрировались осредненные значения тяги в продольном направлении и крутящего момента относительно оси вращения. В результате модели шнеков составлены из 8 участков винтовых линий, расположенных на базовом цилиндре шнека, – цилиндрических винтовых линий, 8 фрагментов самого базового цилиндра шнека, переднего и заднего обтекателя, 3 входных и 3 выходных элементов винтовых линий.

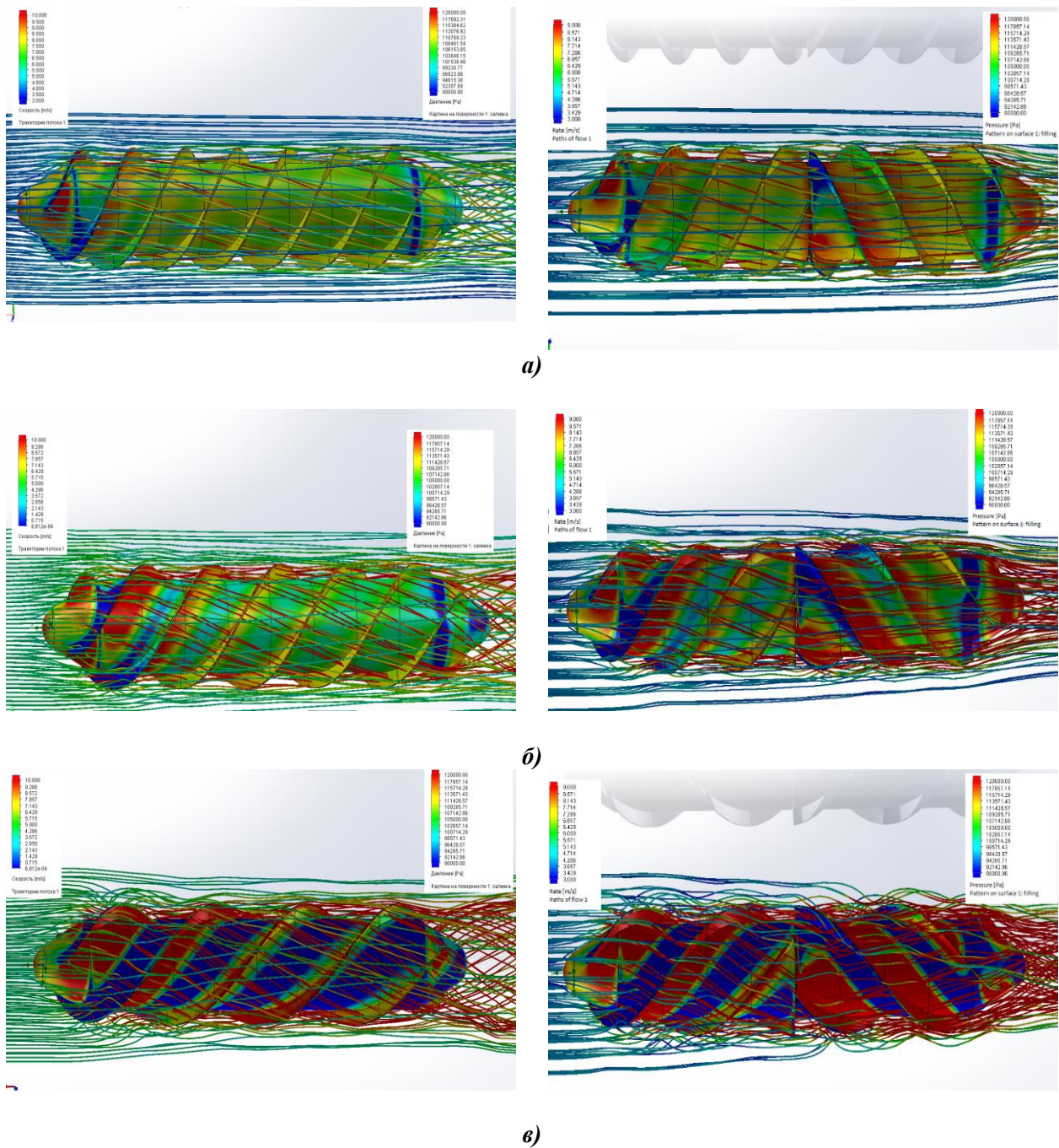


Рис. 6. Картины визуализации численного моделирования гидродинамики полностью погруженного шнека РВД одиночной (слева) и tandemной (справа) конструкции ($v=4$ м/с, $n=500$ об/мин):
а) угол наклона винтовой линии $\varphi=24^\circ$; б) угол наклона винтовой линии $\varphi=30^\circ$;
в) угол наклона винтовой линии $\varphi=39^\circ$

Fig. 6. Visualization patterns of computer simulation of hydrodynamics of full-submerged Archimedes screws of RSP with single (left) and tandem (right) design ($v=4$ m/sec, $n=500$ rpm):
a) helix angle $\varphi=24^\circ$; б) helix angle $\varphi=30^\circ$; в) helix angle $\varphi=39^\circ$

Поставленные задачи решались средствами численного моделирования при фиксированном значении скорости потока $v = 4$ м/с и переменных значений частоты вращения шнека в диапазоне $n = 200 \dots 700$ об/мин.

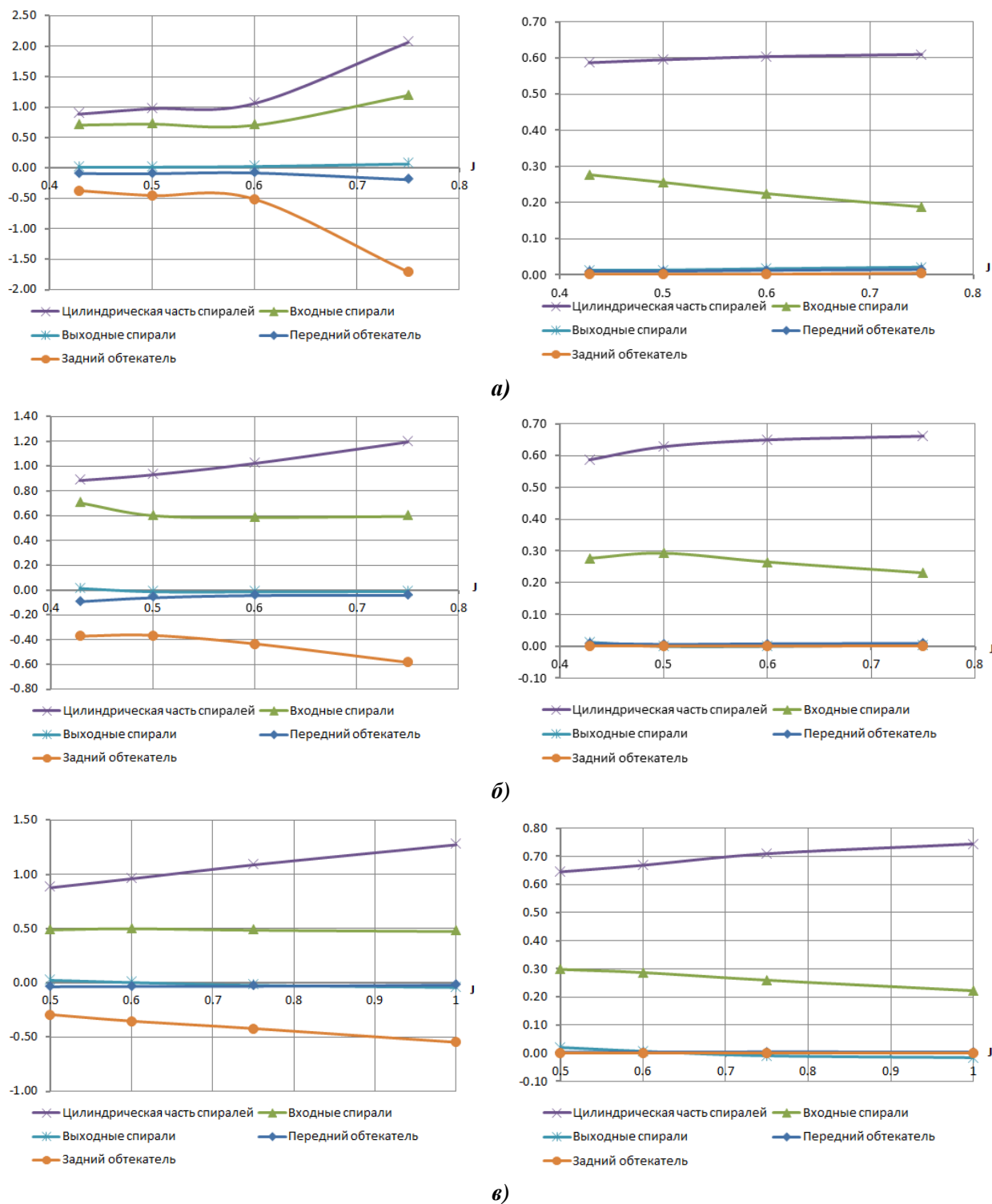


Рис. 7. Влияние относительной поступи на удельную тягу (слева) и удельный момент (справа) при фронтальном натекании потока на полностью погруженный шнек:
 а) угол наклона винтовой линии $\varphi=24^\circ$; б) угол наклона винтовой линии $\varphi=30^\circ$;
 в) угол наклона винтовой линии $\varphi=39^\circ$

Fig. 7. Influence of advance ratio on specific thrust (left) and specific torque (right) when water flow frontally approaching on full-submerged Archimedes screw:
 а) helix angle $\varphi=24^\circ$; б) helix angle $\varphi=30^\circ$; в) helix angle $\varphi=39^\circ$

На рис. 7 представлены зависимости тяги и момента на основных элементах, приведенных, соответственно, к тяге на шнеке целиком и подводимому к нему моменту от относительной поступи. Здесь отрицательные значения соответствуют ситуации, когда элемент создает сопротивление.

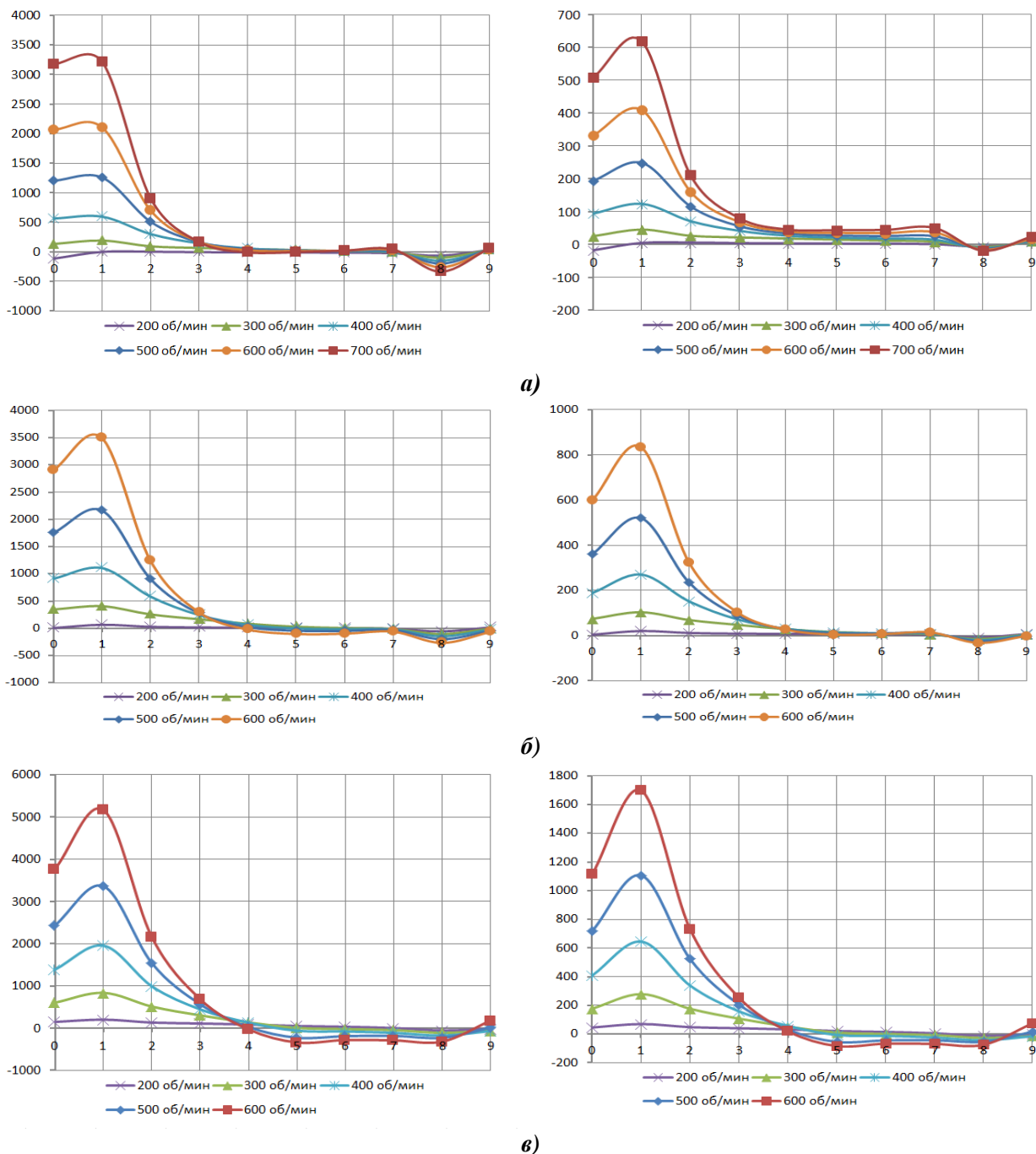


Рис. 8. Распределение тяги и момента по длине одной спирали шнека:
 а) угол наклона винтовой линии $\varphi=24^\circ$; б) угол наклона винтовой линии $\varphi=30^\circ$;
 в) угол наклона винтовой линии $\varphi=39^\circ$

Fig. 8. Thrust and torque distribution over the length of one helix of Archimedes screw:
 а) helix angle $\varphi=24^\circ$; б) helix angle $\varphi=30^\circ$; в) helix angle $\varphi=39^\circ$

Естественным образом основным элементом, формирующим тягу, является цилиндрическая часть винтовых линий шнека. Во всем диапазоне углов винтовых линий их тяга близка к совокупной тяге шнека. Вторым элементом, формирующим тягу, являются входные винтовые линии. На восходящей ветви КПД шнека их доля в общей тяге не зависит от поступи и варьируется в диапазоне 0,5...0,8 (меньшие значения соответствуют большим значениям угла наклона винтовой линии). Удельный момент лежит в пределах 0,2...0,3, снижаясь с увеличением относительной поступи. Основным фактором, снижающим гидродинамическую эффективность шнеков, является сопротивление заднего обтекателя, доля которого в совокупной тяге возрастает с уменьшением угла наклона винтовой линии и увеличением относительной поступи. Критический рост удельного сопротивления заднего обтекателя наблюдается на нисходящей ветви КПД шнека. Вклад этого элемента в затраты мощности на вращение шнека незначителен. Приведенные зависимости показывают, что остальные конструктивные элементы практически не оказывают влияние на общую эффективность полностью погруженного шнека во фронтально набегающем потоке.

Особый интерес представляют полученные результаты распределения тяги и момента по длине спиральной навивки шнеков (рис. 8). Для представления на диаграммах элементы винтовых линий пронумерованы от носа к корме (значения по оси абсцисс). Значения «0» и «9» соответствуют входному и выходному элементам винтовых линий. Зона эффективности ограничивается первыми четырьмя элементами винтовых линий, включая входной. Вклад остальных участков в тягу и затрачиваемую мощность незначителен, особенно на высоких оборотах (при малых значениях относительной поступи). Интересен также выявленный эффект перехода части винтовых линий (элементы 5...8) в «турбинный режим», наблюдающийся при больших углах навивки (39°).

По результатам исследования можно сделать следующие основные выводы: тягу формируют в основном входные и цилиндрические элементы винтовых линий шнека, а основное негативное влияние на совокупную тягу шнека оказывает сопротивление заднего обтекателя; подводимая мощность и эффективная тяга практически реализуются только на входном участке винтовых линий и на передней части цилиндрических винтовых линий; существенная доля входных элементов спиралей в формировании тяги шнеков в сочетании с их высокой гидродинамической эффективностью свидетельствует о необходимости особого отношения к обработке конструкции этих элементов при проектировании.

На основании принятого порядка проведения расчетов далее необходимо представить математические модели расчета сил сопротивления и мощности, затрачиваемых при движении РВД по льду и снегу. В рамках настоящей статьи такие модели не рассматриваются. Но с учетом того, что данные значения могут быть рассчитаны, приведем методику оценки эффективности снегоболотоходных роторно-винтовых амфибий при движении по воде, льду и снегу.

Методика расчета эффективности снегоболотоходных роторно-винтовых амфибий при движении по воде, льду и снегу

В общем виде эффективность снегоболотоходных роторно-винтовых амфибий может быть выражена зависимостью:

$$E = k_w P_w + k_s P_s, \quad (2)$$

где k_w и k_s – влияние параметров, оценивающих эффективность для РВД при движении по воде, снегу и льду соответственно; P_w и P_s значения эффективности для воды, снега и льда.

Выбор критериев осуществляется с точки зрения подвижности транспортного средства, определяющей иерархию и структуру задач управления [19, 20]. Таким образом, в соответствии с формулой (1) и структурой, предложенной В.В. Беляковым, можно представить следующую иерархию значений коэффициентов влияния параметров, оценивающих эффективность для РВД при движении по грунту и воде:

- 1) *влияние скорости движения* (в зависимости от конечной цели можно оценивать скорость, время или путь на исследуемых участках, причем рассматриваемые величины должны быть относительны (E_V));
- 2) *задача управления курсовой подвижностью* (оценивается параметрами, характеризующими изменение курса РВД (E_ρ));
- 3) *задача поддержания подвижности* (содержит следующие параметры: управление курсовой ориентацией, управление скоростью движения, управление критическими ситуациями, поддержание подвижности по живучести (эксплуатационная живучесть, отказная живучесть) ($E_{\Delta P}$));
- 4) *задача предотвращения и устранения критических ситуаций* (т.н. динамическая адаптивная подвижность, включающая следующие системы: управление системами ТС на режимах торможения и разгона; контроль курсовой и траекторной устойчивости; управление распределением крутящего момента по двигателям; управление подвеской автомобиля; системы поддержания проходимости, в том числе системы повышения подвижности (E_{KC}));
- 5) *основная задача*, включающая все предыдущие, а именно, обеспечение устойчивого и безопасного движения, в данном случае – аналог эффективности движения РВД ($E_{РВД}$).

В соответствии с принятой структурой и иерархией, расчет эффективности РВД может быть проведен по следующей зависимости:

$$E_{РВД} = E_{Vg} E_{\rho w} E_{\Delta P w} E_{KCw} + E_{Vs} E_{\rho s} E_{\Delta P s} E_{KCs}, \quad (3)$$

или:

$$E_{РВД} = k_{KCwV} k_{wV} \bar{V}_w k_{KCw\rho} k_{w\rho} \bar{\rho}_w k_{KCw\Delta P} k_{w\Delta P} \bar{\Delta P}_w + k_{KCsV} k_{sV} \bar{V}_s k_{KCs\rho} k_{s\rho} \bar{\rho}_s k_{KCs\Delta P} k_{s\Delta P} \bar{\Delta P}_s. \quad (4)$$

где $E_V = k_V \bar{V}$ – эффективность по скорости, \bar{V} – нормированная скорость, $E_\rho = k_\rho \bar{\rho}$ – эффективность по управляемости, $\bar{\rho}$ – нормированная кривизна, $E_{\Delta P} = k_{\Delta P} \bar{\Delta P}$ – эффективность по запасу силы тяги, ΔP – нормированный запас силы тяги, $E_{KC} = k_{KCV} k_{KC\rho} k_{KC\Delta P}$ – эффективность с позиции устранения критических ситуаций и применения средств повышения подвижности, k_{KCV} , $k_{KC\rho}$, $k_{KC\Delta P}$ – коэффициенты, характеризующие рост скорости движения, увеличение курсовой ориентации, увеличение показателя подвижности при использовании системы устранения критических ситуаций. В формулах (3) и (4) индексы «w» и «s» означают движение по воде, снегу и льду соответственно.

Методика расчета эффективности снегоболотоходных роторно-винтовых амфибий при движении по воде, льду и снегу при движении по грунту и воде представлена на рис. 9.

Выводы

Разработана методика расчета эффективности амфибийных снегоболотоходных машин с РВД, включающая в себя совокупность взаимодополняющих критериев и строгую иерархию в соответствии с теорией подвижности В.В. Белякова. Эффективность по скорости движения находится на самом нижнем уровне иерархии, эффективность по курсовой ориентации включает в себя эффективность по скорости, эффективность по поддержанию подвижности включает в себя эффективность по курсовой ориентации, эффективность по устранению критических ситуаций является дополняющей к эффективным по скорости, курсовой ориентации и поддержанию подвижности. В целом эффективность снегоболотоходной амфибийной машины с РВД рассчитывается по формулам (3) и (4) (рис. 9).

Проведен анализ условий движения амфибийных роторно-винтовых машин. Показано, что на пути следования амфибийных машин с РВД встречаются: вода, шуга, битый лед в воде, чистый лед, заснеженный лед, неглубокий и глубокий снег, болото, ил, жидкая грязь, песок, мерзлые грунты, пересеченная местность, а также данные виды опорных оснований в различных комбинациях.

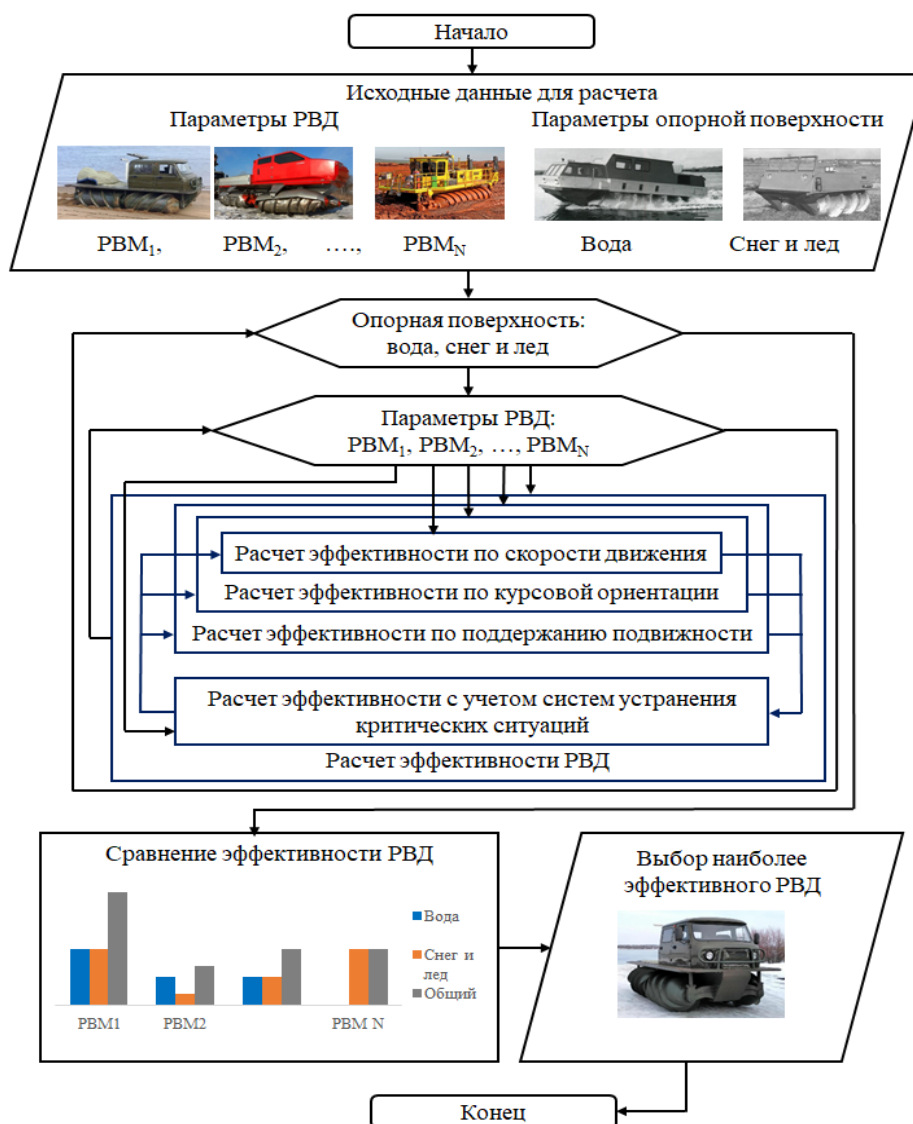


Рис. 9. Блок-схема методики расчета эффективности амфибийных машин с РВД

Fig. 9. Flow chart of calculation procedure of efficiency of amphibious vehicles with RSP

Более детально решена задача оценки эффективности РВД в свободной воде без учета влияния корпуса. Проведены расчеты для одиночного и tandemного роторно-винтовых движителей с различными углами наклона винтовой лопасти. Tandemные движители в среднем в 1,5-2 раза эффективнее, чем соответствующие движители одиночной конструкции.

Библиографический список

1. **Котляренко, В.И.** Анализ различных показателей транспортных средств для организации всепогодных транспортных перевозок в условиях Севера / В.И. Котляренко, Л.В. Барахтанов // Исследования, конструкции, технологии. 2015. № 6 (95). С. 64-67.
2. **Данилов, Р.Г.** Развитие конструкции роторно-винтовых движителей для транспортных и технологических машин / Р.Г. Данилов // Строительные и дорожные машины. 2015. №1. С. 53-58.
3. **Колотилин, В.Е.** Статистическая модель выбора геометрических параметров, массово-инерционных и мощностных характеристик транспортно-технологических машин на роторно-винтовых движителях / В.Е. Колотилин, А.В. Михеев, П.О. Береснев, А.М. Беляев, А.В. Папунин, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков, А.А. Куркин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 3 (110). С. 156-208.

4. **Кошурина, А.А.** Вектор развития современного вездеходного транспорта для Арктики / А.А. Кошурина // Арктика: история и современность; Труды Второй международной научной конференции. - Санкт-Петербург: ООО «Медиапапир», 2017. С. 210-217.
5. **Кошурина, А.А.** Поисково-спасательный робот для работы в шахтах / А.А. Кошурина, В.Е. Гай, Р.А. Дорофеев [и др.] // Робототехника и техническая кибернетика. 2017. № 4 (17). С. 57-61.
6. **Крашенинников, М.С.** Универсальное коллективное спасательное средство с роторно-винтовым двигателем / М.С. Крашенинников, А.А. Кошурина, А.В. Шмелев // Актуальные вопросы машиноведения. 2013. № 2. С. 77-80.
7. **Лопота, А.В.** Концептуальные вопросы разработки роботизированных систем для поиска и спасения людей, терпящих бедствие, в условиях Арктики / А.В. Лопота, П.К. Шубин // Робототехника и техническая кибернетика. 2018. № 1 (18). С. 3-9.
8. **Крашенинников, М.С.** Математическая модель роторно-винтового двигателя / М.С. Крашенинников // Интернет-журнал «Науковедение». Том 8. 2016. №4.
9. **Наумов, В.Н.** Моделирование прямолинейного движения транспортно-технологического средства с роторно-винтовым двигателем / В.Н. Наумов, К.Ю. Машков, К.Е. Бяков // Известия вузов. 2013. № 12. С. 31-35.
10. **Крашенинников, М.С.** Расчет погружения роторно-винтового двигателя в снег / М.С. Крашенинников, Л.В. Барахтанов // Интернет-журнал «Науковедение». Том 9. 2017. №5.
11. **Липин А.А.** Расчет напряженно-деформированного состояния системы «шнек-грунт» с использованием пакета Ansys / А.А. Липин, В.А. Шапкин, У.Ш. Вахидов [и др.] // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2016. № 3 (71). С. 14-15
12. **Липин А.А.** Статистический прочностной расчет системы «шнек-грунт» / А.А. Липин, А.Д. Стрижак // Наука сегодня: глобальные вызовы и механизмы развития; Материалы международной научно-практической конференции: в 2-х частях. – Вологда: ООО «Маркер», 2017. С. 17-19.
13. **Сандаков, М.Ю.** Оценка мореходности роторно-винтового транспортного средства на ранних стадиях проектирования / М.Ю. Сандаков, М.Л. Мухина // Транспортные системы. 2017. № 1 (4). С. 34-38.
14. **Дonato, И.О.** Роторно-винтовые машины. Основы теории движения / И.О. Донато, В.А. Жук, Б.В. Кузнецов, А.П. Куляшов, В.А. Шапкин, Ю.В. Щербаков. – Н. Новгород, 2000. – 451 с.
15. **Вахидов, У.Ш.** Автоматизированный подход к проектированию транспортно-технологических машин с роторно-винтовым двигателем / У.Ш. Вахидов, А.В. Согин, В.А. Шапкин, Ю.В. Шапкина, А.А. Липин // Транспортные системы. 2016. № 1. С. 17-23.
16. **Согин, А.В.** Исследование движения роторно-винтовой машины (РВМ) по воде / А.В. Согин, В.А. Шапкин // Известия вузов. Машиностроение. 2006. №5. С. 54-64.
17. **Стрижак, А.Д.** Выбор рациональных параметров роторно-винтового двигателя (РВД) транспортно-технологического средства по заболоченной местности / А.Д. Стрижак, А.А. Липин // Наука сегодня: глобальные вызовы и механизмы развития; Материалы международной научно-практической конференции: в 2-х частях. Научный центр «Диспут». – Вологда: ООО «Маркер», 2017. С. 41-42.
18. **Стрижак, А.Д.** Исследование прямолинейного движения транспортно-технологического средства, оснащенного роторно-винтовым двигателем, по заболоченной местности / А.Д. Стрижак, А.А. Липин, А.В. Вишняков // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Том 22. № 3. С. 55-62.
19. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, М.Е. Бушуева, У.Ш. Вахидов, К.О. Гончаров, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, К.Я. Лелиовский, В.С. Макаров, А.В. Папунин, А.В. Тумасов, А.В. Федоренко // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 3 (100). С. 145-175.
20. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4. С. 72-77.

*Дата поступления
в редакцию: 30.07.2022*

*Дата принятия
к публикации: 10.11.2022*

УДК 629.33

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_113

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ПОДВОДИМОЙ МОЩНОСТИ К КОЛЕСАМ ПЛАНЕТОХОДА
ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ
С ОГРАНИЧЕНИЕМ СВОБОДНОЙ ТЯГИ ДВИЖИТЕЛЯ**

Чжэн Хуайюй

ORCID: 0000-0003-0451-516X e-mail: zhypro@yandex.ru

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

Г.О. Котиев

ORCID: 0000-0001-7884-157X e-mail: kotievgo@yandex.ru

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

Б.Б. Косицын

ORCID: 0000-0002-2131-2738 e-mail: kositsyn_b@bmstu.ru

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

Р.Л. Газизуллин

ORCID: 0000-0002-4022-9286 e-mail: rlgazizullin@bmstu.ru

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

Целью исследования является повышение энергоэффективности планетохода с индивидуальным приводом ведущих колес путем применения оптимального закона распределения подводимой мощности к движителю. Для минимизации энергетических затрат планетохода при прямолинейном движении решена задача оптимизации: определены коэффициенты буксования каждого колеса планетохода, при которых реализуется минимальное значение коэффициента удельных мощностных потерь с учетом ограничения на требуемую тяговую силу. Решение указанной задачи оптимизации осуществлено с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа.

Математически обосновано, что для обеспечения максимальной энергоэффективности транспортного средства коэффициенты буксования колес должны быть разными в случае различных характеристик взаимодействия движителя с грунтом. Установлено, что обеспечение равенства скольжения ведущих колес не всегда является оптимальным законом распределения мощности между ведущими колесами машины.

Ключевые слова: планетоход, закон распределения мощности, оптимизация, коэффициент буксования, заблокированный привод, математическая модель, неопределенный множитель Лагранжа.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чжэн, Х. Энергоэффективное распределение подводимой мощности к колесам планетохода при прямолинейном движении с ограничением свободной тяги движителя / Чжэн Хуайюй, Г.О. Котиев, Б.Б. Косицын, Р.Л. Газизуллин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 113-123.
DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_113

ENERGY EFFICIENT DISTRIBUTION OF POWER DELIVERED TO PLANETARY ROVER WHEELS AT STRAIGHT-LINE MOTION WITH LIMITED FREE THRUST OF ITS PROPULSION UNIT

Zheng H.

ORCID: **0000-0003-0451-516X** e-mail: **zhypro@yandex.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

G.O. Kotiev

ORCID: **0000-0001-7884-157X** e-mail: **kotievgo@yandex.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

B.B. Kositsyn

ORCID: **0000-0002-2131-2738** e-mail: **kositsyn_b@bmstu.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

R.L. Gazizullin

ORCID: **0000-0002-4022-9286** e-mail: **rlgazizullin@bmstu.ru**
Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. The purpose of the study is to improve energy efficiency of planetary rover with independent actuator of the traction wheels with the help of optimum law for distribution of power delivered to the propulsion unit. To minimize power consumption, the authors found slip ratios of each rover wheel at which a minimal value of specific power loss ratio adjusted for the limitation of a required tractive force is reached. The specified optimization problem is solved with the help of Lagrange's method of undetermined multipliers. The energy effectiveness and lunar rover maneuverability can be increased using the formulated controlled power distribution law. It is mathematically evidenced that a maximum energy efficiency of the vehicle can be achieved by different slop ratios of the wheels at various characteristics of interaction between the propulsion unit and ground. Slip symmetry is not a universally applicable law for power distribution between the traction wheels of a vehicle.

Key words: planetary rover, power distribution law, optimization, slip ratio, blocked actuator, mathematical model, Lagrange's undetermined multiplier.

FOR CITATION: Zheng H., G.O. Kotiev, B.B. Kositsyn, R.L. Gazizullin. Energy efficient distribution of power delivered to planetary rover wheels at straight-line motion with limited free thrust of its propulsion unit. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. Pp. 113-123. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_113

Введение

Планетоходы играют крайне важную роль в исследованиях и освоении космического пространства. Проходимость и энергоэффективность планетохода являются ключевыми свойствами для успешного выполнения подобных задач. От первой посадки Лунохода-1 до китайского *Юйму*, осуществляющего исследовательскую деятельность на Луне, значительный практический опыт показал, что методы решения задач обеспечения проходимости и энергоэффективности на этапе проектирования актуальны и требуют дальнейшего развития [1,2]. В конструкциях транспортных средств для изучения планет трансмиссия в большинстве случаев организована по принципу индивидуального привода двигателей. Гибкая форма такой схемы трансмиссии позволяет без использования сложных систем механического

привода обеспечить широкие возможности по рациональному распределению мощности по колесам. В планетоходе с индивидуальным приводом обеспечивается возможность управлять каждым колесом по отдельности в зависимости от фактических требований к режиму движения, не ограничиваясь связями, накладываемыми жесткой трансмиссией. Это позволяет избежать проблемы чрезмерного проскальзывания (буксования) колес, которое зачастую сопровождается экскавацией грунта, колееобразованием, ростом бульдозерного сопротивления и таким образом приводит к снижению или потере проходимости, что выражается в снижении скорости движения (остановке) и резком увеличении потребления энергии. В указанном направлении известно множество исследований, целью которых является повышение энергоэффективности движения колесных транспортных средств.

Совершенствование трансмиссий колесных машин базируется на нескольких основных идеях. На ранних этапах подобных исследований внимание было сосредоточено на балансе выходных крутящих моментов отдельных колес. Известно, что несбалансированные выходные крутящие моменты колес могут привести к генерации паразитной мощности (циркуляции мощности) и, следовательно, к снижению энергоэффективности [3]. Это означает, что, согласно принятому положению, вращающий момент основного двигателя должен распределяться по колесам равномерно, т.е. должна быть реализована дифференциальная схема трансмиссии. Другая идея базируется на согласованности угловых скоростей всех колес транспортного средства и заключается в предположении, что минимизация мощности проскальзывания обеспечивается, если все колеса имеют одинаковую скорость скольжения относительно опорного основания. Для случая прямолинейного движения это означает, что должна быть реализована блокированная схема трансмиссии [4]. Необходимо отметить, что в этом случае коэффициенты скольжения фактически будут одинаковы для каждого колеса. Указанное утверждение подтверждено математически путем решения задачи оптимизации обеспечения максимума «эффективности проскальзывания» η [5,6]:

$$\eta = 1 - \frac{i_i(1 - i_r) - (i_f - i_r)\alpha}{(1 - i_i) - (i_f - i_r)\alpha}, \quad (1)$$

где α – коэффициент распределения нагрузки $\alpha = \frac{F_r}{F_r + F_f}$; i_f, i_r – коэффициенты буксования колес передней и задней оси.

Анализ параметров движителя транспортного средства с колесной формулой 8x8 показал, что наибольшая эффективность достигается, когда все коэффициенты проскальзывания колес одинаковы. Полученный таким образом закон управления был исследован на модели динамики транспортного средства с использованием для оценки скорости машины «пятого» колеса. Его эффективность была подтверждена с помощью натурального эксперимента на беспилотном наземном транспортном средстве с колесной формулой 4x4 и индивидуальным приводом ведущих колес [7,8].

Для минимизации работы трения скольжения колеса также может применяться метод множителей Лагранжа и целевая функция вида:

$$W = \sum_{i=1}^n Q_i V_i^i + \sum_{j=1}^l \lambda^j \Phi^j, \quad (2)$$

где V_i^i – скорость буксования; Q_i – сила трения; λ^j – множитель Лагранжа; Φ^j – функции ограничения.

В результате минимизации указанной целевой функции получен вывод: мощность основного привода должна распределяться в соответствии с нормальной нагрузкой, действующей на колесо [9]. Исследование указанного закона при помощи математического моделирования показало перспективность данного подхода для повышения проходимости и энергоэффективности транспортного средства [10]. К аналогичным выводам пришли авторы ра-

бот [11-13], распределяя подводимые к колесам моменты пропорционально приходящейся нормальной нагрузке.

Известны работы, в которых для минимизации потерь энергии на скольжение предлагается использовать сумму квадратов коэффициентов потерь энергии:

$$J = \sum_i \frac{(\lambda'_i F_{xi})^2 + (\lambda'_i F_{yi} \tan \beta_i)^2}{(\mu_i F_{zi})^2}, \quad (3)$$

где λ'_i – коэффициент скольжения; $\mu_i F_{zi} \geq \sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2}$, и β_i – угол бокового скольжения шины. Полученное таким образом решение для распределения вращающих моментов по колесам было проверено на экспериментальном макете, в результате чего установлено преимущество данного подхода [14].

I. Математическая модель планетохода

Для сравнительной оценки наиболее распространенных законов распределения потоков мощности по колесам планетохода предлагается использовать математическую модель плоского прямолинейного движения в условиях стенда «Грунтовой канал», когда линейная скорость планетохода является известной. Тогда уравнение динамики планетохода в соответствии с расчетной схемой (рис. 1) будет иметь вид:

$$m\dot{V} = \sum_i^n R_{xi} - mg \sin \alpha, \quad (4)$$

где $n = 4$ – число колес планетохода, m – полная масса планетохода; \dot{V} – ускорение центра масс планетохода; R_{xi} – продольная реакция в пятне контакта i -го колеса планетохода с опорной поверхностью; α – угол наклона опорной поверхности, g – ускорение свободного падения.

Уравнение динамики каждого колеса планетохода имеет вид:

$$J_k \dot{\omega}_{ki} = M_{ki} - M_{fi} - R_{xi} r_{0i} = M_{ki} - (fR_{zi} + R_{xi}) r_{0i}, \quad (5)$$

где M_{ki} – вращающий момент на i -ом колесе; J_k – момент инерции колеса; $\dot{\omega}_{ki}$ – угловое ускорение i -ого колеса; f – коэффициент сопротивления качению; r_0 – радиус качения колеса в свободном режиме; M_{fi} – момент сопротивления качению i -ого колеса в свободном режиме.

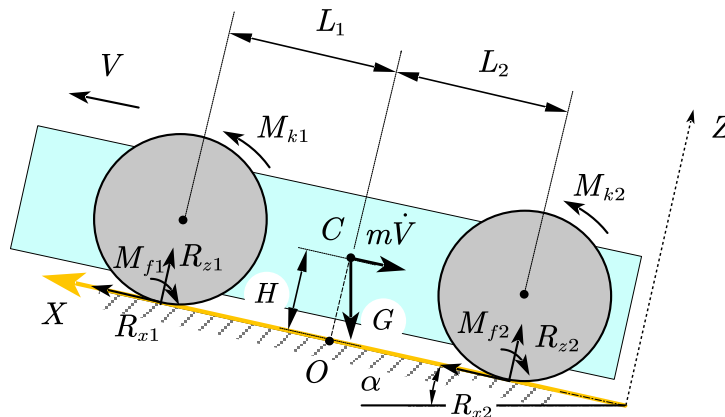


Рис. 1. Расчетная схема движения планетохода

Fig. 1. Computational pattern of the rover motion

В процессе движения планетохода происходит перераспределение нормальных реакций между колесами. Для определения их величин используются следующие уравнения.

Уравнение равновесия планетохода в проекции на ось z :

$$\sum_{i=1}^n R_{zi} = mg \cos(\alpha) \quad (6)$$

где R_{zi} – нормальная реакция в пятне контакта i -го колеса.

Сумма моментов, действующих на планетоход, относительно точки O – проекции центра масс на линию опорной поверхности (рис. 1):

$$\sum_{i=1}^n R_{zi} L_i + m\dot{V}H + mg \sin(\alpha)H + \sum_{i=1}^n M_{fi} = 0 \quad (7)$$

где H – высота центра масс.

Принимая допущение, что система симметрична относительно продольной оси, на основании представленных уравнений можно определить значения нормальных реакций передних и задних колес. При этом в ходе решения уравнений динамики необходимое значение ускорения \dot{V} используется с предыдущего шага моделирования движения планетохода.

Механические характеристики мотора каждого колеса описываются в соответствии со следующей системой уравнений:

$$N_i = N_{\max} \cdot h_i$$

$$M_k = \begin{cases} N_i / \omega & M_k \cdot \omega > N_i \\ h_i \cdot M_{k\max} & M_k \cdot \omega \leq N_i \end{cases} \quad (8)$$

где N_{\max} – максимальная выходная мощность мотора; ω – угловая скорость мотора; h_i – сигналы «газа», изменяющиеся от 0 до 1, соответствующие различным уровням выходной мощности; $M_{k\max}$ – максимальный выходной крутящий момент.

Для реализации законов распределения мощности необходимо обеспечить поддержание расчетных значений буксования каждого колеса. Для этого используется принцип управления по обратной связи, а также ПИД регуляторы (рис. 2).

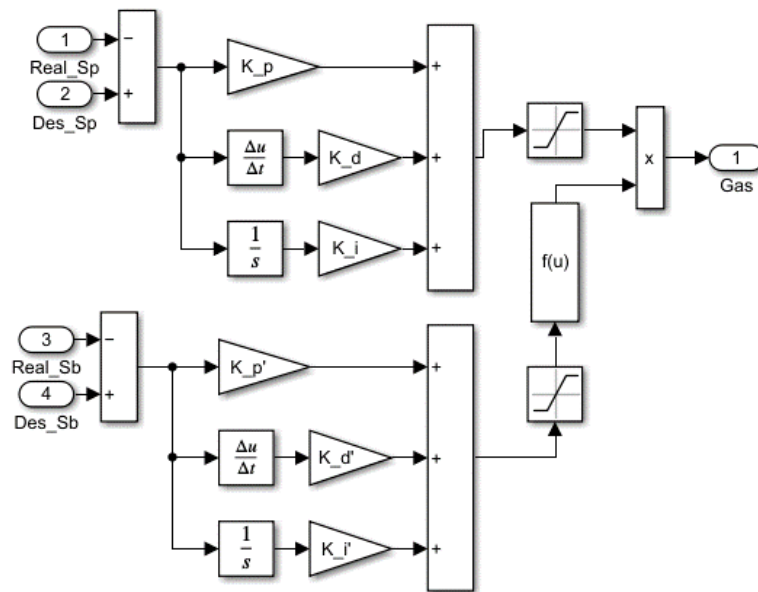


Рис. 2. Схема алгоритма управления газом

Fig. 2. Throttle control flow chart

В процессе виртуального эксперимента должно обеспечиваться поддержание заданной скорости движения планетохода, при этом коэффициенты проскальзывания каждого колеса должны соответствовать расчетным значениям в соответствии с заданным (исследуемым) законом. В связи с этим в математической модели используются два ПИД-регулятора для регулирования скорости и коэффициентов проскальзывания колес. Управляющий сигнал для скорости ограничивается выходом $0 - 1$, а сигнал управления скольжением ограничивается выходными значениями от -1 до $+1$. Два управляющих сигнала объединяются с учетом следующего соотношения:

$$h_i = p(V) \cdot (1 + q(S_b)) \cdot 0.5, \quad (9)$$

где $p(V)$ – сигнал управления скоростью, $p(V) \in [0, 1]$; $q(S_b)$ – сигнал управления скольжением, $q(S_b) \in [-1, +1]$.

Описание взаимодействия колеса с опорной поверхностью основано на использовании интегральных тягово-сцепных и тягово-энергетических характеристик [15], которые зависят от проскальзывания (буксования) движителя:

$$S_\sigma = \frac{\omega r_0 - V}{\max(\omega r_0, V)}, \quad (10)$$

Так, значение продольной силы может быть определено из соотношения:

$$\varphi = \frac{P_x}{P_z}, \quad (11)$$

При этом известно, что зависимость коэффициента взаимодействия между колесом и опорной поверхностью от буксования может быть описана нелинейной функцией вида [16]:

$$\varphi = \varphi_{\max} \left(1 - e^{-\frac{S_\sigma}{S_0}} \right), \quad (12)$$

где φ_{\max} , S_0 – эмпирические коэффициенты, зависящие от физико-механических свойств опорного основания и параметров колесного движителя, которые могут быть определены на стенде «Грунтовой канал» [17,18].

II. Вычислительный алгоритм

Алгоритм вычислений представлен на рис. 3. При подаче сигнала «газа» в модуле динамики колес (Rear_Wheel_Dynamic | Front_Wheel_Dynamic) рассчитывается текущая мощность и момент двигателя при известной частоте вращения колес. Далее при помощи блока взаимодействия колеса с опорной поверхностью определяется коэффициент буксования и продольная тяговая сила в зависимости от нормальной нагрузки, действующей на колесо, и линейной скорости планетохода. Затем решается уравнение динамики вращения колеса в соответствии с уравнением 5. Рассчитанная сила тяги позволяет определить линейную скорость планетохода в модуле «кинематики кузова» (Car_Body_Kinematics) в соответствии с уравнением 4. В модуле «динамики кузова» (Car_Body_Dynamic) определяются нормальные нагрузки, действующие на передние и задние колеса, в соответствии с уравнениями (6) и (7).

В модуле оптимизации (Optimisation) рассчитываются коэффициенты буксования для каждого колеса в соответствии с реализуемым законом, например, необходимые для минимизации затрат энергии на скольжение. В модуле контроллера (controller) сигналы «газа» отдельных колес определяются в соответствии с алгоритмом управления, приведенным в разделе 1, и задается вращающий момент на колесах.

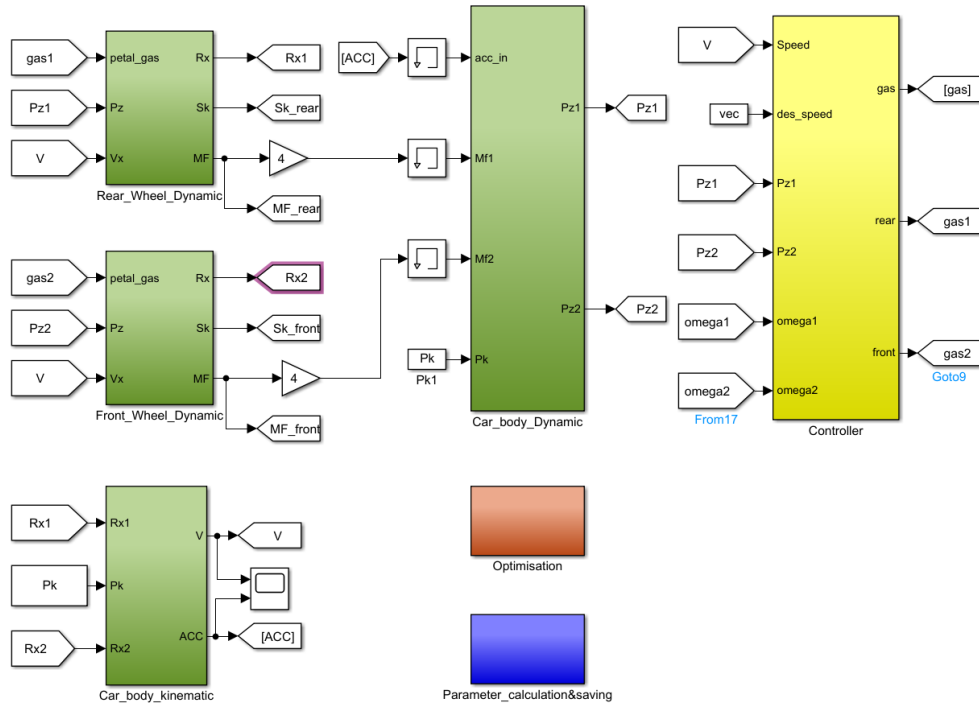


Рис. 3. Схема математической модели движения планетохода с управлением подводимой мощностью к движителю в соответствии с разработанным законом

Fig. 3. Schematic view of the mathematical model for the rover motion with controlled distribution of power delivered to its propulsion unit according to the formulated law

III. Закон распределения мощности для планетохода с индивидуальным приводом при прямолинейном движении с учетом сопротивления качению и сцепления колес

Для расчета желаемых коэффициентов буксования каждого колеса, позволяющих минимизировать энергетические затраты планетохода при прямолинейном движении, решается задача оптимизации: определяются коэффициенты буксования каждого колеса планетохода, при которых реализуется минимальное значения коэффициента удельных мощностных потерь f_{Nf} [19] с учетом ограничения на требуемую тяговую силу:

$$f_{Nf} = N_f / Gv \cos(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ki} \omega_i - \sum_{i=1}^n P_{xi} v}{Gv \cos(\alpha)} \quad (13)$$

Тогда целевая функция оптимизации может быть определена как:

$$\begin{cases} \min(f_{Nf}) = \min \left(\frac{\sum_{i=1}^n [(\varphi_i + f_i) R_{zi} r_0] \omega_i - \sum_{i=1}^n \varphi_i R_{zi} v}{G \cos(\alpha) v} \right) \\ \sum_{i=1}^n P_{xi} = G \sin(\alpha) \end{cases} \quad (14)$$

Решение указанной задачи оптимизации осуществляется с помощью метода неопределенных множителей Лагранжа:

$$\begin{cases} \frac{\partial f_{Nf}}{\partial S_i} - \lambda \frac{\partial \Psi}{\partial S_i} = 0 \\ \Psi = 0 \end{cases} \quad (15)$$

где $\Psi = \sin(\alpha) - \sum_{i=1}^n P_{xi}/G$.

Для получение аналитического решения будем считать, что в случае прямолинейного движения при малых $S \in [0, S_0]$ зависимость коэффициента взаимодействия движителя с опорным основанием от буксования может быть аппроксимирована линейной функцией:

$$\varphi_i = \varphi_{\max i} \cdot (1 - e^{-\frac{S_i}{S_{0i}}}) \Rightarrow \varphi_i = \varphi_{\max i} \cdot \frac{S_i}{S_{0i}} . \quad (16)$$

На основании вышеуказанного при решении задачи оптимизации получена явная аналитическая формула, позволяющая определять оптимальные значения буксования каждого колеса, доставляющие минимум целевой функции с учетом ограничений:

$$S_i = 1 - \sqrt{\frac{f_i S_{0i}}{\varphi_{\max i}} + 1} \cdot \frac{-\sin(\alpha) + \sum_{i=1}^n \gamma_i \frac{\varphi_{\max i}}{S_{0i}}}{\sum_{i=1}^n \gamma_i \frac{\varphi_{\max i}}{S_{0i}} \left(\sqrt{\frac{f_i S_{0i}}{\varphi_{\max i}} + 1} \right)} , \quad (17)$$

где $\gamma_i = \frac{R_{xi}}{G}$.

Из полученной зависимости следует, что при движении по однородной изотропной плоской опорной поверхности, если значение $\frac{f_i S_{0i}}{\varphi_{\max i}}$ для всех колес одинаково, оптимальным решением для планетохода является применение заблокированного привода [5, 6, 8]. Из этого утверждения следует основной вывод – оптимальные коэффициенты буксования колес разные, если различны характеристики взаимодействия колес с грунтом.

Если расчетное значение буксование превышает предельную величину, его необходимо ограничить. Превышение буксования опасно возникновением экскавационного эффекта, в ходе которого колесо больше погружается в грунт и, соответственно, возрастает коэффициент сопротивления качению колесного движителя, что может привести к потере подвижности планетохода. В таком случае будем считать: если расчетный коэффициент буксования превышает предельную величину, он будет ограничен $S_j = [S_j]$. Далее значения требуемых коэффициентов буксования должны быть перераспределены между остальными колесами:

$$S_i = 1 - \sqrt{\frac{f_i S_{0i}}{\varphi_{\max i}} + 1} \cdot \frac{-\sin(\alpha) + \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i \frac{\varphi_{\max i}}{S_{0i}} + \frac{\varphi_{\max j}}{s_{0j}} \gamma_j S_j}{\sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i \frac{\varphi_{\max i}}{S_{0i}} \left(\sqrt{\frac{f_i S_{0i}}{\varphi_{\max i}} + 1} \right)} \quad (18)$$

В соответствии с данной зависимостью, приходим к выводу: если требуемые значения коэффициента скольжения всех колес планетохода достигают предельного значения, система управления трансмиссией автоматически переходит в режим имитации заблокированного привода, который обеспечивает равенство скольжений всех колес. Дальнейшее управления тягой должно происходить именно в указанном режиме, так как в этом случае основной целью является сохранение подвижности машины, а не минимизация потерь на движение.

IV. Анализ энергоэффективности разработанного закона распределения подводимой мощности к колесам планетохода

Для оценки эффективности закона распределения мощности, подводимой к колесам планетохода, исследуем равномерное движение на подъем в условиях, для которых известны φ_{maxi} , f_i и S_{oi} . Сравнение разработанного закона распределения мощности между колесами проведем с заблокированным типом привода. Для оценки корректности разработанного аналитического закона в рамках имитационной модели дополнительно рассмотрим подход, основанный на применении численной оптимизация (методом «градиентный спуск») для нахождения оптимальных S_i каждого колеса с целью минимального потребления энергии для поддержания движения с заданной скоростью.

Результаты аналитического решения, оптимального численного решения и решения на базе заблокированного привода для планетохода (масса $m = 186,5$ кг, радиус колес $r_0 = 181,5$ мм, мощность привода колеса $N_{max} = 1317,8$ Вт, колесная база $L = 450$ мм, ускорение свободного падения $g = 9.81$ м/с²) представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты аналитического, оптимального численного решения и решения на базе заблокированного привода для планетохода

Table 1.

The results of analytical optimum numerical solution and of the solution based on a blocked rover actuator

Название	Аналитический расчет	Численная оптимизация	Блокированный привод
Угол подъема	0.1571 (9° /180π)		
Скорость движения (м/с)	3		
Соппротивление качению колес передней оси	0,3		
Соппротивление качению колес задней оси	0,1		
φ_{max}	0,38		
S_0	0,076		
S_{σ} колес передней оси	0,0290	0,0294	0,0410
S_{σ} колес задней оси	0,0475	0,0473	0,0410
R_z колес передней оси (Н)	147,599	147,599	147,599
R_z колес задней оси (Н)	304,161	304,161	304,161
M_k колес передней оси (Нм)	11,272	11,321	12,283
M_k колес задней оси (Нм)	15,279	15,230	14,268
R_x колес передней оси (Н)	17,810	18,050	23,377
R_x колес задней оси (Н)	53,742	53,440	48,174
Мощность, подводимая к колесам передней оси (Вт)	767,359	771,031	846,577
Мощность, подводимая к колесам задней оси (Вт)	1060,290	1056,589	983,387
Суммарная Мощность (Вт)	1827,649	1827,620	1829,964
Удельная сила тяги колес передней оси	0,121	0,122	0,158
Удельная сила тяги колес задней оси	0,177	0,176	0,158

Представленные результаты показывают, что оптимальные значения потребляемой мощности, полученные при аналитическом решении и численной оптимизации, близки и составляют порядка 1827,6 Вт. Требуемая мощность при организации блокированного привода, составляет 1829,964 Вт. Результаты расчета доказывают, что оптимальные коэффициенты буксования колес разные, если различны характеристики взаимодействия колеса с грунтом.

Заключение

Разработан закон управления распределением мощности между колесами для повышения энергоэффективности и проходимости планетохода. Подтверждена гипотеза о возможности линейной аппроксимации $\varphi = (S_0)$ при малых $S \in [0, S_0]$ для управления распределением мощности. Проведена оценка эффективности разработанного закона распределения мощности между колесами. Результаты математического моделирования показывают, что потребление энергии может быть незначительно снижено по сравнению с заблокированной схемой привода за счет минимизации потерь мощности на буксование движителя. При передвижении по однородной изотропной плоской опорной поверхности в случае прямолинейного движения оптимальным решением для планетохода является заблокированный привод.

Основное преимущество разработанного закона распределения мощности заключается в возможности контроля буксования движителей при обеспечении заданного уровня тяги, что позволит не допустить «закапывание» колес.

Важнейшим выводом работы является математическое обоснование того, что для обеспечения максимальной энергоэффективности транспортного средства коэффициенты буксования колес в случае различных характеристик взаимодействия движителя с грунтом должны быть разными.

Библиографический список

1. **Беляков, В.В.** Автоматические системы транспортных средств / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, А.В. Тумасов. – М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2018. – 352 с.
2. **Беляков, В.В.** Проектирование наземных транспортно-технологических машин и комплексов / В.В. Беляков, В.Е. Колотилин, В.С. Макаров, Ю.И. Молев, А.В. Папунин. – М.: ООО «КноРус», 2021. – 450 с.
3. **Коротыношко, Н.И.** Автомобили с заблокированным и дифференциальным приводом / Н.И. Коротыношко. – М.: Машгиз, 1948. – 119 с.
4. **Чудаков, Д.А.** Основы теории и расчета трактора и автомобиля / Д.А. Чудаков. – СПб.: Квадро, 2014. – 384 с.
5. **Wong, J.Y.** Optimization of the tractive performance of four-wheel-drive tractors: Theoretical analysis and experimental substantiation / J.Y. Wong, N.B. McLaughlin [et al] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. 1998. Vol. 212(4). Pp. 285-297.
6. **Vantsevich, V.V.** Multi-wheel drive vehicle energy/fuel efficiency and traction performance: Objective function analysis // Journal of Terramechanics. 2007. Vol. 44. No. 3. Pp. 239-253.
7. **Vantsevich, V.V.** Inverse Wheel Dynamics, Dynamic Systems and Control, Parts A and B. 2006.
8. **Salama, M.A.** UGV with a distributed electric driveline: Controlling for maximum slip energy efficiency on stochastic terrain / Salama M.A., Vantsevich V.V., Way T.R., Gorsich D.J. // Journal of Terramechanics. 2018. Vol. 79. Pp. 41-57.
9. **Yamakawa, J.** A method of optimal wheel torque determination for independent wheel drive vehicles / J. Yamakawa, K. Watanabe // Journal of Terramechanics. 2006. Vol. 43. Pp. 269-285.
10. **Yamakawa, J.** A method of torque control for independent wheel drive vehicles on rough terrain / J. Yamakawa, A. Kojima, K. Watanabe // Journal of Terramechanics. 2007. No. 44(5). pp. 371-381.
11. **Шухман, С.В.** Теория силового привода колес автомобилей высокой проходимости / С.В. Шухман, В.И. Соловьев, Е.И. Прочко. – М.: Агробизнесцентр, 2007. – 336 с.

12. **Котиев, Г.О.** Закон распределения мощности по колесам для транспортного робототехнического комплекса / Г.О. Котиев, В.А. Горелов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2010. Т. 3. № 104. С. 124-127.
13. **Котиев, Г.О.** Разработка закона управления индивидуальным приводом движителей многоосной колесной машины / Г.О. Котиев, В.А. Горелов, А.В. Мирошниченко // Известия вузов. Машиностроение. 2012. Т. 1. С. 45-59.
14. **Eto, R.** Driving force distribution based on tyre energy for independent wheel-drive vehicle on rough ground / R. Eto, K. Sakata, J. Yamakawa // Journal of Terramechanics. 2018. Vol. 76. Pp. 29-38.
15. **Рождественский, Ю.Л.** Анализ и прогнозирование тяговых качеств колесных движителей планетоходов: дисс... канд. техн. наук 05.05.03. – М., 1982. – 260 с.
16. **Janosi, Z., Hanamoto.** The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soil / Z. Janosi, Hanamoto // International Conference on the Mechanics of Solio-vehicles. System. 1. Torino. 1961. Т. 44. С. 331-359.
17. **Косицын, Б.Б.** Модернизация управляющей и измерительной систем стенда «Грунтовый канал» и разработка математической модели движения колеса в условиях стенда / Б.Б. Косицын, Чжэн Хуайюй, Р.Л. Газизуллин // Труды НАМИ. 2021. № 1. С. 25-34.
18. **Чижов, Д.А.** Лабораторный расчетно-экспериментальный комплекс для исследования тягово-энергетических свойств колесных движителей / Д.А. Чижов, В.А. Горелов, Г.О. Котиев // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 4. С. 21-27.
19. **Ларин, В.В.** Теория движения полноприводных колесных машин: учебник / В.В. Ларин. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 391 с.

*Дата поступления
в редакцию: 13.07.2022*

*Дата принятия
к публикации: 01.11.2022*

УДК 621.86.063

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_124

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЧЕРПЫВАНИЯ ГРЕЙФЕРА ПРИ ПЕРЕГРУЗКЕ СМЕРЗШЕГОСЯ ФЛОТАЦИОННОГО СЕРНОГО КОЛЧЕДАНА

А.Д. Шурашов

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

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

А.Л. Малыгин

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

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

И.С. Никандров

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

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

Ю.В. Краснов

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

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

Изучено влияние вибровоздействия на челюсти грейфера и процесс зачерпывания грейфера при смыкании челюстей. Перегрузка колчедана осуществлялась в складских условиях с переносом материала из штабеля хранения. Определен гранулометрический состав образцов серного колчедана. Определены параметры смерзания колчедана в штабеле и изменение влажности смерзшейся массы материала. Модернизированный грейфер оборудован маховиком аккумуляции энергии, который соединялся с помощью обгонной муфты с шарниром вала при начале раскрытия челюстей и при опускании нижней траверсы. Определена величина заглубления режущих элементов в слой. Определены степень заполнения, моменты сил сопротивления зачерпыванию и энергетические затраты на зачерпывание. Рассматривается влияние глубины залегания смерзшегося слоя на производительность грейферного крана. Определено влияние температуры и толщины смерзшего слоя на степень заполнения. Определены удельные энергетические затраты на процесс перегрузки смерзшегося колчедана для серийного и модернизированного грейферов в зависимости от температуры материала.

Ключевые слова: колчедан, влажность, смерзание, грейфер, сопротивление, смыкание, челюсти, вибрация, производительность, перегрузка, зачерпывание, энергосбережение.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шурашов, А.Д. Исследование зачерпывания грейфера при перегрузке смерзшегося флотационного серного колчедана / А.Д. Шурашов, А.Л. Малыгин, И.С. Никандров, Ю.В. Краснов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 4. С. 124-132. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_124

THE RESEARCH OF GRAB SCOOPING WHEN OFFLOADING FROZEN SULPHUR PYRITE FLOTATION

A.D. Shurashov

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

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

A.L. MalyginORCID: 0000-0002-2429-0685 e-mail: al.malygin.dpi@yandex.ru

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

*Nizhny Novgorod, Russia***I.S. Nikandrov**ORCID: 0000-0001-9502-0298 e-mail: mnnd@mail.ru

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

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

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

Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The effect of vibration on the grab jaws and the scooping process at jaw closure is researched. Pyrite offload is carried out in stock conditions and includes the transfer of the material from a stock pile. Grain-size distribution of pyrite samples is determined. The conditions for pyrite freezeup in a pile are determined and the humidity change of the frozen material mass is found. An upgraded grab is equipped with a flywheel energy storage. At the start of jaw opening and at the lower yoke lowering, it is connected to the shaft joint trough a free-wheel clutch. A magnitude of penetration of cutting elements into the layer is found. Also, the results obtained include a filling degree, torques exerted by resistance forces against scooping, and the power consumption at scooping. The effect of the depth of a frozen layer occurrence on a grab crane performance is considered. The filling degree is related to the temperature and thickness of the frozen layer. The specific energy consumption values for the process of the frozen pyrite offload for the standard and upgraded grabs are determined depending on the material temperature.

Key words: pyrite, humidity, freeze-up, grab, resistance, closure, jaws, vibration, performance, offload, scooping, energy efficiency.

FOR CITATION: A.D. Shurashov, A.L. Malygin, I.S. Nikandrov, Yu.V. Krasnov. The research of grab scooping when offloading frozen sulphur pyrite flotation. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. № 4. Pp. 124-132. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_4_124

Введение

Грейферы широко используются для перегрузки сыпучих материалов в речных портах, на рудниках и на складских площадках предприятий. Особенности их конструкции и технологии использования подробно рассмотрены в работе [1]. В связи с ростом объемов работ по погрузке материалов важное значение приобретают исследования по обеспечению энергосбережения при эксплуатации грейферов, особенно в зимний период при смерзании влагосодержащих сыпучих материалов.

Экспериментальная часть

Выполнено сравнительное исследование результатов перегрузки флотационного колчедана с помощью модернизированного грейфера вместимостью 3,2 м³, оснащенного вибратором, конструктивно описанным в работах [2,3] и серийно выпускаемым грейфером вместимостью 3,2 м³ (рис. 1) [4,5]. Колчедан перегружался в складских условиях с переносом материала из штабеля хранения в бункер подачи колчедана в печной цех. Завоз колчедана на склад осуществлялся в период с сентября по декабрь. Температура на складе в период проведения работ $t = -5-28$ °С; влажность поступающего колчедана 2-4 %. Толщина смерзшегося слоя колчедана в штабеле менялась от 0,6 м (декабрь) до 2,3 м (в конце марта), постоянно контролируясь по показаниям термометра. При оценке работы грейферов периодически проводились контрольные замеры зачерпнутого материала грейферами трех видов (табл. 1).



Рис. 1. Отгрузка рудного материала на автотранспорт

Fig. 1. Ore material offload to a motor vehicle

Таблица 1.

Характеристика использованных для перегрузки флотационного колчедана грейферов

Table 1.

Specifications of grabs used to offload pyrite flotation

Наименование параметра	Величина параметра для вида грейфера		
	модерни- зированный	грейфер Севастьянова	серийный грейфер
Собственная масса, кг	3980	3920	3800
Вместимость, м. куб	3,2	3,2	3,2
Размах челюстей, мм	13360	3440	3300
Длина режущих элементов, мм	180	180	-
Ширина режущих элементов, мм	120	120	-
Толщина РЭ, мм	60	60	-
Угол заточки резцов, град	40	40	-
Количество РЭ	5+6	5+6	-
Шаг расстановки РЭ, мм	300	300	-
Наличие аккумулятор энергии и вид	маховик	-	-
Наличие вибратора и его вид	эксцентрик	-	-

Модернизированный грейфер был оборудован маховиком аккумуляции энергии, который соединялся с помощью обгонной муфты с шарниром вала при начале раскрытия челюстей и при опускании нижней траверсы. Это обеспечивало максимальную утилизацию энергии. На грейфере был установлен эксцентрик вибратора, включаемый в вращение второй обгонной муфтой с вращающимся маховиком-аккумулятором энергии после постановки грейфера на штабель, в момент начала зачерпывания материала [2]. В процессе работы оценивали зачерпываемость колчедана и силу сопротивления зачерпывания.

Обсуждение результатов

Анализ образцов колчедана на влажность показал, что с погружением внутрь штабеля от поверхности на глубину 1 м доля влаги в колчедане увеличивается на 1-2 % абсолютной величины (рис. 2). На глубине 2 м влажность колчедана возрастает до 10-11 %, на глубине 2,5 м – до 12-14 %, достигая максимума.

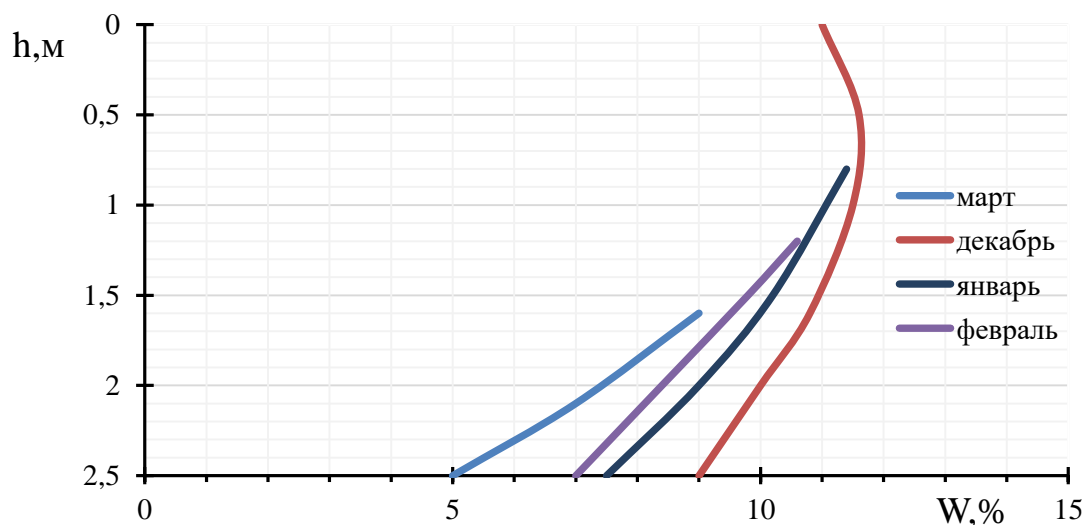


Рис. 2. Изменение влажности флотационного колчедана (W , %) с удалением от поверхности штабеля внутрь (h , м)

Fig. 2. Pyrite flotation humidity change (W , %) with distance inwards from a pile surface (h , m)

На глубине слоя колчедана 3 м его влажность уменьшается до 8 %, а на глубине 4 м – до 3 % и менее. Это свидетельствует о перераспределении воды в слое за счет миграции паров из глубинных слоев в зоны слоев материала с температурами ниже точки замерзания. Определение гранулометрического состава образцов серного колчедана показало, что доля частиц с размером менее 0,5 мм в нем составляет 90-94 % по массе. Остальная часть приходится на частицы размером 0,5-1 мм.

Как видно из рис. 2, влажность колчедана на глубинах залегания в штабеле более 2,5 м с увеличением периода хранения понижается. Это подтверждает наличие миграции паров воды из глубинных слоев в смерзшиеся слои материала. Температура колчедана на поверхности штабеля $t = -5-10$ °С (рис. 3). В декабре она достигает $t = -10$ °С, а толщина смерзшегося слоя возрастает до 1,2 м.

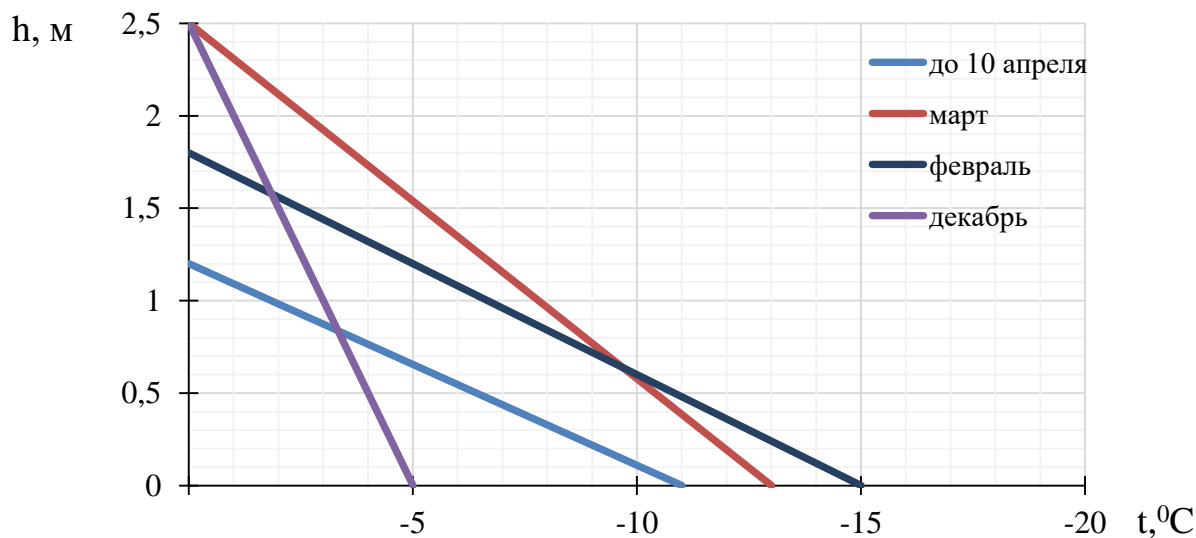


Рис. 3. Распределение температур в смерзшемся слое на глубине залегания в штабеле склада

Fig. 3. Temperature distribution in a frozen layer at a depth of occurrence in a stock pile

К концу марта за счет передачи тепла из нижних несмерзшихся слоев из-за повышения температуры окружающей среды в атмосфере температура колчедана на поверхности штабеля повышается и достигает до $t = -8-9^{\circ}\text{C}$ и до $t = -4-5^{\circ}\text{C}$ до 10 апреля. Как показывает практика эксплуатации серийных грейферов, их производительность с появлением корки смерзшегося колчедана более 0,3 м понижается вплоть до остановки. Для ее разрушения необходимо использовать в качестве рыхлителя ударные клин-бабы. После образования проломов в корке грейфером вычерпывается несмерзшийся материал. В результате наработка серийного канатного грейфера до капитального ремонта снижается в 10-15 раз. Отказ в работе грейфера происходит через 5-6 тыс. т перегрузки. По этой причине на складе перед зимой создается запас грейферных устройств для грейферного крана в количестве 10-15 единиц. За сезон все они полностью выводятся из строя.

При работе грейфера с ровной заостренной шиной режущей кромки челюстей практически при всех температурах смерзшегося слоя флотационного колчедана глубина силового внедрения шин челюстей в смерзшегося материала составляла от 30 до 60 мм (линия 1, рис. 4). В результате степень зачерпывания ковша грейфера не превышает 23 % (линия 1, рис. 5). При использовании грейфера-рыхлителя Севастьянова, с режущими элементами, глубина силового внедрения составила до 130-190 мм, с одновременным увеличением степени зачерпывания ковша до 50-60 % (линия 2, рис. 4). Как видно из рис. 4, заглубление режущих органов грейфера в слой минимально при температурах смерзшегося слоя $t = -5-10^{\circ}\text{C}$.

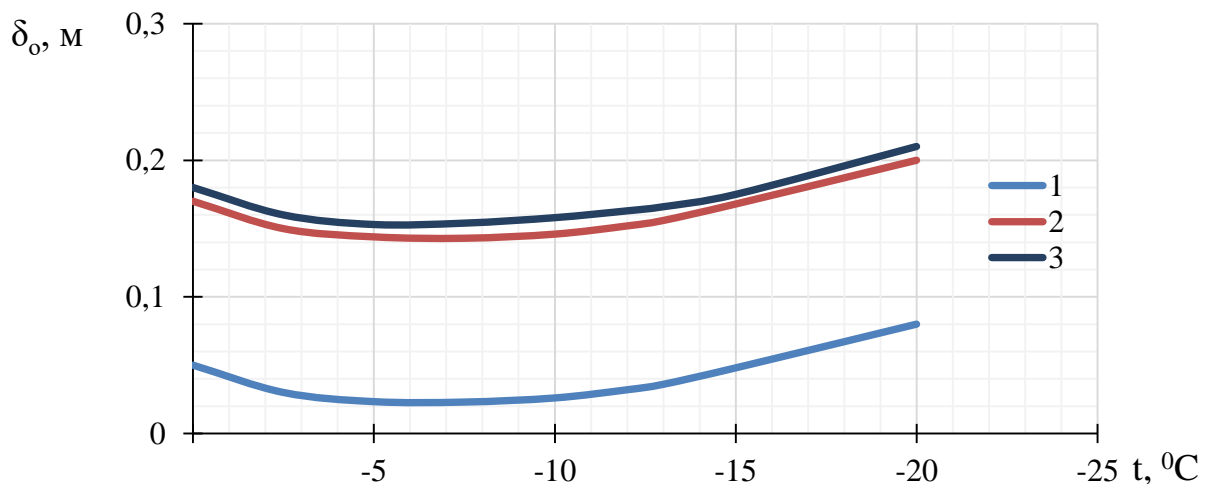


Рис. 4. Влияние температуры смерзшегося слоя флотационного колчедана (t) на величину заглубления режущих шин челюстей грейфера в смерзшийся слой

Fig. 4. The effect of pyrite flotation temperature at the frozen layer (t) on the magnitude of penetration of cutting elements of the grab into the frozen layer

Заглубление модернизированного грейфера в смерзшийся слой колчедана близко к заглублению грейфера Севастьянова и составляет 140-210 мм (линия 3, рис. 4). Это указывает на преимущественное влияние на глубину внедрения наличия на челюстях режущих клинов-резцов и их геометрических параметров. Вибрация челюсти практически мало сказалась на глубине внедрения элементов грейфера в твердый слой, но вибровоздействие существенно повысило зачерпывающую способность. Степень заполнения ковша для модернизированного грейфера с воздействием вибрации на зачерпываемый слой существенно возрастает до 85-105 % (линия 3, рис. 5). С понижением температуры колчедана от $t = 0$ до -10°C степень заполнения челюстей возрастает. Последующее понижение температуры снижает степень заполнения грейферов.

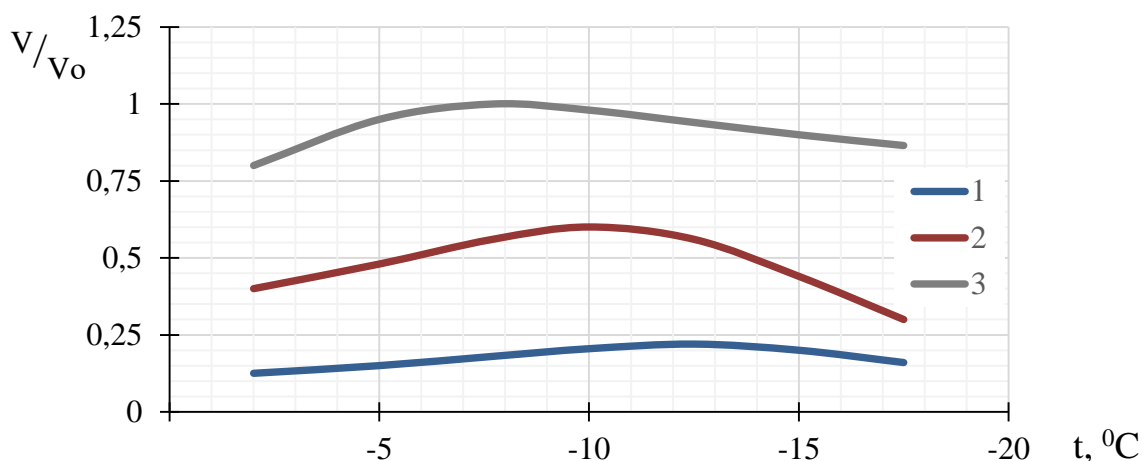


Рис. 5. Влияние температуры измельченного колчедана ($t, ^\circ\text{C}$) на степень заполнения камеры челюстей грейфера в долях от объема стандартного грейфера ($V_0, \text{м}^3$)

Fig. 5. The effect of crushed pyrite temperature ($t, ^\circ\text{C}$) on the filling degree of the jaw bucket of the grab in fractions of a standard grab volume (V_v, m^3).

Общие энергетические затраты E_Σ на перегрузку материала грейфером складываются из следующих затрат:

- затраты на подъем и перенос грейфера от точки выгрузки измельченной массы до точки опускания грейфера на штабель хранения (E_1);
- затраты на резание и измельчение массы колчедана (E_p);
- затраты на смыкание челюстей и зачерпывание измельченной массы ($E_{\text{см}}$);
- затраты на подъем загруженного грейфера ($E_{\text{п}}$);
- затраты на переноску грейфера с грузом в точку выгрузки (E_2).

$$E_\Sigma = E_1 + E_p + E_{\text{см}} + E_{\text{п}} + E_2.$$

При расстоянии от точки выгрузки грейфера (L_m) высота подъема пустого грейфера (H_m)

$$E_1 = G_{\text{гр}} \cdot (L + gH);$$

$$E_p = F_p \cdot V_p;$$

$$E_{\text{см}} = F_3 \cdot V_p;$$

$$E_{\text{п}} = (G_{\text{гр}} + G_m) \cdot H;$$

$$E_2 = (G_{\text{гр}} + G_m) \cdot L,$$

$G_{\text{гр}}$ и G_m – масса грейфера и переносимого груза соответственно.

Массу груза определяли взвешиванием автомобиля с грузом и пустого. Воздействие вибрации на среду погрузки материала может снизить энергетические затраты на резание смерзшейся массы колчедана E_p , затраты на смыкание челюстей, связанные с трением боковых стенок и днища челюстей и затраты на зачерпывание материала, связанные с внутренним трением частиц груза в слое измельченного материала. Расчетный анализ энергозатрат показывает, что доля энергетических затрат на подъем и транспортирование грейфера и груза составляет в зависимости от расстояния и высоты подъема грейфера 50-65 % от суммарных энергетических затрат. Для грейфера Севастьянова сила в замыкающем канате в процессе захвата в разрушенном смерзшемся слое флотационного колчедана на первых 6-9 ° смыкания челюстей уменьшается с 15 до 9 кН (линия 1, рис. 6). При дальнейшем смыкании челюстей сила начинает возрастать и достигает 37 кН при завершении смыкания.

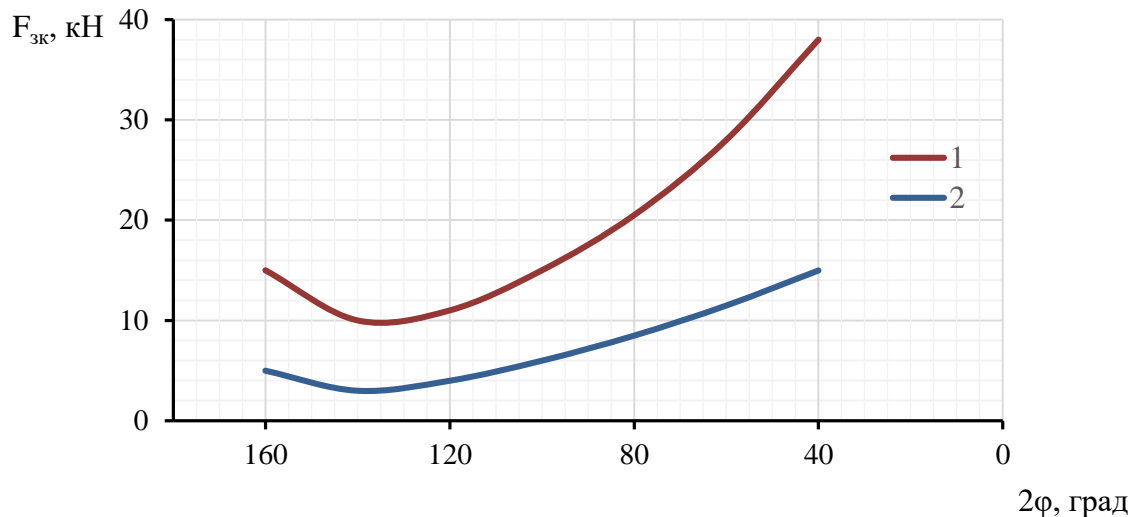


Рис. 6. Изменение силы в замыкающем канате в процессе смыкания челюстей при зачерпывании колчедана грейфером Севастьянова 1 и модернизированным грейфером 2

Fig. 6. Variation of force in the closing rope during jaw closing in the process of pyrite scooping by Sevastyanov grab 1 and an upgraded grab 2

В результате положительного воздействия вибрации усилие в замыкающем канате модернизированного грейфера с вибратором в 2,5-5 раз меньше и не превышает 15 кН к моменту завершения смыкания. Производительность грейферного крана при разработке смерзшегося слоя колчедана не превышает 18-19 т/ч (линия 1, рис. 7). Производительность грейфера Севастьянова в 2,1 раза выше, чем серийного, а производительность грейфера, оснащенного вибратором, в 2,8 раз выше, чем у серийного. Несмотря на наличие разницы влияния температуры измельченной массы на степень заполнения грейфера (рис. 5), производительность грейферного крана остается практически постоянной при перегрузке колчедана с различных глубин залегания в штабеле. Это указывает на отличие уплотнения материала в процессе зачерпывания грейфера.

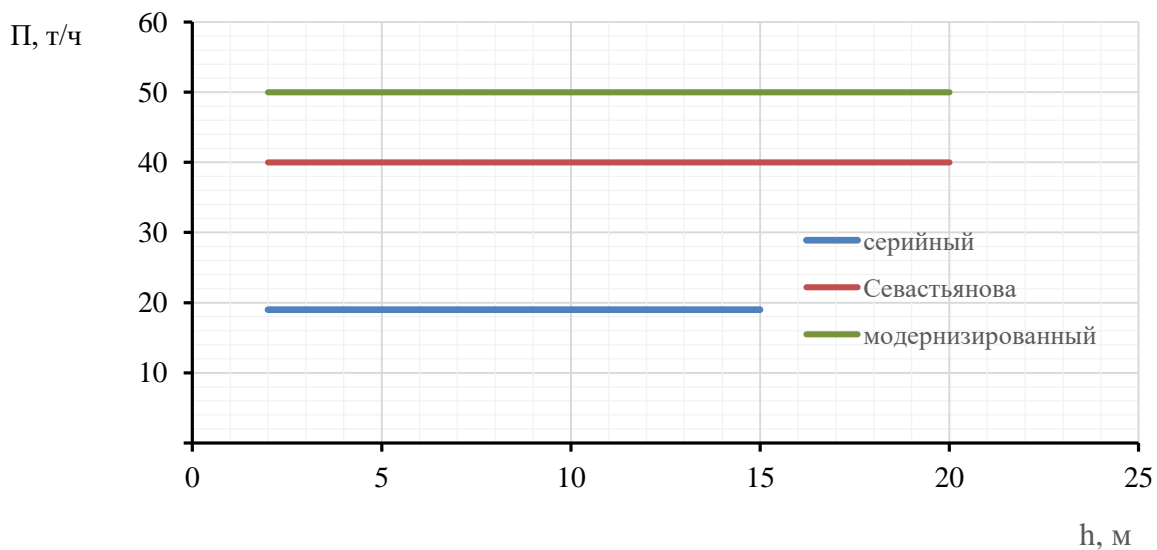


Рис. 7. Влияние глубины залегания смерзшегося слоя (h) на производительность грейферного крана (Π)

Fig. 7. The effect of the depth of a frozen layer occurrence (h) on a grab crane performance (Π)

Аналитический расчет суммарного момента сил сопротивления зачерпыванию показал (линия 1, рис. 8), что с повышением температуры материала средний момент сил сопротивления зачерпывания повышается с 3,8 кН м при $t = -13^{\circ}\text{C}$ до 49,5 кН м при $t = +3^{\circ}\text{C}$.

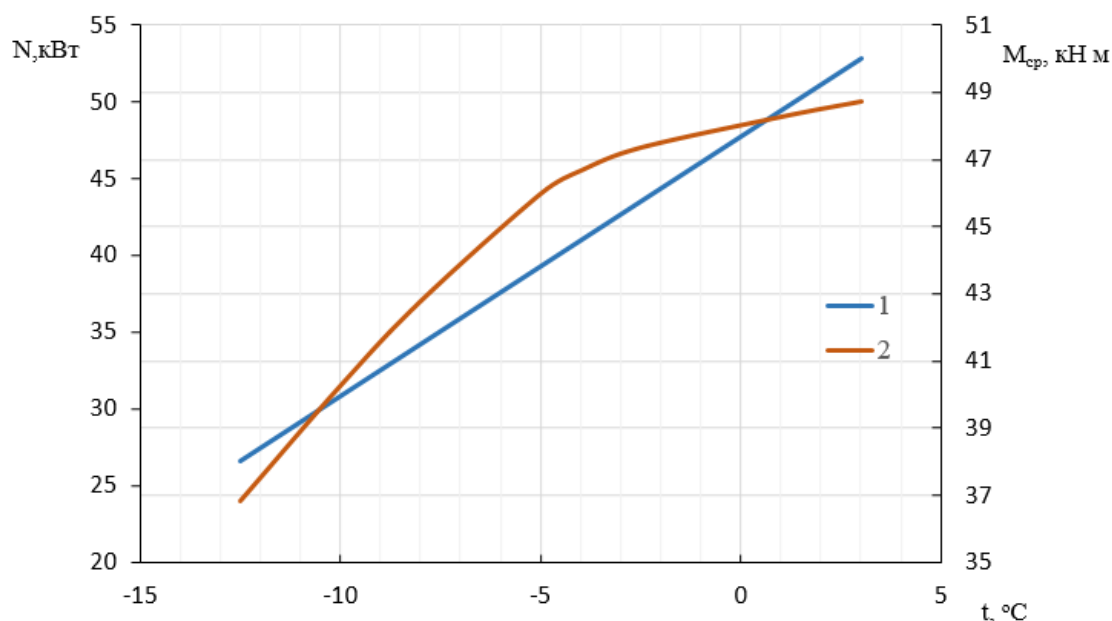


Рис. 8. Влияние температуры (t) смерзшегося слоя колчедана на величину среднего момента сил сопротивления зачерпыванию колчедана ($M_{ср}$) модернизированным грейфером и мощностью (N), необходимой для зачерпывания

Fig. 8. The effect of the temperature (t) of the pyrite frozen layer on the average torque exerted by resistance forces against pyrite scooping (τ_{avg}) by the upgraded grab at an output (N) required for scooping

С понижением температуры смерзшегося материала необходимая для зачерпывания мощность уменьшается. Так, для $t = -13^{\circ}\text{C}$ (линия 2, рис. 8) она составляет 24 кВт, а при $t = -5^{\circ}\text{C}$ 44 кВт. При температуре смерзания колчедана она уже составляет 50,5 кВт. Уменьшение усилия в замыкающем канате, а, следовательно, и необходимой мощности на зачерпывание при уменьшении температуры смерзшегося флотационного колчедана объясняется тем, что при более низких температурах в точках контакта частиц материала поверхность покрыта льдом. Поэтому при трении элементов на поверхности образуется пленка воды, снижающая трение частиц друг о друга, о боковую поверхность и днище челюсти. Это и объясняет факт меньших энергозатрат на перегрузке материала, повышение коэффициентов заполнения челюстей до 0,9-1,0 и рост производительности при зачерпывании грейфера.

Удельные энергозатраты на процесс перегрузки смерзшегося колчедана модернизированным грейфером из штабеля хранения в приемный бункер питающего транспортера, подающего серный колчедан в печное отделение, при температуре материала минус 10°C составляют 0,67 кВт ч/т, а при $t = 0^{\circ}\text{C}$ падают до 0,53 кВт ч/т. При использовании серийного грейфера энергозатраты в тех же условиях они в 1,75 раза выше и составляют 1-1,15 кВт ч/т. Нарботка модернизированного грейфера до первого капитального ремонта в 12-14 раз больше, чем для серийного грейфера равной вместимости. Пробег до капитального ремонта составит 1300 часов, что в 2,1 раза выше серийного. Срок эксплуатации опытного образца модернизированного грейфера на 16.02.09 превысил 16 000 часов. За последующие два года эксплуатации он не достиг предельного значения.

Заключение

1. Удельные энергозатраты на перегрузку колчедана модернизированным грейфером с вибровоздействием на зачерпываемый смерзшийся слой в 1,75 раза ниже, чем у серийного грейфера и составляют 0,53-0,97 кВт/ч.
2. Межремонтный период модернизированного грейфера в 2,1 раза больше и составляет 1300 часов.

Библиографический список

1. **Никандров, И.С.** Перегрузка смерзшихся сыпучих материалов грейферами / И.С. Никандров, Т.Ю. Суwegeина, М.И. Никандров – Саар Брюкен: Изд. LAP, 2013. – 116 с.
2. **Никандров, И.С.** Разработка аккумулятора энергии раскрытия челюстей при перегрузке смерзшегося флотационного колчедана / И.С. Никандров, Т.Ю. Суwegeина // Современные проблемы наук и образования. 2013.
3. Патент 2356825 RU, МПК В66С 3/16 С1 Грейфер / В.А. Севастьянов, И.С. Никандров, А.Д. Шурашов, Т.Ю. Суwegeина и др. Заявл.17.08.2007, опубл.27.05.2009, Бюл. №15. – 5 с.
4. **Севастьянов, В.А.** Разработка методики расчета и создание рациональной конструкции грейферных рыхлителя для смерзшихся сыпучих материалов. Дисс. канд. техн. наук 05.05.04. НГТУ. Н. Новгород. 2006. – 187 с.
5. **Слюсарев, А.С.** Разработка основ расчета и конструирование рабочих органов подъемно-транспортных машин, подвергающих сыпучий материал объемному сжатию. Дисс. докт. техн. наук 05.05.04. – Н. Новгород. 1991. – 391 с.

*Дата поступления
в редакцию: 21.03.2022*

*Дата принятия
к публикации: 17.11.2022*

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Багиров Миrabбас Бахтияр оглы – ассистент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева

Головушкин Николай Александрович – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева

Катаева Лилия Юрьевна – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, д-р техн. наук

Карпычев Владимир Юрьевич – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, д-р техн. наук

Мухин Алексей Валерьевич – аспирант Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Пальгуйев Дмитрий Анатольевич – доцент Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, канд. техн. наук

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Бликов Антон Олегович – заведующий лабораторией газодинамики и физики взрыва Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, канд. физ.-мат. наук

Дюжий Максим Анатольевич – студент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева

Ерунов Сергей Владимирович – ведущий научный сотрудник лаборатории газодинамики и физики взрыва Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, канд. техн. наук

Мочалов Михаил Алексеевич – главный научный сотрудник лаборатории газодинамики и физики взрыва Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, доктор физ.-мат. наук

Новиков Денис Ильич – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева

Огородников Владимир Александрович – главный научный сотрудник лаборатории газодинамики и физики взрыва Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, доктор физ.-мат. наук

Полуничев Виталий Иванович – профессор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, д-р техн. наук

Яндубаев Глеб Сергеевич – научный сотрудник лаборатории газодинамики и физики взрыва Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Антонян Акоп Ваганович – ведущий инженер-программист Инновационного центра «КАМАЗ», канд. техн. наук

Газизуллин Руслан Ленарович – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Жителев Даниил Анатольевич – студент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Карасева Светлана Алексеевна – аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева

Косицын Борис Борисович – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Котиев Георгий Олегович – профессор, заведующий кафедрой Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Краснов Юрий Вадимович – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Малыгин Александр Львович – доцент Дзержинского политехнического института НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Наумов Валерий Николаевич – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Никандров Игорь Семенович – профессор Дзержинского политехнического института НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Поздняков Тихон Дмитриевич – старший преподаватель Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Сулегин Дмитрий Андреевич – первый заместитель декана факультета «Специальное машиностроение» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук, доцент

Чжэн Хуайюй – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Шурашов Александр Дмитриевич – доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ «ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, ауд. 1363-3

Телефон: 8(920)00-37-877

e-mail: rsl@nntu.ru

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляются два печатных экземпляра статьи и комплекты сопроводительной документации: бумажный и электронный.
- Рекомендуемый объем статьи не превышает 15 страниц текста и 4-6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 7; минимальный объем статьи – 0,5 п.л.
- Статью необходимо сопроводить актом и протоколом экспортного контроля, экспертным заключением о возможности открытого опубликования, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию.
- Печатные экземпляры статей должны быть подписаны всеми авторами.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в порядке, отражающим их авторский вклад); аннотацию, ключевые слова.
- Аннотация (150-250 слов) отражает актуальность поставленной проблемы, цели исследования, методы, результаты, обозначение новизны, ключевые выводы.
- Ключевые слова (не менее 10) отражают тематическую направленность, объект и результаты исследования.
- Изложение материала должно быть логически выстроенным. Тематическая направленность представленного исследования должна строго соответствовать рубрике журналу. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), библиографический список, содержащий только цитируемые или рассматриваемые в тексте работы. Ссылки нумеруются в порядке цитирования. Самоцитирование рекомендуется ограничить тремя пунктами. Рекомендуется использовать в библиографическом списке ссылки на научные работы по теме исследования, индексируемые в международных базах научного цитирования. Библиографический список не должен включать неопубликованные работы.
- К статье необходимо приложить файл с информацией об авторах на русском языке: ФИО (полностью), должность, место работы (полное название организации, город, страна), идентификатор ORCID, e-mail, ученая степень и звание.
- Текст набирается через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое, верхнее и нижнее – 20 мм. Переносы не допускаются. Используется формат *Word for Windows* и стандартные шрифты *Times New Roman* и *Symbol*.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3-12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается. Использованию аббревиатур должна предшествовать их расшифровка.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы: (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel. Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображения выполняются в формате jpg или tif с разрешением 300 dpi. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисовочная подпись 11 жирный кегль, ссылки на рисунки: (рис. 1).

**РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ
ПРИНИМАЮТСЯ:**

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации

2.3.8 – Информатика и информационные процессы

Валерий Павлович Хранилов: **hranilov@nntu.ru**

**2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл,
радиационная безопасность**

Максим Александрович Легчанов: **legchanov@nntu.ru**

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Владимир Сергеевич Макаров: **vladimir.makarov@nntu.ru**

16+

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 4 (139)

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24
rsl@nntu.ru
Свободная цена

Подписано в печать: 05.12.2022. Дата выхода в свет: 16.12.2022. Формат 60x84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 7,50. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и типографии:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24