

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 (143)

Нижний Новгород 2023

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2023. № 4 (143). – 136 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»
(603155, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

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

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

УДК 050(06)
ББК 9я54

© Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2023

**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 (143)

Nizhny Novgorod 2023

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

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

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

© Nizhny Novgorod State Technical University
n.a. R.E. Alekseev, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ	7
Багиров М.Б., Соколова Э.С. Метод автоматизированной калибровки камер и сшивки видеоизображений в многокамерных системах видеонаблюдения	7
Логанов С.В. О месте модели предметной области в структуре объектно-ориентированного приложения	20
Пальгуев Д.А. Структурно-параметрический синтез информационной системы сетевой структуры на этапе общего решения	27
Старостин Н.В., Седаков Д.В., Свеженцев А.Г., Вернигор И.С. Модели и алгоритмы поиска оптимальных процессов выверки и коррекции пооперационных технологических норм времени	36
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ	51
Аркадов Г.В., Павелко В.И., Слепов М.Т. Анализ шумовой составляющей сигналов датчиков прямого заряда на маневренных режимах ВВЭР	51
Бокова Т.А., Волков Н.С., Мелузов А.Г., Зырянова Т.К. Экспериментальные исследования в подтверждение эффективности газового массообменного аппарата для РУ БРС-ГПП на водяном теплоносителе	62
Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Курдюмов А.С., Светоносков А.И., Чинак А.В., Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Первичко В.А. Экспериментально-расчетное исследование естественной циркуляции свинцово-висмутового теплоносителя	72
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	82
Ван И., Зузов В.Н. К вопросу о нахождении экстремальных режимов нагружений амфибийных машин при эксплуатации в водной среде	82
Назаренко С.В., Косицын Б.Б., Падалкин Б.В., Стадухин А.А. Применение генетического алгоритма для определения оптимального закона движения беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках	97
Репин С.В., Зазыкин А.В., Масленников Н.А. Метод оценки уровня работоспособности транспортно-технологических машин строительства на основании анализа времени простоя в ремонтах	111
Чичекин И.В., Нырклов Ф.А., Чудаков О.И., Григорьев В.С. Определение нагрузок на механизм подъема и опрокидывания ковша фронтального погрузчика на ранних стадиях проектирования с использованием динамической модели	121
НАШИ АВТОРЫ	131

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS	7
M.B. Bagirov, E.S. Sokolova. Method of automated camera calibration and stitching video images in multi-camera video surveillance systems	7
Loganov S.V. Position of the domain model in object-oriented application architecture	20
D.A. Palguyev. Structural-parametric synthesis of information system of network structure at the stage of general solution	27
N.V. Starostin, D.V. Sedakov., A.G. Svezhentsev, I.S. Vernigor. Models and algorithms for searching optimal reconciliation process and correction of operational technological time standards	36
 NUCLEAR POWER AND ATOMIC POWER ENGINEERING	 51
G.V. Arkadov, V.I. Pavelko, M.T. Slepov. Analysis of noise component of direct charge sensor signals in maneuverable VVER modes	51
T.A. Bokova, N.S. Volkov, A.R. Marov, A.G. Meluzov, T.K. Zyryanova. Experimental studies to confirm effectiveness of gas mass transfer apparatus for water coolant BRS-GPG reactor plants	62
N.A. Pribaturin, P.D. Lobanov, A.S. Kurdyumov, A.I. Svetonosov, A.V. Chinak, V.V. Chudanov, A.E. Aksenova, V.A. Pervichko. Experimental and numerical study of natural circulation of lead-bismuth coolant	72
 MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION	 82
Wang Y., V.N. Zuzov. Research on extreme load mode of amphibious vehicle during operation on water	82
S.V. Nazarenko, B.V. Kositsyn, B.V. Padalkin, A.A. Stadukhin. Application of genetic algorithm to determine the optimal law of motion of unmanned wheeled vehicle in cyclic cargo transportation	97
S.V. Repin, A.V. Zazykin, N.A. Maslennikov. Method for assessing the level of performance of transport and technological construction machines based on analysis of downtime in repairs	111
I.V. Chichekin, F.A. Nyrkov, O.I. Chudakov, V.S. Grigoryev. Determination of loads on lifting and tipping mechanism of wheel loader bucket at the early stages of design using a dynamic model	121
 AUTHORS	 131

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 004.932

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_7

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КАЛИБРОВКИ КАМЕР И СШИВКИ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ В МНОГОКАМЕРНЫХ СИСТЕМАХ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

М.Б. БагировORCID: 0000-0003-1656-0849 e-mail: bagirov_mirabbas@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Э.С. Соколова**ORCID: 0000-0003-0860-2463 e-mail: essokolowa@gmail.comНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Разработан алгоритм сшивки видеоизображений, представляющий собой комбинацию алгоритмов калибровки, цветовой коррекции и градиентного смешивания с целью минимизации видимости линии шва между стыкуемыми изображениями, получаемыми с разных камер. Алгоритм калибровки камер в многокамерной системе автоматизирован, что минимизирует участие оператора и повышает точность за счет обнаружения и поэтапного отсеивания неудачных пар опорных точек в поле пересечения углов зрения камер. Обосновано, что для одного кадра общее время, затрачиваемое на цветокоррекцию, градиентное смешение, сшивку и обрезку изображения составляет около 35 миллисекунд, что соответствует требованиям работы алгоритма построения панорамы в режиме реального времени для многокамерной системы видеонаблюдения.

Ключевые слова: многокамерные системы, калибровка, устранение дисторсии, сшивка панорамы, OpenCV, видеоаналитика.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Багиров, М.Б. Метод автоматизированной калибровки камер и сшивки видеоизображений в многокамерных системах видеонаблюдения / М.Б. Багиров, Э.С. Соколова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 7-19. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_7

METHOD OF AUTOMATED CAMERA CALIBRATION AND STITCHING VIDEO IMAGES IN MULTI-CAMERA VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS

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***E.S. Sokolova**ORCID: 0000-0003-0860-2463 e-mail: essokolowa@gmail.comNizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper presents the developed stitching video images algorithm, in which a combination of calibration algorithm, color correction and gradient mixing algorithm is carried out to minimize the visibility of the seam line between joined images obtained from different cameras. The algorithm for calibrating cameras in a multi-camera system is automated, which minimizes operator participation and increases the accuracy of calibration by detecting and gradually screening out unsuccessful pairs of reference points in the field of intersection of camera angles. It is confirmed that the total time spent on color correction, gradient mixing, stitching and cropping the image is about 35 milliseconds for one frame, which meets the requirements of the real-time panorama algorithm for a multi-camera video surveillance system.

Key words: multi-camera systems, calibration, distortion elimination, panorama stitching, OpenCV, video analytics.

FOR CITATION: M.B. Bagirov, E.S. Sokolova. Method of automated camera calibration and stitching video images in multi-camera video surveillance systems. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 7-19. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_7

1. Введение

Системы видеоаналитики стали неотъемлемой частью современного мира. В последние годы доступность и эффективность видеонализа делает его все более популярным в различных сферах социальных технологий, включая безопасность, контроль доступа, наблюдение за транспортом, медицинское обслуживание и т.д. Актуальность данных систем обусловлена их способностью автоматизировать процесс анализа видео и сокращать время ручной обработки информации. Кроме того, системы видеоаналитики повышают эффективность работы производств и компаний, снижая затраты на персонал. Точность и производительность их работы во многом зависит от предварительной настройки параметров.

2. Анализ проблемы и постановка задач исследования

Важным направлением видеоаналитики является панорамная сшивка – создание бесшовных панорамных изображений из данных, полученных от множества камер. Известные в настоящее время алгоритмы работают с неподвижными статичными изображениями, тогда как технологии создания панорам на основе видеоданных существенно различаются. Импортозамещение требует создания отечественных систем панорамного обзора высокого качества, устраняющих «слепые» зоны и обеспечивающих бесшовное сшивание панорамных изображений, при этом особенно важна работа систем в режиме реального времени.

В работе [1] представлена классификация методов и средств формирования панорамных изображений, рассмотрены методы получения данных о глубине пространства и устройства получения панорамных изображений, выявлены их преимущества и недостатки. Проведен аналитический обзор, позволяющий учесть специфику предлагаемых решений с целью дальнейшей разработки программно-аппаратных решений для построения цифровой модели пространства в режиме реального времени.

В настоящее время существуют два основных метода создания панорам: сглаживание переходов между фрагментами и минимизация видимых швов между изображениями. Однако оба метода имеют свои ограничения, связанные с высокими вычислительными затратами и требованиями к памяти. В работе [2] рассматривается метод поиска швов в области перекрытия полей зрения камер. Он позволяет минимизировать различия между исходными изображениями, однако требует больших вычислительных ресурсов и занимает много времени. Кроме того, для работы метода необходимо наличие большого количества памяти. Для повышения скорости работы и уменьшения требований к ресурсам в работе [3] предлагается алгоритм оптимизации построения панорам путем вычисления кратчайших путей на графах. Однако точность этого метода оказалась ниже, чем ожидалось, что говорит о необходимости доработки алгоритма для повышения точности и применения его в режиме реального времени. Самым популярным алгоритмом для сшивки изображений в панораму является *RANSAC*

[4-5], однако в последние годы появляется все больше исследований альтернативных методов для решения данной задачи. Это во многом связано с недостатками RANSAC – большими временными затратами и наличием ошибок в поиске матрицы гомографии. При использовании алгоритмов сшивки панорам в многокамерных системах возникает проблема цветокоррекции [6]. Различия в настройках экспозиции, балансе белого и положении камер могут привести к несоответствию цветов в итоговой панораме. Это становится очень заметным, если входные изображения получены с разных камер.

Существующие методы и алгоритмы панорамной сшивки, представленные на рынке, могут показывать хорошие результаты, но применение большого числа камер усложняет процесс обработки информации и не дает возможности обрабатывать данные и принимать решения в режиме реального времени. Необходима разработка и реализация алгоритма, комбинирующего калибровку системы камер, алгоритм цветокоррекции входных изображений с алгоритмом создания панорамы, что позволит повысить скорость работы системы построения панорамы без потери точности.

3. Разработка и исследование алгоритмов

Создание панорамного видео в общем виде включает регистрацию входных изображений, калибровку камер (поиск опорных точек, вычисление и уточнение матриц гомографии), проецирование изображений, цветовую коррекцию и сшивку изображений, включающую определение оптимальной границы сшивания, градиентное смешивание вдоль этой границы и определение границ обрезки.

3.1. Алгоритм калибровки многокамерных систем

Процесс калибровки камер является первым этапом при построении панорамного обзора в многокамерной системе для решения задач видеоаналитики. Предлагаемый алгоритм представляет собой модификацию метода калибровки камер на основе опорных точек, выбранных в пересечении полей зрения двух камер. На начальном этапе калибровки любых двух камер системы, имеющих пересекающиеся поля зрения, выбираются четыре точки, координаты которых задает оператор, и выполняется ручная калибровка этой пары камер. В результате получаем матрицы гомографии откалиброванных камер, которые используются для автоматической калибровки остальных камер системы.

Алгоритм ручной калибровки двух камер системы с пересекающимися полями зрения заключается в следующем. Имеется система из n камер, которые представлены в виде множества $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$. Выберем две камеры с пересекающимися полями зрения C_1 и C_2 (рис. 1), в области пересечения полей зрения которых выберем четыре опорных точки, расположенные в одной плоскости, координаты которых известны, и которые расположены по сторонам прямоугольника на плоскости земли [7]. При этом прямоугольник между четырьмя точками должен занимать более 25 % площади пересечения полей зрения двух камер [8]. Обозначим P^i – набор из четырех точек $p_j^i, j \in \{1, 2, 3, 4\}$ в поле зрения i -й камеры, P – набор точек в мировой системе координат. В результате проведения ручной калибровки двух камер C_1 и C_2 на выходе получим три набора, состоящих из четырех точек с координатами:

$$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4\}, P^1 = \{p_1^1, p_2^1, p_3^1, p_4^1\}, P^2 = \{p_1^2, p_2^2, p_3^2, p_4^2\}. \quad (1)$$

Координаты точки p_j^i в системе координат камеры C_i определим следующим образом:

$$p_j^i = (x_{pj}^i, y_{pj}^i). \quad (2)$$

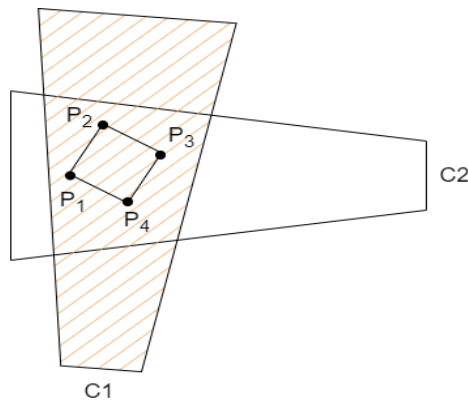


Рис. 1. Выбор опорных точек для калибровки камер

Fig. 1. Selecting reference points for camera calibration

С помощью полученных наборов точек строятся матрицы гомографии для каждой камеры. H_g^i – матрица гомографии, отображающая пиксельные координаты камеры C_i ($i = 1, \dots, n$) в мировую систему координат. Чтобы найти матрицу гомографии для камеры, составляется система уравнений для каждой пары из четырех точек (3):

$$(x_{pj}, y_{pj}, 1)^T = H_g(x'_{pj}, y'_{pj}, 1)^T, \quad (3)$$

где x'_{pj}, y'_{pj} – координаты по оси X и Y точки p_j в мировой системе координат; x_{pj}, y_{pj} – координаты по оси X и Y точки p_j в системе координат камеры, $j \in \{1, 2, 3, 4\}$.

Алгоритм ручной калибровки двух камер системы изображен на рис. 2.

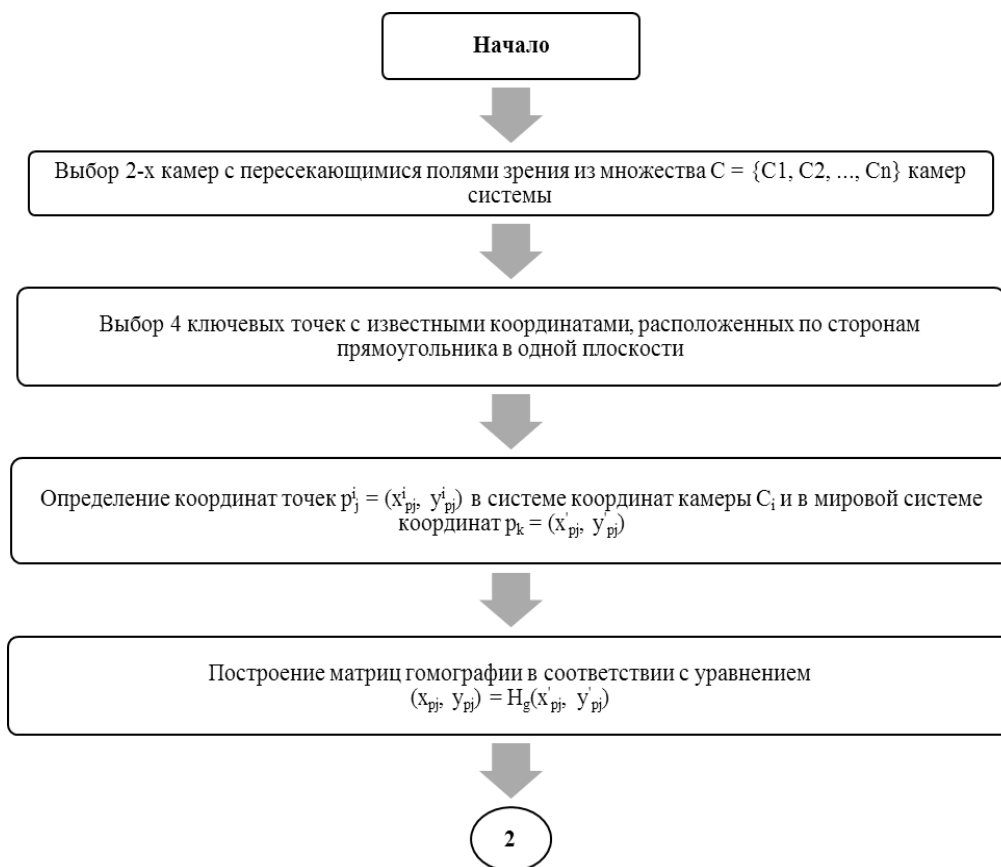


Рис. 2. Алгоритм ручной калибровки двух камер системы с пересекающимися углами обзора

Fig. 2. Algorithm for manual calibration of two cameras of a system with overlapping viewing angles

В результате ручной настройки двух камер системы построены их матрицы гомографии, используемые для автоматической калибровки остальных камер системы по разработанному методу, включающему алгоритмы поиска опорных точек в пересечении полей откалиброванной и неоткалиброванной камер и алгоритм уточнения матрицы гомографии калибруемой камеры. На рис. 3 представлен алгоритм поиска опорных точек в пересечении полей зрения двух камер, позволяющий автоматически откалибровать и вычислить матрицу гомографии очередной j -ой камеры системы.

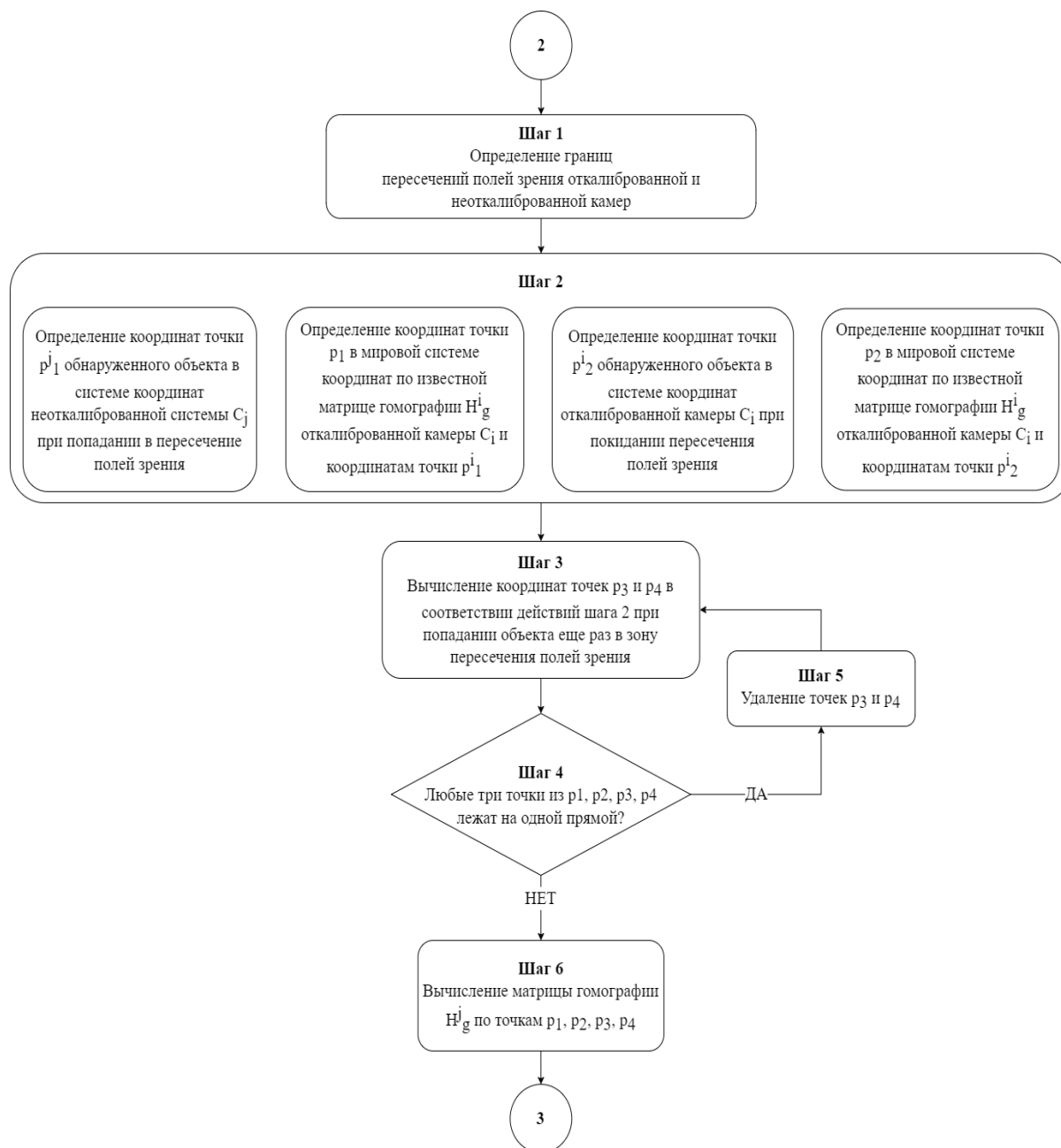


Рис. 3. Поиск опорных точек в пересечении полей зрения двух камер для вычисления матрицы гомографии неоткалиброванной камеры

Fig. 3. Search for reference points in the intersection of the fields of view of two cameras to calculate the homography matrix of the uncalibrated camera

Для нахождения четырех опорных точек в области пересечения полей зрения камер сначала определяются границы пересечений полей зрения камер с помощью алгоритма P. Lehel [9]. Координаты первой точки в мировой системе координат вычисляются по матри-

це гомографии откалиброванной камеры при попадании объекта в поля зрения откалиброванной и неоткалиброванной камер (т.е. при первом появлении ID на изображениях двух камер), а координаты второй – при покидании объектом пересечения полей зрения камер. Аналогично вычисляются координаты третьей и четвертой опорных точек. Далее выполняется алгоритм проективного преобразования для уточнения матрицы гомографии калибруемой камеры, что повышает точность автоматической калибровки камер. После выполнения автоматической калибровки камеры S_j координаты сопровождаемого объекта в рамках полей зрения камер системы видеонаблюдения вычисляются по известным матрицам гомографии и сохраняются в карту перемещений.

Полученные координаты используются для уточнения матриц гомографии следующим образом. Когда объект попадает в поле зрения двух камер, вычисляются его координаты p_5^i и p_5^j в пересечении полей зрения камер S_i и S_j в мировой системе координат. Значения координат, как правило, не совпадают из-за погрешности вычисления матрицы гомографии автоматически калибруемой камеры и погрешности работы детектора движущегося объекта. Эти значения далее используются для уточнения матрицы гомографии калибруемой камеры. Для камер S_i и S_j на основе координат точек p_1, p_2, p_3, p_4 в мировой системе координат и в системе координат камеры строится матрица системы A для каждой из камер. Матрицу A в блочной форме можно представить так (4):

$$A = \begin{bmatrix} Z & O & W_1 \\ O & Z & W_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\text{где } Z = \begin{bmatrix} x'_1 & y'_1 & 1 \\ x'_2 & y'_2 & 1 \\ x'_3 & y'_3 & 1 \\ x'_4 & y'_4 & 1 \end{bmatrix}, O = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, W_1 = \begin{bmatrix} -x_1x'_1 & -x_1y'_1 \\ -x_2x'_2 & -x_2y'_2 \\ -x_3x'_3 & -x_3y'_3 \\ -x_4x'_4 & -x_4y'_4 \end{bmatrix}, W_2 = \begin{bmatrix} -y_1x'_1 & -y_1y'_1 \\ -y_2x'_2 & -y_2y'_2 \\ -y_3x'_3 & -y_3y'_3 \\ -y_4x'_4 & -y_4y'_4 \end{bmatrix}, x'_{pj}, y'_{pj}$$

– координаты по оси X и Y точки p_j в мировой системе координат; x_{pj}, y_{pj} – координаты по оси X и Y точки p_j в системе координат камеры.

Используя матрицу A , построим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), преобразованную к стандартной форме записи следующего вида:

$$A * G_H = B, \quad (5)$$

где A – матрица системы камеры, $G_H = (h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{31}, h_{32})^T$ – вектор-столбец элементов матрицы гомографии, подлежащих определению, $B = (x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4)^T$ – вектор-столбец координат опорных точек из пересечения полей зрения двух камер, записанных в указанном порядке $(x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4)$.

Выполним переход к виду нормальной СЛАУ, помножив части выражений (5) на матрицу A^T :

$$(A^T * A) * G_H = A^T * B. \quad (6)$$

Переход от (5) к (6) эквивалентен поиску преобразования матрицы гомографии H для минимизации евклидова расстояния между $H*x$ и соответствующей ей точкой x' . При решении СЛАУ методом квадратного корня для 5 точек необходимое условие минимума (7):

$$\frac{\partial F(G_H)}{\partial G_H} = 0, \partial F(G_H) = \sum_{i=1}^k ((x_i - \phi_1(x_i, x'_i, y'_i))^2 + (y_i - \phi_2(y_i, x'_i, y'_i))^2), \quad (7)$$

$$\phi_1 = x'_i h_{11} + y'_i h_{12} + h_{13} - x_i x'_i h_{31} - x_i y'_i h_{32},$$

$$\phi_2 = x'_i h_{21} + y'_i h_{22} + h_{23} - y_i x'_i h_{31} - y_i y'_i h_{32},$$

где x'_i, y'_i – координаты по оси X и Y точки p_i в мировой системе координат; x_i, y_i – координаты по оси X и Y точки p_i в системе координат автоматически откалиброванной ка-

меры, $i = 1, \dots, k$, $(h_{11}, h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{31}, h_{32})$ – элементы матрицы гомографии камеры. Тогда элементы матрицы гомографии G_H находятся из уравнения (6):

$$\begin{pmatrix} Z^T Z & 0 & W_1 \\ 0 & Z^T Z & W_2 \\ W_1^T * Z & W_2^T * Z & W_1^T * W_1 + W_2^T * W_2 \end{pmatrix} * G_H = \begin{pmatrix} Z^T B_1 \\ Z^T B_2 \\ W_1^T * B_1 + W_2^T * B_2 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

После выполнения операций уточнения и построения новой матрицы гомографии калибруемой камеры вновь вычисляем координаты пяти точек в мировой системе. Проводим вычисление евклидова расстояния между всеми парами точек и удаляем ту пару, расстояние между образами которых оказалось наибольшим, после чего из карты перемещений выбираем для вычислений новую пару точек и повторяем алгоритм уточнения матрицы гомографии. Реализуем данный алгоритм, пока евклидово расстояние для всех точек не будет меньше или равно требуемой погрешности. Алгоритм уточнения матрицы гомографии калибруемой j -й камеры приведен на рис. 4.

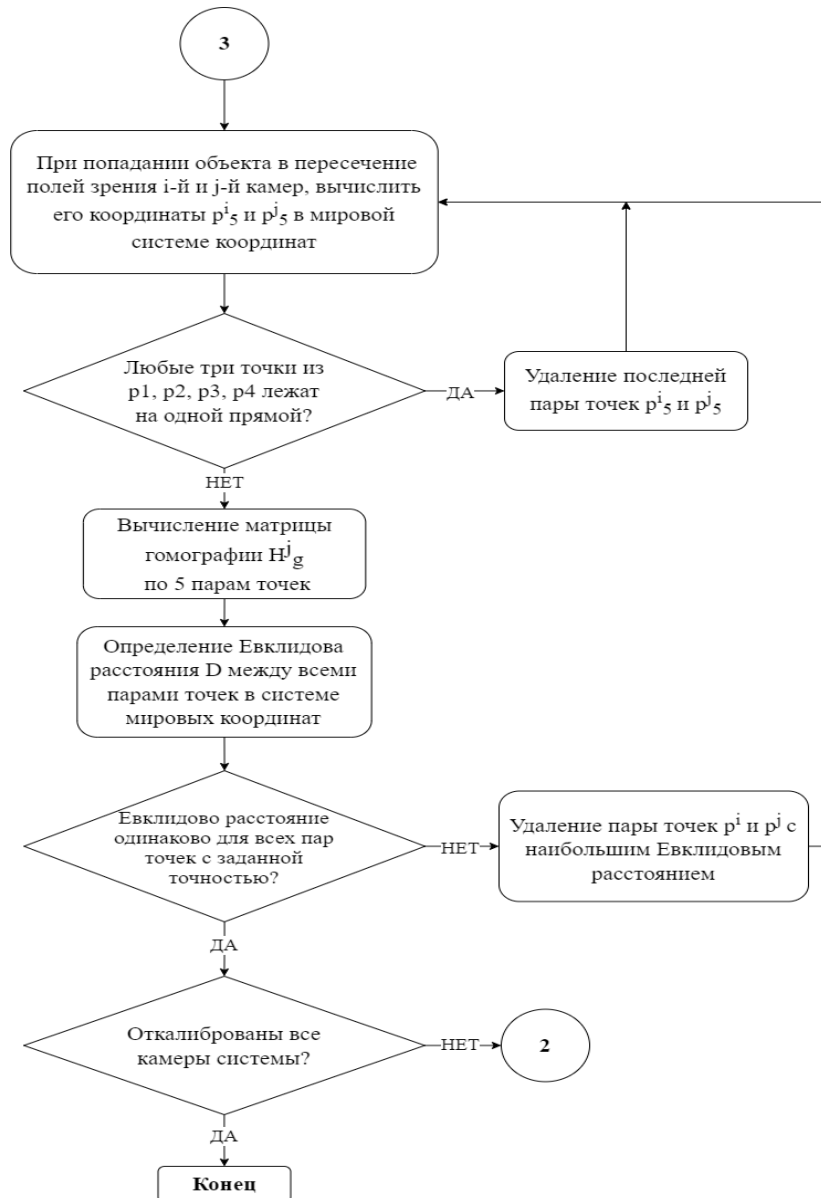


Рис. 4. Алгоритм уточнения матрицы гомографии автоматически калибруемой камеры

Fig. 4. Algorithm for refining the homography matrix of an automatically calibrated camera

Алгоритмы автоматической калибровки очередной камеры системы и уточнения ее матрицы гомографии с целью повышения точности автоматической калибровки проводятся для каждой пары откалиброванной и неоткалиброванной камер системы до тех пор, пока все камеры не будут откалиброваны.

3.2. Алгоритм сшивки видео в многокамерных системах

При сшивке изображений с видеопотоков в единую панораму будем использовать цилиндрическую проекцию, так как прямоугольная система координат может существенно преувеличить перспективу по мере увеличения угла обзора, что приводит к видимому завалу объектов к границам кадра. Для проведения панорамной сшивки предлагается использовать комбинацию алгоритмов цветовой коррекции и градиентного смешивания, что минимизирует видимость шва между стыкуемыми изображениями. Для выбора оптимального алгоритма цветовой коррекции проведено исследование двух подходов – цветовой коррекции на основе опорного изображения и линейной цветовой коррекции. В результате выполнено их объединение для повышения точности результата. Алгоритм цветовой коррекции на основе опорного изображения представлен на рис. 5. На первом шаге выбирается опорное изображение, на 2-5 шагах остальные изображения с камер подстраиваются под его уровень распределения яркости.

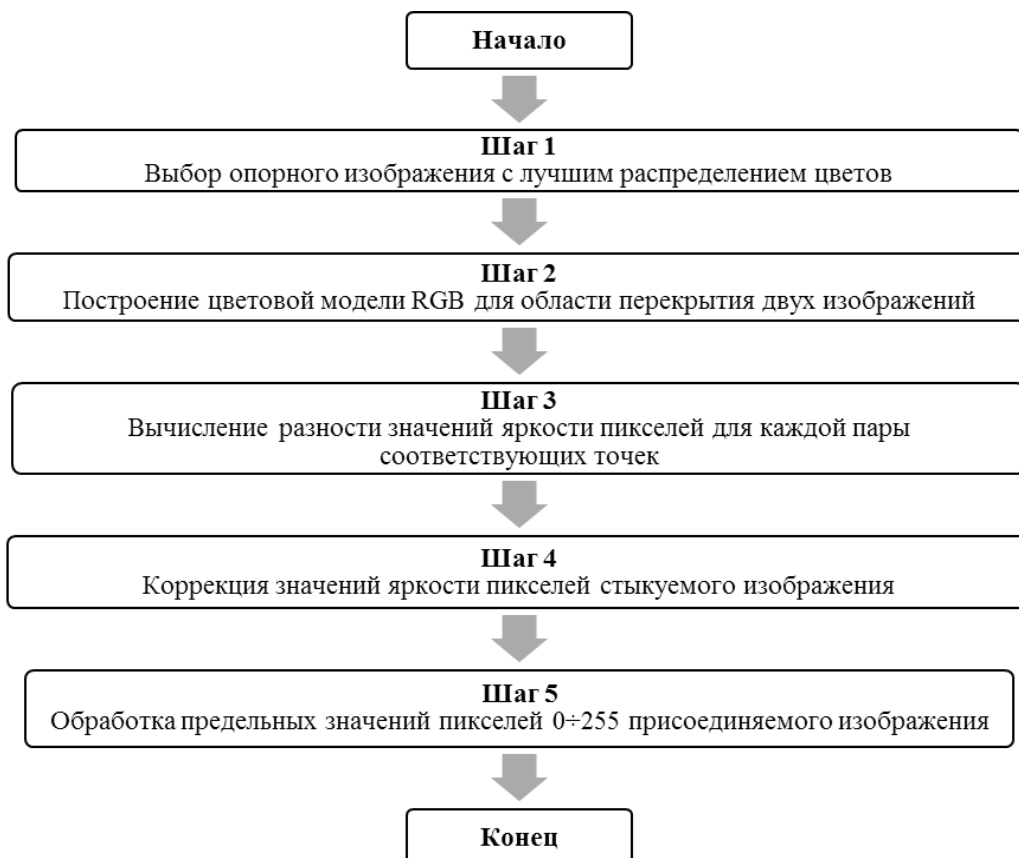


Рис. 5. Выполнение цветовой коррекции на основе опорного изображения

Fig. 5. Color correction based on the reference image

Шаг 1. При выборе опорного изображения, на основе которого будет проводиться коррекция цвета соседних, для каждого из поступающих изображений с видеопотоков камер рассчитывается распределение цветов в каждом из каналов RGB, и строится гистограмма распределения цветов. При построении гистограммы используем метод *cv2.calcHist* библио-

теки *OpenCV*. Для нахождения изображения с лучшим распределением цветов рассчитываем среднее значение яркости каждого из каналов RGB для всех полученных с камер сцены изображений, а также среднеквадратичное отклонение яркости от этих значений. Затем выбираем изображение, для которого среднеквадратичное отклонение наименьшее, и считаем его опорным.

Шаг 2. Область перекрытия двух изображений содержит характеристики распределения яркости этих двух изображений. Построим цветовую модель RGB двух изображений в области общего поля зрения камер, для чего определим значения яркости его R, G и B составляющих из RGB-гистограммы и рассчитаем средние значения серого цвета для каждой пары опорных точек M1 и M2 из области пересечения полей зрения камер (9):

$$M_k = \frac{1}{w \cdot h} \sum_{j=0}^h \sum_{i=0}^w \frac{R_k + G_k + B_k}{3}, \quad k = \overline{1,2}, \quad (9)$$

где w – ширина изображения, h – высота изображения.

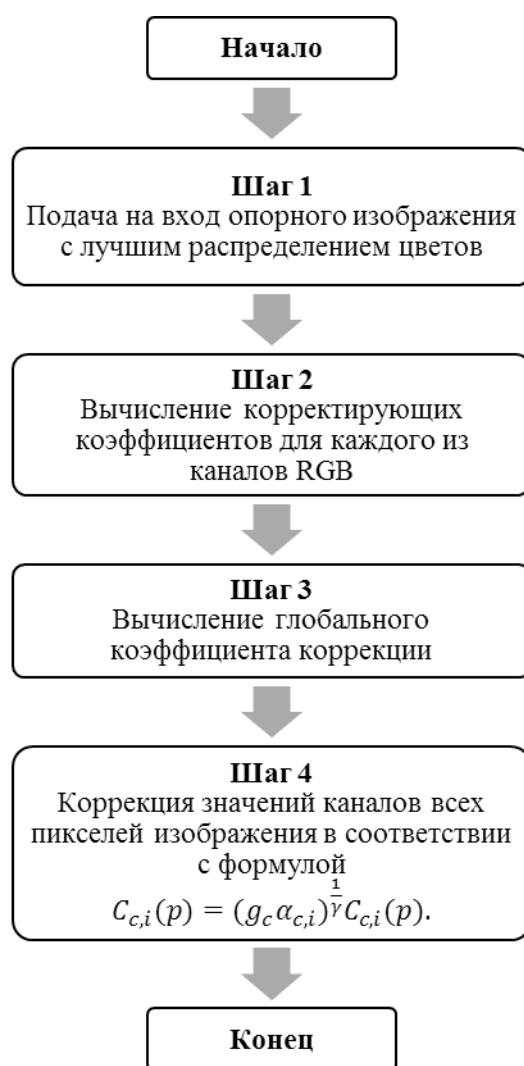


Рис. 6. Алгоритм линейной цветовой коррекции

Fig. 6. Linear color correction algorithm

Шаг 3. Для каждой пары соответствующих точек в области перекрытия двух изображений вычислим разность значений яркостей пикселей (10):

$$diff = M_1 - M_2. \quad (10)$$

Шаг 4. Значения яркости всех пикселей стыкуемого изображения корректируем на полученную величину (11):

$$Dst(i, j) = Res(i, j) + diff, \quad (11)$$

где $Res(i, j)$ – значение пикселей до коррекции, $Dst(i, j)$ – скорректированное значение пикселей.

Шаг 5. Так как максимальное значение яркости пикселей не может превышать значения 255, при коррекции цвета по формуле (11) необходимо выполнить обработку предельных значений пикселей – 0 и 255 присоединяемого изображения.

$$Dst(i, j) = \begin{cases} 0 & Dst(i, j) \leq 0 \\ Dst(i, j) & 0 < Dst(i, j) < 255 \\ 255 & Dst(i, j) \geq 255 \end{cases} \quad (12)$$

Из-за неправильного выбора опорного изображения результат сшивки панорам может быть слишком светлым, что затрудняет стыковку с общей панорамой. Чтобы решить эту проблему, возникающую при использовании цветовой коррекции на основе опорного изображения, предлагается вычислить корректирующие коэффициенты для каждого из цветовых каналов R, G и B с использованием алгоритма линейной коррекции цвета.

Алгоритм линейной цветовой коррекции представлен на рис. 6 и в качестве входных данных использует опорное изображение, выбранное на шаге 1 работы алгоритма коррекции цвета. При работе алгоритма линейной цветовой коррекции используется последовательность изображений с n камер и зон их перекрытия S_i ($i = 1, \dots, n$), схематичное изображение перекрытий приведено на рис. 7.

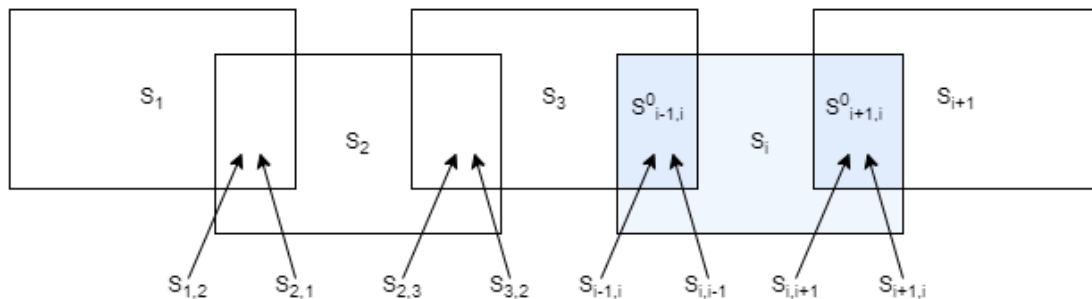


Рис. 7. Изображения с перекрывающимися областями в многокамерной системе

Fig. 7. Images with overlapping areas in a multi-camera system

Алгоритм линейной цветовой коррекции заключается в следующем.

Шаг 1. Обозначим перекрывающиеся области зрения камер относительно области зрения i -й камеры S_i ($i = 1, \dots, n$) с левой стороны – $S_{i,i-1}$, с правой – $S_{i,i+1}$. Обозначим $S_{i-1,i}^0$ и $S_{i+1,i}^0$ – области перекрытия, принадлежащие изображению S_i (рис. 7).

Для вычисления корректирующих коэффициентов $\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B$ для каждого из каналов RGB используем линейную коррекцию, представленную в виде диагональной модели (13):

$$S_i = S_{i-1} * M, M = \begin{bmatrix} \alpha_R & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_G & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_B \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где M – диагональная модель матрицы трансформации, $\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B$ – коэффициенты цветовой коррекции R, G, B соответственно.

Вычисление корректирующих коэффициентов проводится следующим образом (14):

$$\alpha_c = \frac{\overline{C_{R,i-1}}}{\overline{C_{R,i}}}, \quad (14)$$

где $\overline{C_{c,i-1}}$, $\overline{C_{c,i}}$ – средние значения R, G, B для $S_{i-1,i}^0$ и $S_{i,i-1}^0$, $c \in \{R, G, B\}$, а α_c , $c \in \{R, G, B\}$ – среднее значение цвета в области пересечения полей зрения для каждого канала RGB.

Вычисляем локальный коэффициент коррекции $\alpha_{c,i}$ в линейном цветовом пространстве для изображения S_i по следующей формуле (15):

$$\alpha_{c,i} = \frac{\sum_p (C_{c,i-1}(p))^\gamma}{\sum_p (C_{c,i}(p))^\gamma}, \quad (15)$$

где $C_{c,i}(p)$ – значение цвета пикселя p цветового канала c изображения S_i^0 ; γ – гамма-коэффициент ($\gamma = 2,2$) [17]. Для эталонного изображения, относительно которого будут корректироваться последующие изображения, коэффициент коррекции устанавливаем равным 1.

Шаг 2. Чтобы избежать перенасыщения или потери контраста, необходимо минимизировать величину каждого коэффициента коррекции. Для этого используем квадратичную функцию с параметром g_c , что позволяет избежать перенасыщения или потери контраста (16):

$$E = \min_{g_c} \sum_{i=1}^n (g_c \alpha_{c,i} - 1)^2, \quad (16)$$

где g_c – коэффициент глобальной компенсации для цветового канала c ; n – количество изображений; $\alpha_{c,i}$ – коэффициент коррекции канала c для i -го изображения.

Для поиска экстремума приравняем ее производную к нулю, $\frac{\partial E}{\partial g_c} = 0$, в результате получим оптимальное значение коэффициента глобальной компенсации (17):

$$g_c = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_{c,i}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{c,i}^2}. \quad (17)$$

Шаг 3. С помощью коэффициентов коррекции выполняем компенсацию цвета для всего изображения S_i . Для этого проведем изменение коэффициента коррекции в соответствии с выражением следующего вида (18):

$$(\alpha C_{c,i}^\gamma)^\frac{1}{\gamma} = \alpha^\frac{1}{\gamma} C_{c,i}. \quad (18)$$

Шаг 4. Применив далее эту идею для g_c и α_c , с помощью линейной коррекции цвета изменим значения каналов всех пикселей изображения на определенное значение. Таким образом, итоговый метод цветокоррекции отдельно корректирует значения каналов всех пикселей изображения на некоторую величину согласно выражению (19):

$$C_{c,i}(p) = (g_c \alpha_{c,i})^\frac{1}{\gamma} C_{c,i}(p). \quad (19)$$

В результате применения алгоритма линейной коррекции цвета при сшивке изображений в панораму цветовой переход становится более плавным, чем при цветовой коррекции с помощью алгоритма на основе опорного изображения. Однако из-за сильной разницы в цвете между изображениями применение только цветовой коррекции бывает недостаточно для полного избавления от шва между стыкуемыми изображениями, поэтому дополнительно, после проведения цветовой линейной коррекции, предлагается проводить градиентное смешивание.

Исследования в области градиентного смешивания по оптимальному шву показали, что алгоритм линейного градиентного смешивания дает видимый эффект размытия [10], алгоритмы Пуассоновского и многополосного смешивания являются затратными по времени и вычислительным мощностям [11]. Лучшее решение данной проблемы дает алгоритм градиентного смешения n -ой степени, который вычисляет значение цветового канала на линии смешения путем нахождения среднего значения двух соответствующих значений цветовых каналов пересекающихся пикселей на двух изображениях. При удалении от линии смешения весовой коэффициент одного изображения увеличивается до 1, в то время как другой коэффициент уменьшается до 0 согласно выражению [12]:

$$C'_I(p) = \frac{d_1^n C_I(p) + d_2^n C_S(p)}{d_1^n + d_2^n}, \quad (20)$$

где $C'_I(p)$ – новое значение цвета пикселя p в полученном панорамном изображении I ; $C_I(p)$ – цвет пикселя p в исходном изображении I ; $C_S(p)$ – цвет пикселя p в перекрывающемся изображении S ; d_1 и d_2 – расстояния от границы смешения между двумя изображениями до границы области смешения.

Для проведения градиентного смешивания в работе используется метод *GraphCutSeamFinder* библиотеки компьютерного зрения *OpenCV*. Для определения оптимального пути сшивки выполняется поиск пути минимальной стоимости на графе, узлами которого являются пиксели области перекрытия двух изображений, применяемого для создания полностью плавного перехода [13]. Работа по созданию панорамного кадра завершается нахождением максимально вписываемого прямоугольника, по которому производится обрезка панорамы.

Заключение

Разработан и реализован метод сшивки изображений с видеопотоков в панораму, представляющий собой комбинацию алгоритмов калибровки систем камер, цветовой коррекции входных изображений и градиентного смешивания, повышающий скорость построения панорамы, сокращающий вычислительные затраты, повышающий точность калибровки камер за счет автоматизации процесса и участия оператора только на начальном этапе калибровки двух первых камер. Представленный метод построения панорамы позволяет строить эффективные многокамерные системы видеонаблюдения и аналитики, работающие в режиме реального времени.

Для реализации алгоритмов использовался язык *Python* с использованием инструментов библиотеки компьютерного зрения *OpenCV*. Создан экспериментальный стенд, включающий пять камер высокого разрешения *Tantos* – 1280x1960 пикселей, передающих цветное видеоизображение, монитор, одноплатный компьютер *Raspberry PI 4B*, вычислительный модуль *Intel neural stick 2*, видеорегистратор, аппаратная платформа *Arduino Mega* на базе микроконтроллера *ATmega 2560*. Проведенные эксперименты показали, что для одного кадра общее время, затрачиваемое на прохождение алгоритма, составляет около 35 миллисекунд.

Библиографический список

1. Багиров, М.Б. Обработка больших данных с целью создания системы определения геопозиции по фотографиям местности // О.П. Тимофеева, М.М. Гордеев, А.Н. Райцын, А.А. Дмитриев, А.Д. Тряскова, М.Б. Багиров // Информационные системы и технологии ИСТ-2020: сборник материалов XXVI Международной научно-технической конференции. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. С. 716-721.
2. Agarwala, A. Interactive digital photomontage / A. Agarwala, M. Dontcheva, M. Agrawala, S. Drucker, A. Colburn, B. Curless, D. Salesin, and M. Cohen // ACM Trans. Graph, vol. 23, pp. 294-302, 2004.

3. **Abbas, Q.** Reduced Solution Set Shortest Path Problem: Capton Algoritm With Special Reference To Dijkstra's Algorithm / Abbas, Q., Hussain, Q., Zia, T. & Mansoor, A. // Malaysian Journal of Computer Science, pp. 175-187.
4. **Жуковская, А.Н.** Алгоритм соединения двух изображений при создании панорамного изображения / А.Н. Жуковская, М.Н. Фаворская // Решетневские чтения. 2018. С. 264-266.
5. **Khamiyev, I.**, Issa, D., Akhtar, Z. et al. Panoramic image generation using deep neural networks. Soft Comput (2023). DOI: 10.1007/s00500-023-08056-5
6. **Dasari, R.** Reference Image Based Color Correction for Multi-camera Panoramic High Resolution Imaging / Dasari, R.; Zhang, D.-Q.; Chen, C.W // In Proceedings of the 2016 13th Conference on Computer and Robot Vision (CRV), Victoria, BC, Canada, 1 June 2016, pp. 410-415.
7. **Козин, Е.В.** Фотограмметрия СПб: Университет ИТМО / Е.В. Козин, А.Г. Карманов, Н.А. Карманова. 2019. С. 142.
8. **Шабалин, А.С.** Трансферное обучение на основе архитектуры нейронной сети EfficientNetV2B0 в задаче построения 3D маски лица человека / А.С. Шабалин, И.М. Елисеев // Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. 2022. № 2. С. 123-129.
9. **P. Lehel**, E.E. Nemayed and A.A. Farag. Sensor Planning for a Trinocular Active Vision System // In Proceedings of IEEE Computer Society Conference of Computer Vision and Pattern Recognition, Fort Collins, CO, 1999, vol. 2, pp. 306-312.
10. **V. Rankov**, In Three-Dimensional and Multidimensional Microscopy / V. Rankov, R.J. Locke, R.J. Edens, P.R. Barberand B. Vojnovic // Image Acquisition and Processing XII, vol. 5701, pp. 190-199, 2005.
11. **Пахирка, А.И.** Создание панорамных аэрофотоснимков с использованием квадрокоптера / А.И. Пахирка, А.Г. Зотин, В.В. Буряченко // Программные продукты и системы. 2018. С. 362-367.
12. **Rajaram, M. Gowda.** Development of Image Stitching Using Feature Detection and Feature Matching Techniques // 2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON), pp. 1-7.
13. **V. Kwatra.** Graphcut textures: image and video synthesis using graph cuts / Vivek Kwatra, Arno Schödl, Irfan Essa, Greg Turk, and Aaron Bobick // In ACM Transactions on Graphics (ToG), volume 22, pp. 277-286. ACM, 2003.

*Дата поступления
в редакцию: 06.07.2023*

*Дата принятия
к публикации: 01.11.2023*

УДК 004.045

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_20

О МЕСТЕ МОДЕЛИ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ В СТРУКТУРЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРИЛОЖЕНИЯ

С.В. Логанов

ORCID: 0000-0002-7302-4586 e-mail: loganovserg@yandex.ru

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

Обосновано, что все зависимости слоев архитектуры разрабатываемой программной системы должны быть направлены в сторону модели предметной области, а интерфейсы необходимо вводить лишь по мере появления дополнительных требований к масштабированию и мультиплатформенности. Актуальность работы определяется тем, что традиционная трехслойная архитектура обладает существенным ограничением – транзитивной зависимостью от нижележащего слоя. Применение принципа инверсии зависимостей к нижележащему слою вынуждает преждевременно проектировать интерфейсы, которые не позволяют полноценно решить задачу заменяемости слоев в условиях недостаточно точно сформулированных требований. Преимущества объектно-ориентированного программирования могут быть полноценно реализованы только при проектировании архитектуры на основе модели предметной области.

Ключевые слова: объектно-ориентированное программирование, объектно-ориентированное проектирование, архитектура ПО, принцип DIP, принципы проектирования компонентов.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Логанов, С.В. О месте модели предметной области в структуре объектно-ориентированного приложения // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 20-26.
DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_20

POSITION OF THE DOMAIN MODEL IN OBJECT-ORIENTED APPLICATION ARCHITECTURE

S.V. Loganov

ORCID: 0000-0002-7302-4586 e-mail: loganovserg@yandex.ru

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

Abstract. All dependencies of the architecture layers of the developed software system should be directed towards the domain model, while interfaces should be introduced only when an additional requirement for scaling and multiplatform appear. The relevance of the study lies in the fact that traditional three-layer architecture has a significant limitation, namely, a transitive dependence on the underlying layer. The principle of dependency inversion is applied to the underlying layer, which forces premature design of interfaces that do not allow to fully solve the problem of layer interchangeability in conditions of insufficiently precisely formulated requirements. The benefits of object-oriented programming can only be fully realized when designing a domain model-based architecture.

Key words: object-oriented programming, object-oriented design, software architecture, DIP principle, package principles.

FOR CITATION: Loganov S.V. Position of the domain model in object-oriented application architecture. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 20-26. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_20

Введение

Объектно-ориентированное программирование (ООП) разрабатывалось как возможность программировать не в терминах вычислительной системы, а в терминах естественной предметной области, на которую направлено разрабатываемое приложение. Следовательно,

достоинства ООП в полной мере могут проявиться лишь при проектировании архитектуры приложения на основе модели предметной области. Данная модель в высшей степени подходит для приложений большой сложности, поскольку максимально использует возможности объектной ориентации и облегчает получение подлинного соответствия решаемым задачам.

Архитектура построения объектно-ориентированных приложений существенно влияет как на качество функционирования программной системы, так и на эффективность ее поддержки и масштабирования. Построение гибкой архитектуры позволяет выполнять эффективную модернизацию программной системы, поддерживая ее постоянную актуальность. Традиционное расположение модели предметной области в трехслойной архитектуре в качестве слоя бизнес-логики приводит к ее зависимости от слоя управления данными [1], что препятствует как эффективной модернизации самой бизнес-логики, так и использованию дополнительной инфраструктуры.

Построение структуры объектно-ориентированных приложений

Типовая архитектура программной системы предполагает ее расслоение на три уровня [2] (рис. 1). Ее основной особенностью является использование слоя верхнего уровня услуг, предоставляемых нижележащим уровнем, никак не связанным с верхним. Таким образом, от вышележащих уровней скрыты дополнительные нижележащие слои, позволяющие поэтапно выполнить сложную задачу. При этом отдельный слой воспринимается как самостоятельное целое, которое может базироваться на различной реализации нижележащих слоев.



Рис. 1. Пример традиционного разбиения системы на слои

Fig. 1. An example of the traditional splitting the system into layers

Кардинальным преимуществом трехслойной архитектуры является возможность замены нижележащих слоев. Однако замена слоя бизнес-логики – основной ценности программной системы – обоснована только для решения конкретных задач. Иными словами, нет необходимости обеспечивать заменяемость бизнес-логики для каждой программной системы. Помимо этого, простое разбиение программной системы на слои приводит к их транзитивной зависимости друг от друга [1]. Существуют слои высокого уровня, устанавливающие определенные бизнес-правила, но на них влияют детали реализации слоев нижнего уровня. Если слои высокого уровня зависят от нижележащих, довольно сложно использовать их в различных контекстах, расширяя выпуск полезных приложений на новых платформах. Поэтому слои, содержащие описания и реализующие бизнес-правила высокого уровня, должны иметь определенную независимость и приоритет перед слоями, обеспечивающими выполнение функций обслуживания.

В качестве решения данной проблемы предлагается проведение границ между слоями, т.е. использование принципа инверсии зависимостей (DIP), в котором каждый слой верхнего уровня объявляет абстрактный интерфейс для необходимых служб, а каждый нижележащий

слой выполняет его реализацию (рис. 2) [3]. Это разрывает жесткую зависимость слоев верхнего уровня от слоев нижнего уровней: нижележащие слои и соответствующие им компоненты зависят от абстрактных служебных интерфейсов, объявленных в верхних слоях.

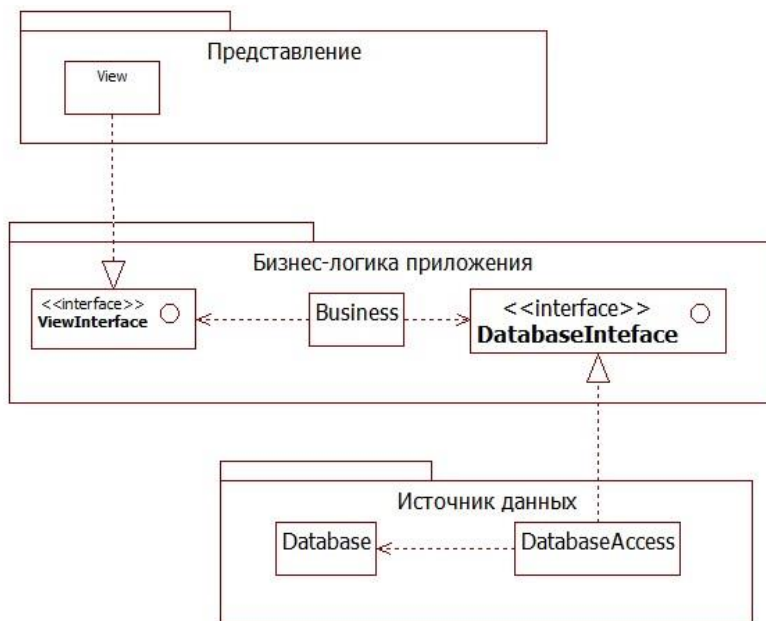


Рис 2. Разбиение системы на слои с использованием DIP

Fig. 2. Splitting the system into layers using DIP

Однако в данном случае появляется обратная зависимость, согласно которой невозможно разработать слой источника данных или представления без знания интерфейсов слоя бизнес-логики. Таким образом, графические библиотеки и библиотеки доступа к данным невозможно разработать без знания соответствующих интерфейсов и под каждый новый слой бизнес-логики придется разрабатывать новую библиотеку. Поэтому компоненты доступа к данным и представления должны реализовывать собственные интерфейсы, соответствующие тем задачам, которые они выполняют. При этом необходимо наличие связующих слоев, выполняющих реализацию задач представления и хранения с помощью готовых библиотек или фреймворков. Тем не менее, высокоуровневый слой бизнес-логики должен быть всегда изолирован (независим) от деталей его представления или сохранения с помощью различных промежуточных слоев; ввод интерфейсов также предполагает заменяемость слоев представления и источника данных. На ранних этапах разработки часто неизвестно, насколько популярным окажется программный продукт, соответственно, неизвестны и требования к его масштабируемости и многоплатформенности. Поэтому отсутствие таких требований не позволяет качественно спроектировать соответствующие интерфейсы, либо приводит к огромным затратам при построении решения для всех возможных случаев.

В [4] представлена более простая модель архитектуры программной системы, в которой все зависимости просто обращены к модели предметной области без обязательного использования интерфейсов (рис. 3). Здесь бизнес-слой разделен на две независимые части: слой приложения и слой модели предметной области. В модели предметной области определяются бизнес-объекты, которые обеспечивают возможность решения бизнес-задач, соблюдения бизнес-правил и структуру взаимосвязей этих бизнес-объектов. Таким образом, модель предметной области определяет пространство решений, а слой приложения определяет, как выполняется та или иная конкретная задача с помощью данной модели (пространство реализации). В слое приложения располагается набор классов, которые реализуют выполнение пользовательских сценариев использования, и которые предлагается называть контроллерами системных событий [5]. В [3] рассматривается аналог таких контроллеров (интеракторов), каждый из которых соответствует ровно одному пользовательскому сценарию. В [5]

приведена более развитая классификация контроллеров, разделяющая системные события на пять видов. Слоеная архитектура допускает обращение верхних слоев к нижним, минуя некоторые слои, однако нужно учитывать, что при этом минимизируется принципиальная возможность замены нижележащего слоя. На рис. 3 также отсутствуют связующие слои, изолирующие бизнес-логику от используемых фреймворков, без которых невозможна разработка ни одной современной системы.

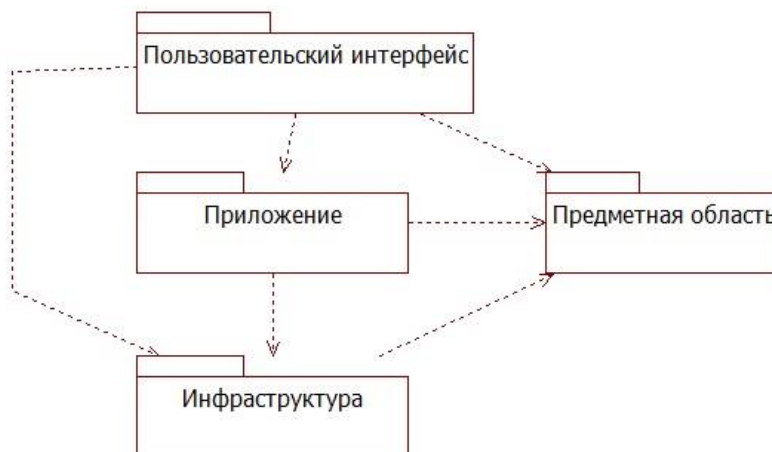


Рис. 3. Разбиение системы на слои с использованием зависимости от предметной области

Fig. 3. Splitting the system into layers using dependence on domain model

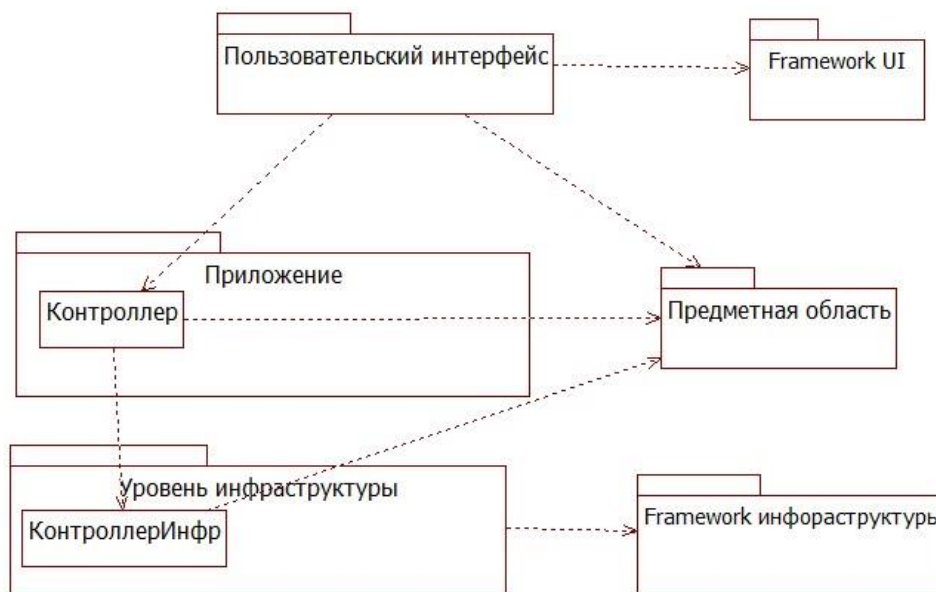


Рис. 4. Архитектура программной системы, не требующей замены обслуживающих слоев

Fig. 4. The architecture of a software that does not require the replacement of service layers

На рис. 4 приведена архитектура системы, в которой связующие слои пользовательского интерфейса и инфраструктуры непосредственно зависят от модели предметной области. Прямая зависимость от модели предметной области вполне оправдана в силу трех причин. Во-первых, программная система разрабатывается ради реализации соответствующих бизнес-правил и решения задач некоторого вида бизнеса и, следовательно, не нуждается в повторном использовании, поскольку для другого вида бизнеса следует разработать другую программную систему. Во-вторых, соответствующий вид бизнеса является достаточно стабильным и, как правило, редко претерпевает кардинальные изменения. Поэтому, согласно

принципу стабилизации зависимостей, зависимость от модели предметной области является оправданной. В-третьих, элементы бизнес-модели, которые подвергаются частым изменениям, как правило, известны уже заранее, и для них могут быть построены соответствующие решения, допускающие их расширение.

Связующий слой пользовательского интерфейса зависит как от модели предметной области, так и от контроллеров системных событий, которые реализуют логику выполнения сценариев использования с помощью бизнес-объектов. Таким образом, пользовательский интерфейс занимается отображением и представлением бизнес-объектов, а за выполнением каких-либо действий обращается к слою приложения. Переход на другую модель представления или к пакетной обработке приведет к необходимости разработки нового слоя пользовательского интерфейса с использованием соответствующего фреймворка, а расширение способов использования – к разработке новых контроллеров, обеспечивающих выполнение новых сценариев. Контроллеры, расположенные в слое приложения для выполнения задач сохранения и восстановления бизнес-объектов, могут и должны обращаться к контроллеру инфраструктуры, который должен быть единственным и являться фасадом уровня инфраструктуры. Уровень инфраструктуры получает, сохраняет и возвращает бизнес-объекты модели предметной области. При этом слой модели предметной области должен содержать достаточное количество конструкторов бизнес-объектов в оперативной памяти, либо соответствующие фабрики таких объектов, имеющих сложную структуру для инициализации, а слой инфраструктуры обеспечит изменение их состояния, в соответствии с полученной или прочитанной информацией из какого-либо источника. Предполагается, что современные каркасы объектно-реляционного отображения могут оперировать простыми объектами *POJO* (*Plain Old Java Object*) или *POCO* (*Plain Old CLR Object*), однако они все равно требуют указания дополнительных атрибутов, которые не позволяют сделать их полностью независимыми от инфраструктуры сохранения. Поэтому инфраструктурный слой должен восстанавливать и сохранять именно бизнес-объекты. Данная структура не делает ничего лишнего, но позволяет подготовиться к дальнейшему масштабированию. Приложению обычно лучше подходит код, специфичный для проекта и его модели предметной области. Абстрактные универсальные решения не представляют практической ценности, и разработчикам проекта лучше иметь код, который распознает ожидаемое поведение приложения и концепции предметной области [6].

При появлении новых требований к использованию различных инфраструктурных слоев необходимо выполнить анализ публичного интерфейса контроллера инфраструктуры, на основе которого, в зависимости от появившихся требований, в слое приложения создаются один или несколько интерфейсов. Необходимость второго, а лучше третьего заменяемого инфраструктурного слоя позволяет более качественно спроектировать такие интерфейсы и существенно снизить возможные неявные зависимости. Кроме этого, наличие дополнительных требований позволяет эффективнее определить состав связующих слоев, формируя на их основе отдельные пакеты. При необходимости построения распределенного приложения и отдельного масштабирования его частей потребуются очередная модернизация архитектуры его построения за счет разделения ее на физические компоненты, выполняющиеся в отдельных процессах (рис. 5).

Поскольку между различными процессами, особенно удаленными, возможна и оптимальна передача только информации, необходимо проектирование *API* (*Application Program Interface*) бизнес-слоя, которое принимает и получает команды и данные. При этом *API* лучше сразу строить на основе шаблона разделения команд и запросов *CQRS* (*Command Query Responsibility Segregation*), который позволяет повысить масштабируемость получаемого решения. Для различных слоев пользовательского интерфейса необходим свой интерпретатор команд и данных, который позволяет запускать и получать результаты выполнения соответствующих сценариев использования приложения. Данный интерпретатор команд получив необходимую команду формирует требуемые бизнес-объекты и обращается к соответствующим

щему контроллеру приложения для ее выполнения и получения ее результатов. Далее бизнес-объекты преобразуются в информационные объекты *XML*, *JSON* или объекты (сообщения) какого-либо другого формата, которые и передаются в качестве результатов выполнения соответствующей команды.

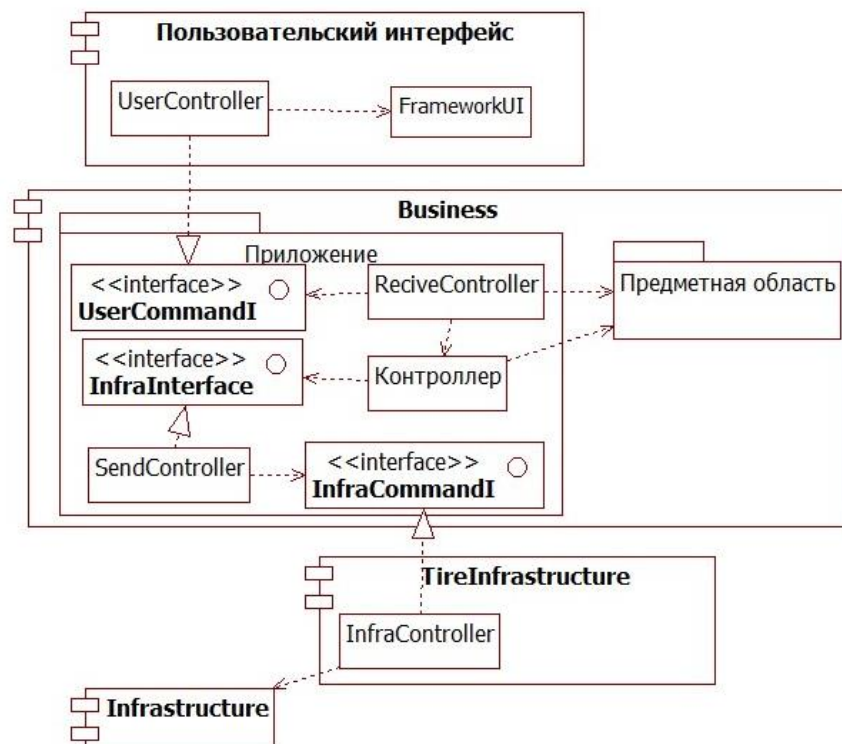


Рис. 5. Разбиение системы на слои функционирующих в различных процессах

Fig. 5. Splitting the system into layers functioning in various processes

Аналогичную процедуру в обратном направлении выполняет интерпретатор команд приложения, который на основе требуемых действий и соответствующих бизнес-объектов формирует инфраструктурные команды, содержащие необходимую информацию. При этом соответствующий промежуточный слой инфраструктуры, возможно и не один, выполняет данные команды, возвращая необходимую информацию, которая затем преобразуется в соответствующие бизнес-объекты. При этом интерпретаторы команд пользовательского и инфраструктурных слоев или их соответствующее *API* не следует объединять в единое целое, поскольку они имеют принципиально разные причины для изменения и, согласно принципу *SRP*, должны быть разделены. При наличии слишком сложной предметной области и необходимости раздельного масштабирования отдельных частей бизнес-логики, т.е. разделения ее на отдельные независимые вычислительные процессы, необходимо переходить на т.н. гексагональную архитектуру [7]; в ней модель предметной области может быть разделена на отдельные относительно независимые подобласти, взаимодействие между которыми осуществляется с помощью событий предметной области. Соответственно, появляется необходимость построения дополнительных портов и адаптеров (т.е. интерфейсов и контроллеров команд) для обработки событий предметной области. Количество таких интерпретаторов команд или соответствующих *API* будет зависеть от количества подобластей и их организации в соответствующие иерархии. Термин *гексагональная архитектура* в большей мере свидетельствует о необходимости множества портов и адаптеров для объединения множества подмоделей предметной области и связующих слоев в единую распределенную систему, чем о конкретном их количестве. Следовательно, чем больше подобластей предполагает деление модели предметной области, тем больше промежуточных слоев, содержащих порты и адап-

теры, требуется разрабатывать, поскольку каждая подобласть выделена в отдельный компонент (сервис) и, соответственно, имеет свои причины для изменения.

Таким образом, по мере развития и распространения бизнес-приложения может возникнуть потребность универсализации и независимого масштабирования его частей, которые приводят к существенному увеличению затрат на его проектирование, реализацию, развертывание и поддержку. Труднее всего при этом изменять интерфейсы и API бизнес-логики, которые обеспечивают взаимодействие приложения с окружающим миром. Можно заключить, что преждевременное принятие решений в условиях неопределенности, делает успех маловероятным.

Выводы

Программная система оценивается с точки зрения ее поведения и структуры. Разработчики, как правило, сосредотачиваются на реализации необходимого поведения, не уделяя достаточного внимания архитектуре построения программной системы. Однако для обеспечения длительного жизненного цикла ПО важна возможность его легко изменить и масштабировать. Соответственно, проектирование архитектуры системы должно проводиться только на основе актуальных на данный момент бизнес-требований. Проработка архитектуры позволяет выбрать подходящее для актуальных задач решение, снизив финансовые затраты на разработку.

С другой стороны, проектирование объектно-ориентированной программы является процессом постепенных открытий, зависящих от оперативной обратной связи [8]. В противном случае, при проектировании очень гибкой архитектуры без достаточных оснований, неизбежны неоправданные финансовые затраты и снижение эффективности решения. Грамотные практики построения архитектуры программной системы позволят получить фундамент, на котором возможно дальнейшее масштабирование полученного решения.

Библиографический список

1. **Мартин, Р.** Принципы, паттерны и методики гибкой разработки на языке С# / Р. Мартин, М. Мартин. – СПб.: Символ-Плюс, 2011. – 768 с.
2. **Фаулер, М.** Архитектура корпоративных программных приложений / М. Фаулер. – М.: ИД «Вильямс», 2006. – 544 с.
3. **Мартин, Р.** Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения / Р. Мартин. – СПб.: Питер, 2018. – 352 с.
4. **Нильсон, Д.** Применение DDD и шаблонов проектирования. Проблемно-ориентированное проектирование приложений с примерами на С# и .NET / Д. Нильсон – М.: ООО И.Д. «Вильямс», 2008. – 560 с.
5. **Ларман, К.** Применение UML2.0 и шаблонов проектирования. Введение в объектно-ориентированный анализ и проектирование: учеб. пособие / К. Ларман. – М.: ИД «Вильямс», 2008. – 736 с.
6. **Нобак, М.** Принципы разработки программных пакетов: Проектирование повторно используемых компонентов / М. Нобак. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 274 с.
7. **Вернон, В.** Реализация методов предметно-ориентированного проектирования / В. Вернон. – М.: ИД «Вильямс», 2016. – 688 с.
8. **Метц, С.** Ruby. Объектно-ориентированное проектирование / С. Метц. – СПб.: Питер, 2017. – 304 с.

*Дата поступления
в редакцию: 06.09.2023*

*Дата принятия
к публикации: 01.11.2023*

УДК 303.732.4

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_27

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СЕТЕВОЙ СТРУКТУРЫ НА ЭТАПЕ ОБЩЕГО РЕШЕНИЯ

Д.А. Пальгуев

ORCID: 0000-0003-2584-7657 e-mail: palguyev@rf.unn.ruНижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Нижний Новгород, Россия

Рассмотрен метод сквозного синтеза при построении информационной системы сетевой структуры, подробно показан совместный структурно-параметрический синтез на этапе общего решения. Для конкретизации основных решений по выбору исходных данных, алгоритмов обработки информации, основных и дополнительных критериев, а также ограничивающих условий, применение метода структурно-параметрического синтеза продемонстрировано на примере построения информационной системы сетевой структуры в области мониторинга воздушного пространства. Анализ определенных факторов, полученных при подготовке исходных данных для построения информационных систем сетевой структуры, показывает, что существует вполне определенная взаимосвязь между совокупностью применяемых в информационных системах методов и алгоритмов обработки и обмена информацией, и непосредственно самой структурой системы.

Полученные результаты синтеза информационной системы сетевой структуры показывают возможность общего подхода к построению подобных систем и использования его в качестве одного из имеющихся методов для построения специализированных информационных систем.

Ключевые слова: информация, информационные системы, сетевая структура, метод сквозного синтеза, синтез общего решения, структурно-параметрический синтез.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пальгуев, Д.А. Структурно-параметрический синтез информационной системы сетевой структуры на этапе общего решения // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 27-35.
DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_27

STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF INFORMATION SYSTEM OF NETWORK STRUCTURE AT THE STAGE OF GENERAL SOLUTION

D.A. Palguyev

ORCID: 0000-0003-2584-7657 e-mail: palguyev@rf.unn.ruLobachevsky State University of Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The method of end-to-end synthesis when constructing an information system of a network structure is considered. Joint structural-parametric synthesis at the stage of the general solution is shown in detail. The method of structural-parametric synthesis is demonstrated to specify the main decisions on the formation of initial data, information processing algorithms, basic and additional criteria, as well as limiting conditions, on the example of creating an information system of a network structure in the field of airspace monitoring. Analysis of certain factors obtained in the preparation of initial data for formation information systems of a network structure shows that there is a very definite relationship between the set of methods and algorithms used in information systems for processing and exchange of information, and the structure of the system itself.

The obtained results of the synthesis of an information system of a network structure show the possibility of a general approach to creating such systems and using it as one of the available methods for creation specialized information systems.

Key words: information, information systems, network structure, end-to-end synthesis method, synthesis of a common solution, structural-parametric synthesis.

FOR CITATION: D.A. Palguyev. Structural-parametric synthesis of information system of network structure at the stage of general solution. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 27-35.
DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_25

Введение

Вопросы разработки, построения и реализации информационных систем сетевой структуры, предназначенных для сбора, объединения и обмена информации, в настоящее время обретают значительную актуальность [1-6]. Вместе с тем, имеется целый ряд научно-теоретических вопросов системного характера, которые определяют взаимосвязь функционала информационных систем как совокупности применяемых в системах математических моделей, методов и алгоритмов обработки информации, непосредственно со свойствами структуры информационной системы. Подобные вопросы, с одной стороны, требуют применения методов структурного и параметрического синтеза в неразрывной связи друг с другом, с другой стороны, эти методы должны быть встроены в более общий метод построения информационной системы. Для выявления этой взаимосвязи на этапе синтеза общего решения, как составной части более общего метода сквозного синтеза построения информационной системы сетевой структуры, применим метод совместного структурно-параметрического синтеза.

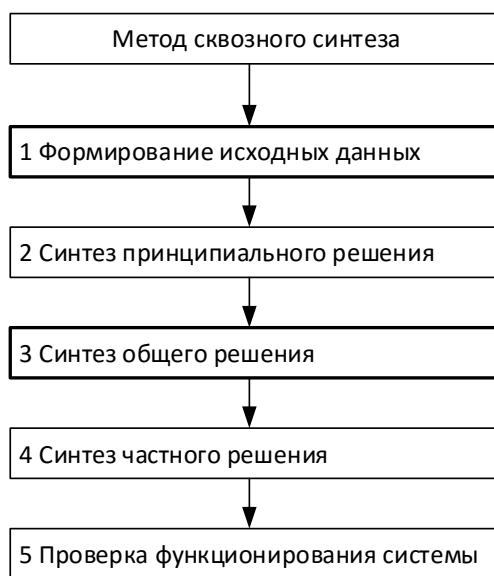


Рис. 1. Этапы метода сквозного синтеза

Fig. 1. Stages of the end-to-end synthesis method

Общий подход к построению информационной системы сетевой структуры в сфере мониторинга воздушного пространства методом сквозного синтеза. В соответствии с [7-9], метод сквозного синтеза состоит из пяти этапов (рис. 1). На любом из них возможно применение различных методов системного анализа для получения оптимального результата.

Разработка информационной системы сетевой структуры построена на последовательной реализации указанных этапов. Содержание первого из них показано на рис. 2. Одной из самых важных задач на данном этапе является формирование совокупности обобщенных показателей качества [7, 10]. Эта задача была решена выбором интегрального показателя информационных потерь в работах [11, 12]:

$$\alpha = (1 - K^y)(1 - K^t), \quad (1)$$

где α является относительной величиной (в общем виде: отношение информационных потерь к общему количеству информации в системе), характеризующее информацию, не удовлетворяющую требованиям потребителей (в том числе, ложную, потерянную в ходе отображения, искаженную, задержанную и устаревшую, т.е. приводящую к увеличению времени обработ-

ки информации, к созданию предпосылок для информационной перегрузки системы, увеличению времени принятия решений). По величине потерь можно судить о качестве отображения, эффективности функционирования собственно радиолокационной системы, а также о вкладе в эффективность надсистемы [12].

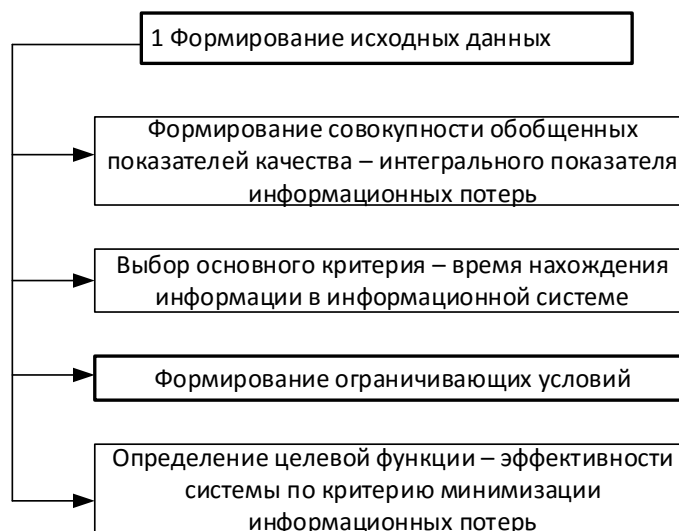


Рис. 2. Содержание первого этапа метода сквозного синтеза

Fig. 2. Contents of the first stage of the end-to-end synthesis method

Для вычисления обобщенного показателя информационных потерь K^y (в [12] индекс y означает *универсальный*) применяются такие параметры, как количество пропущенных системой реальных воздушных объектов; количество объектов, сопровождавшихся с требуемой точностью; коэффициент проводки n -го воздушного объекта; длительность непрерывного сопровождения n -ой трассы; длительность разрыва n -ой трассы; коэффициент существования ложных трасс по времени, и ряд других. Для обобщенного показателя информационных потерь вследствие времени нахождения РЛИ в системе K^t [11] учитываются: накопление ошибок экстраполяции, особенно при маневре объектов; ошибки при пересчетах координат в узлах системы; ошибки, связанные с задержками при обработке РЛИ в циклах управления и обмена информацией.

В общем виде функцию эффективности от показателя α в работах [11, 12] предлагается сформировать следующим образом:

$$f(\alpha) = f \left\{ \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L w_l \frac{\text{card}(\alpha)}{\text{card}(X)} \right\} \quad (2)$$

где w_l – значения весового коэффициента, характеризующего важность информации того или иного вида, L – общее количество видов информации, N – количество независимых показателей, входящих в интегральный показатель, α – подмножество потерь, характеризующее информацию, не удовлетворяющую требованиям потребителей, в том числе ложную, потерянную в ходе отображения, искаженную, задержанную и устаревшую, X – множество, описывающее воздушную обстановку, card обозначает мощность соответствующего множества и подмножества.

Далее определена целевая функция как эффективность радиолокационной системы по критерию минимизации времени нахождения информации в информационной системе [11].

$$\mathcal{E}_s = 1 - f(\alpha). \quad (3)$$

Поскольку в интегральный показатель информационных потерь α входит обобщенный показатель информационных потерь вследствие времени нахождения РЛИ в системе K^t [11], который учитывает, среди прочего, ошибки, связанные с задержками при обработке РЛИ в циклах управления и обмена информацией, постольку из выражений (1, 3) можно сделать вывод, что с уменьшением времени нахождения информации в информационной системе повышается ее эффективность. К исходным данным также относится формирование и обоснование ограничивающих условий (рис. 3), полученных в результате онтологического, гносеологического, математико-алгоритмического и технического анализа исходных данных [6].

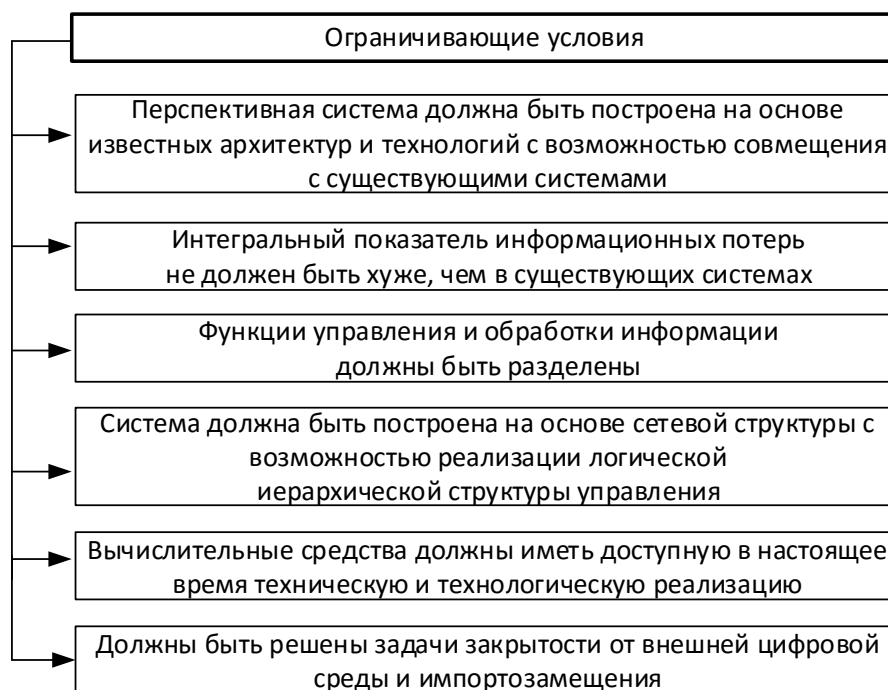


Рис. 3. Формирование ограничивающих условий

Fig. 3. Formation of limiting conditions

Некоторые из ограничивающих условий необходимо пояснить подробнее, в частности:

- функции управления и обработки информации в перспективной информационной системе должны быть разделены, причем функция обработки должна быть реализована в узлах самой информационной системы, а не в узлах, реализующих функцию управления;
- в части выполнения функций обработки и обмена информацией система должна быть построена на основе сетевой структуры, а в части функции управления – должна быть обеспечена передача информации управления по существующей логической иерархической структуре без ухудшения качества; логическая иерархическая структура управления должна быть реализована технически и программно в сетевой структуре перспективной информационной системы;
- вычислительные средства, применяемые при обработке и обмене информацией в системе, должны иметь доступную техническую и технологическую реализацию, а вычислительная сложность новых методов обработки не должна превышать их возможности.

Синтез принципиального решения (второй этап, рис. 1) при решении задачи сквозного синтеза системы в данном случае не проводился, так как применение комбинации известных информационных структур и информационных технологий является одним из ограничивающих условий (рис. 3). Такой подход не противоречит решению научной проблемы построе-

ния перспективной информационной системы методом сквозного синтеза [7] и относится ко II классу задач синтеза – задачи высокой сложности [7].

Структурно-параметрический синтез информационной системы сетевой структуры в области мониторинга воздушного пространства. Для решения конкретной научной задачи построения информационной системы сетевой структуры в области мониторинга воздушного пространства на этапе синтеза общего решения (третий этап, рис. 1) применим метод структурно-параметрического синтеза [13]. Основным критерием явилось время нахождения информации в системе и его минимизация. При разработке новых алгоритмов обработки и обмена информации в системе использовался эвристический метод синтеза с оптимизацией по выбранным критериям. Дополнительным критерием при разработке метода сетевой обработки информации выбран критерий минимизации количества ветвящихся решений (гипотез) при сравнении сообщений о воздушных объектах. Синтез общего решения является наиболее объемным и сложным с научной точки зрения этапом построения системы [7, 10, 13, 14], поэтому ниже он рассмотрен подробнее.

В формализованном виде задачу структурно-параметрического синтеза информационной системы мониторинга воздушного пространства можно представить следующим образом, изменив составные части задачи синтеза, приведенные для адаптивных информационных систем на основе нейросетевых методов и архитектуры в работе [13] с учетом целевой функции эффективности системы и обобщенных показателей качества, приведенных в работе [11]. Необходимо определить такое множество элементов SN , множество связей между элементами D , множество методов анализа, обработки и обмена информации MI , а также множество параметров PRM для каждого элемента структуры системы, при которых целевая функция эффективности \mathcal{E} [11] достигает максимума:

$$\{SN, PRM\} = \arg \max_{SN, PRM} (\mathcal{E}) \quad (4)$$

где $SN = (O, NA, D, MI)$, O – множество ограничивающих условий, NA – множество видов архитектур системы и их комбинаций;

при выполнении:

- множеств ограничений SO на связи между элементами структуры SN :

$$SO = \{so_i\}, so_i \rightarrow \gamma_i(D) \subseteq D \quad (5)$$

- множеств ограничений PO на область значений параметров:

$$PO = \{po_i\}, po_i \rightarrow \begin{cases} \varphi_i(PRM) = 0, \\ \varphi_i(PRM) < 0, \\ \varphi_i(PRM) \in PRM_i \end{cases} \quad (6)$$

- множеств ограничений RO на минимальные и максимальные границы значений оценок эффективности системы:

$$RO = \{ro_i\}, so_i \rightarrow \beta_i^{\min} \leq \psi_i(\mathcal{E}) \leq \beta_i^{\max}, \quad (4)$$

где $\gamma_i(D)$ – функция, формирующая подмножество связей в соответствии с условием so_i , которые должны входить в сформированное множество D , $\varphi_i(PRM)$ – функция, преобразующая параметры системы к виду, в котором их можно использовать в равенствах, неравенствах или для проверки вхождения в некоторые подмножества PRM_i , в основном связанных с выполнением временных ограничений при обработке и обмене информацией; $\psi_i(\mathcal{E})$ – функция, преобразующая целевую функцию эффективности или ее отдельные компоненты для проверки соответствия минимальным β_i^{\min} и максимальным β_i^{\max} допустимым границам.

Выбор и определение целевой функции, интегрального показателя информационных потерь и входящих в него обобщенных показателей качества произведен в [11, 12]. Элементы множеств SN , D , MI , PRM могут представлять собой подмножества, в том числе, матричной структуры. Пример представления множества PRM в виде матрицы показан в [6]. Из описа-

ния и формализованного представления задачи структурно-параметрического синтеза можно сформулировать следующие условия:

- 1) структурный и параметрический синтез системы сбора, обработки и обмена информацией должен проводиться параллельно, с согласованием полученных результатов на промежуточных этапах; задача структурного синтеза не может быть решена без решения задачи параметрического синтеза, в частности, без разработки методов обработки информации;
- 2) некоторые ограничивающие условия могут выступать в качестве дополнительных критериев при структурном синтезе;
- 3) для решения задач параметрического синтеза необходима формулировка дополнительного критерия.

Отсюда выводится последовательность основных этапов совместного структурно-параметрического синтеза, встроенных в третий этап синтеза общего решения (рис. 4). При анализе видно, что метод совместного структурно-параметрического синтеза является основным содержанием этапа синтеза общего решения. Решение задачи структурно-параметрического синтеза является многокритериальным, с одним основным критерием, далее для структурного и параметрического синтеза введены дополнительные критерии в соответствии с ограничивающими условиями.

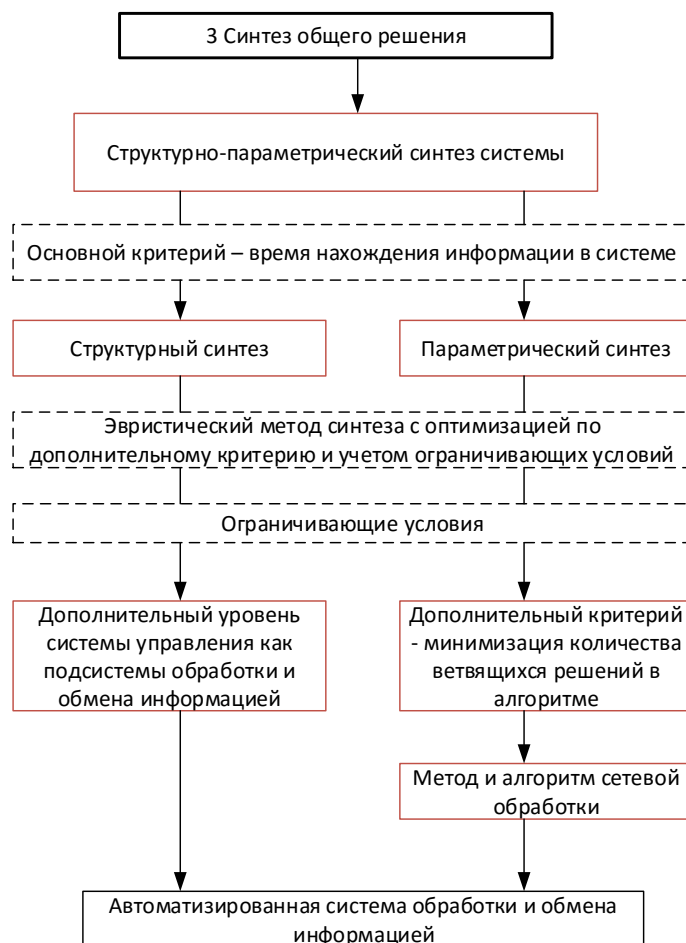


Рис. 4. Этап синтеза общего решения с последовательностью основных этапов структурно-параметрического синтеза

Fig. 4. Stage of synthesis of a general solution with a sequence of main stages of structural-parametric synthesis

Наличие единого основного критерия – времени нахождения информации в системе, а также использование общего для структурного и параметрического синтеза эвристического метода синтеза с оптимизацией по выбранным критериям и общим ограничивающих условий

показывают неразрывную взаимосвязь функционала информационной системы и свойств ее структуры, а также необходимость учета указанных факторов при совместном структурно-параметрическом синтезе системы.

Следующий этап метода сквозного синтеза – *синтез частного решения*, четвертый этап (рис. 1) – предназначен для конкретной реализации теоретических положений, полученных при синтезе общего решения. Этот этап реализован разработкой алгоритмов обработки и обмена информацией на основе общего решения, применением современных информационных технологий в области сбора, обработки, передачи и обмена информацией [6].

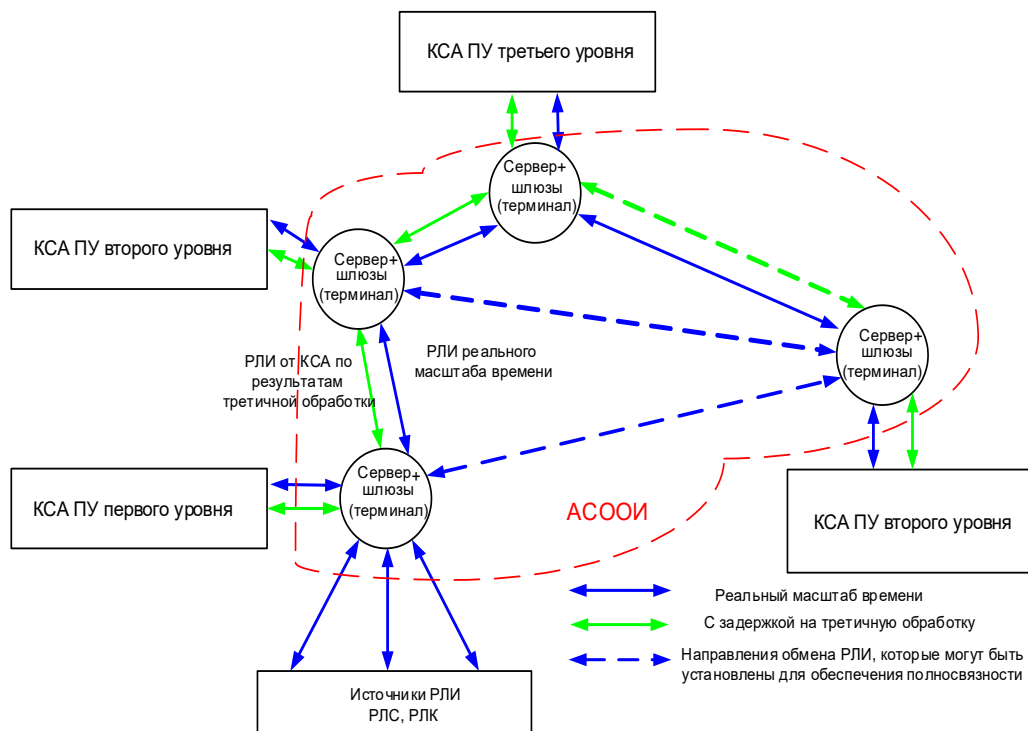


Рис. 5. Структура информационной системы обработки и обмена радиолокационной информацией (РЛИ) в варианте совместного функционирования с существующей информационной системой мониторинга воздушного пространства

Fig. 5. The structure of the information system for processing and exchange of radar information when operating together with the existing airspace monitoring information system

Результаты этапа в соответствии с [7] отражены в конструкторской и программной документации, в частности, разработана автоматизированная система обработки и обмена информации (АСООИ) применительно к существующей информационной системе мониторинга воздушного пространства (рис. 5) [15], а также алгоритмы обработки и обмена РЛИ [6]. На рис. 5 применены следующие обозначения: КСА – комплексы средств автоматизации, ПУ – пункты управления, РЛИ – радиолокационная информация, РЛС – радиолокационная станция, под источниками РЛИ подразумеваются радиолокационные станции и радиолокационные комплексы, включающие несколько РЛС различных диапазонов. Представленная автоматизированная система обработки и обмена РЛИ имеет полносвязную сетевую структуру. Основным критерием построения является критерий минимизации времени нахождения информации в системе. В разработке использовался метод структурно-параметрического синтеза, показанный в настоящей статье, а также выводы, полученные из выражений (1-4). Комплексы средств автоматизации (КСА) составляют основу существующей системы сбора, обработки и обмена РЛИ, а терминалы и линии передачи данных, встроенные в эту систему, являются основой АСООИ как подсистемы по отношению к существующей информационной системе мониторинга воздушного пространства.

Последний, пятый этап метода сквозного синтеза (рис. 1), предназначен для проверки функционирования разработанной информационной системы. На этом этапе проведена проверка функционирования системы методами натуральных и полунатурных испытаний, имитационного моделирования, дополнительно проведено математическое моделирование некоторых качественных параметров системы. Проверка функционирования показала, что информационная система сетевой структуры, предназначенная для сбора, обработки и обмена информацией в области мониторинга воздушного пространства, отвечает требованиям по сокращению времени нахождения информации в системе, и, как следствие, по сокращению времени доставки информации от источников к потребителям [11]. Кроме того, техническое и программное построение информационной системы сетевой структуры обеспечивает изолированность от цифровых сетей общего доступа, а также в определенной степени решает задачу импортозамещения [15].

Выводы

Для построения информационной системы сетевой структуры в области мониторинга воздушного пространства в рамках метода сквозного синтеза было обосновано применение метода структурно-параметрического синтеза. Далее, для этапа синтеза общего решения получены следующие выводы:

- 1) для правильной постановки задачи структурно-параметрического синтеза важное значение имеет формирование исходных данных, основного и дополнительных критериев построения системы, и ограничивающих условий;
- 2) формирование исходных данных, в свою очередь, требует многостороннего – онтологического, гносеологического, математико-алгоритмического и технического – анализа существующих и перспективных информационных систем, и формулирование требований, предъявляемых к ним;
- 3) структурный и параметрический синтез проводятся параллельно, совместно, так как имеют общий основной критерий, общий эвристический метод синтеза и общие ограничивающие условия;
- 4) представленный подход основан на взаимосвязи функционала информационной системы и свойств ее структуры, в данном случае – сетевой.

Информационные системы сетевой структуры в области мониторинга воздушного пространства могут использоваться как в системах, объединяющих большое количество источников информации, так и в различных комплексах мониторинга. Указанные системы имеют высокую актуальность и перспективы развития вследствие малого времени обработки и доведения информации от источников к потребителям, экономической эффективности по сравнению с существующими системами и возможностями объединять не только радиолокационную, но и разнородную информацию в реальном масштабе времени.

Библиографический список

1. Многолучевые радиолокаторы в составе охранных комплексов. Антитеррор: монография / под ред. И.К. Антонова. – М: Радиотехника, 2017. – 216 с.
2. **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) 2018. С. 215-221.
3. **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.
4. **Архимандритов, И.Б.** Задача разработки модели цифровой платформы сбора, обработки и распространения пространственных данных, построенной с использованием сетевидной авиационной системы мониторинга / И.Б. Архимандритов, С.Г. Белов, В.С. Верба, А.А. Липатов, Д.А. Миляков, И.А. Сидоров, Д.Ю. Четыркин // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 5. С. 8.

5. **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.
6. **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.
7. **Воинов, Б.С.** Информационные технологии и системы: монография. Кн. I: Методология синтеза новых решений / Б.С. Воинов. – Н. Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2001. – 404 с.
8. **Воинов, Б.С.** Информационные технологии и системы: поиск оптимальных, оригинальных и оптимальных решений / Б.С. Воинов, В.Н. Бугров, Б.Б. Воинов. – М.: Наука, 2007. – 730 с.
9. **Воинов, Б.С.** Информационные технологии и системы. Поиск оптимальных, оригинальных и рациональных решений / Б.С. Воинов, В.Н. Бугров, Б.Б. Воинов [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://litgu.ru/knigi/nauka_ucheba/19379-informacionnye-tehnologii-i-sistemy-poisk-optimalnyh-originalnyh-i-racionalnyh-resheniy.html (Дата обращения 01.08.2023).
10. **Конторов, Д.С.** Введение в радиолокационную системотехнику / Д.С. Конторов, Ю.С. Голубев-Новожилов. – М.: Советское радио, 1971. – 368 с.
11. **Пальгуев, Д.А.** К вопросу о третичной обработке радиолокационной информации / Д.А. Пальгуев, А.Н. Шентябин, А.Б. Борзов, Д.А. Васильев, Н.С. Морозов // Вопросы радиоэлектроники. № 1. 2021. С. 21-29.
12. **Бреслер, И.Б.** Агрегирование информации о воздушной обстановке / И.Б. Бреслер, В.В. Корниенко, С.А. Семенов, В.А. Тихомиров, М.Д. Фомин. – Тверь: Военная академия ВКО им. маршала Г.К. Жукова, 2008. – 136 с.
13. **Обухов, А.Д.** Структурно-параметрический синтез адаптивных информационных систем на основе нейросетевых методов и архитектуры / А.Д.Обухов, М.Н. Краснянский. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2021. – 240 с.
14. Системный анализ и принятие решений: Словарь-справочник: Учеб. пособие для вузов / под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. – М.: Высшая школа, 2004. – 616 с.
15. **Пальгуев, Д.А.** Структура специализированной системы обмена и обработки радиолокационной информации с точки зрения импортозамещения и закрытости от внешней среды // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. № 4. 2022. С. 46-55.

*Дата поступления
в редакцию: 08.08.2023*

*Дата принятия
к публикации: 01.11.2023*

УДК 519.863

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_36

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫВЕРКИ И КОРРЕКЦИИ ПООПЕРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НОРМ ВРЕМЕНИ

Н.В. СтаростинORCID: 0000-0003-1415-7511 e-mail: nvstar@iani.unn.ruНижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
*Нижний Новгород, Россия***Д.В. Седаков**Российский Федеральный Ядерный Центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
*Саров, Россия***А.Г. Свеженцев**ORCID: 0009-0000-3339-2715 e-mail: asvezhentsev@yandex.ruРоссийский Федеральный Ядерный Центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
*Саров, Россия***И.С. Вернигор**ORCID: 0009-0008-8682-0523 e-mail: isvernigor@yandex.ruРоссийский Федеральный Ядерный Центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
Саров, Россия

Проблема выверки и коррекции пооперационных технологических норм рассмотрена в контексте внедрения средств автоматизации планирования и оперативного управления производством. Сформулирована концепция, основанная на анализе исторических данных работы производства за некоторый период. Описана математическая модель и поставлена оптимизационная задача расчета пооперационных технологических норм. Предложены методы работы с ошибочными и избыточными исходными данными, а также методы работы с большими данными, основанные на декомпозиционном подходе.

Ключевые слова: оперативно-производственное планирование, автоматизация производственных процессов, нормирование операций, технологическая норма времени, линейная оптимизация, избыточные данные, декомпозиция, минимизация информационных потерь.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Старостин, Н.В. Модели и алгоритмы поиска оптимальных процессов выверки и коррекции пооперационных технологических норм времени / Н.В. Старостин, Д.В. Седаков, А.Г. Свеженцев, И.С. Вернигор // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 36-50. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_36

MODELS AND ALGORITHMS FOR SEARCHING OPTIMAL RECONCILIATION PROCESS AND CORRECTION OF OPERATIONAL TECHNOLOGICAL TIME STANDARDS

N.V. StarostinORCID: 0000-0003-1415-7511 e-mail: nvstar@iani.unn.ruLobachevsky State University of Nizhny Novgorod
Nizhny Novgorod, Russia

D.V. SedakovRussian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics
*Sarov, Russia***A.G. Svezhentsev**ORCID: 0009-0000-3339-2715 e-mail: asvezhentsev@yandex.ruRussian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics
*Sarov, Russia***I.S. Vernigor**ORCID: 0009-0008-8682-0523 e-mail: isvernigor@yandex.ruRussian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics
Sarov, Russia

Abstract. One of the problems in the implementation of automation tools for planning and operational production management is reconciliation and correction of operational technological standards. A concept based on the historical data analysis for the production for a certain period is formulated. A mathematical model is described and an optimization problem for calculating operational technological standards is posed. The paper proposed the methods for working with erroneous and redundant source data, as well as methods for working with big data based on the decomposition approach.

Key words: operative production planning, production processes automation, standardizing operations, technological time standard, linear optimization, redundant data, decomposition, minimization of information losses.

FOR CITATION: N.V. Starostin, D.V. Sedakov., A.G. Svezhentsev, I.S. Vernigor. Models and algorithms for searching optimal reconciliation process and correction of operational technological time standards. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 36-50. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_36

Введение

Эффективное управление производственной системой в значительной степени определяется качеством оперативно-производственного планирования, нацеленного на организацию слаженной работы всех подразделений предприятия для обеспечения ритмичного выпуска продукции в установленном объеме и номенклатуре при рациональном использовании производственных ресурсов. С практической точки зрения реализация указанной цели достигается решением целого комплекса взаимосвязанных задач, состав которых может меняться в зависимости от принятой системы планирования на конкретном предприятии. Совершенствование системы оперативно-производственного планирования под специфику конкретного производства связывают главным образом с разработкой и практической реализацией более точных экономико-математических моделей и алгоритмов планирования за счет учета большего числа аспектов функционирования производственной системы [1, 2]. В итоге растут требования, предъявляемые к структуре, объему и качеству исходных данных. Таким образом, развитие системы оперативно-производственного планирования невозможно без повышения уровня автоматизации процессов, сбора и обработки необходимой информации.

В сфере решения задач оперативно-производственного планирования значимая часть исходных данных поступает с технологической подготовки производства. В частности, на этапе технологического проектирования осуществляется разработка техпроцессов изготовления и контроля составных деталей и сборок изделий; на этапе выбора оборудования для операций техпроцесса происходит формирование обоснованного перечня оборудования; на этапе нормирования устанавливаются пооперационные технические нормы времени технологических процессов. Современные автоматизированные системы технологической подготовки производства позволяют существенно упростить подготовку необходимых данных для оперативно-производственного планирования [3]. В то же время существует проблема фор-

мирования части календарно-плановых нормативов и на базе экспертных оценок, что по факту не исключает ошибок в оценках длительности производственных циклов, особенно в тех случаях, когда производство функционирует в условиях значительного номенклатурного ряда и дефицита ресурсов. Главные негативные последствия выражаются здесь в падении точности формируемых показателей и планов и, как следствие, повышении неопределенности при управлении производством и необходимости частой корректировки планов производства. В целях повышения уровня доверия к результатам оперативно-производственного планирования на практике нередко используют поправочные коэффициенты [4], которые позволяют подогнать плановые показатели под показатели, полученные по факту их реализации. Однако данный метод не позволяет находить и корректировать ошибки в исходных данных и формировать надежные планы в условиях изменяющихся производственной системы и номенклатуры изделий. С этой точки зрения проблема выверки и коррекции пооперационных технологических норм времени является актуальной. Создание и интеграция в процессы подготовки технологических данных производства специализированного программного обеспечения выверки и коррекции пооперационных технологических норм позволит повысить качество данных, тем самым обеспечивая благоприятные условия для внедрения средств планирования и оперативного управления производством.

Содержательная постановка задачи

Концепция технологии выверки и коррекции пооперационных технологических норм основывается на анализе исторических данных работы производства за некоторый период. В контексте рассматриваемой проблемы под историческими данными будем понимать производственные (сменно-суточные) задания и отметками их выполнения. Отметим, что минимальный уровень автоматизации производства предполагает наличие подобных оцифрованных данных. Проблема состоит в том, что в производственных заданиях зачастую достоверной информацией является только факт назначения работ к исполнению и их завершения с точностью до периода производственного задания, которому, как правило, соответствует смена. Таким образом, в качестве исходных данных выступает множество производственных заданий, выполненных на одном производстве за некоторый заданный производственный период. Для каждого производственного задания определено оборудование (исполнитель) с выполненными на нем технологическими операциями за заданный рабочий период смены. Каждой операции соответствует определенный вид работ. Для каждого вида работ указаны технологические нормы исполнения. Определена методика расчета длительности выполнения производственного цикла технологической операции по соответствующей технологической норме по видам работ.

В задаче требуется подобрать такие значения технологических нормы исполнения, чтобы производственные циклы заданий по суммарной длительности не превышали длительность рабочих периодов смен.

Математическая модель

Обозначим через x_i технологическую норму штучного времени на выполнения операции i -го вида:

$$x_i \geq 0, \quad i = \overline{1, n} \quad (1)$$

Обозначим через y_j технологическую норму подготовительно-заключительного времени для j -го оборудования, которые соответствуют затратам времени на подготовку и работы, связанные с ее завершением на соответствующем оборудовании:

$$y_j \geq 0, \quad j = \overline{1, m} \quad (2)$$

В качестве примера методики оценки расчета длительности выполнения технологической операции i -го вида на j -ом оборудовании примем:

$$t_{ij} = y_j + p_j \cdot q_i \cdot x_i$$

где p_j – действительный коэффициент выполнения нормы j -м оборудованием; q_i – это количество единиц продукции, которое требуется получить в результате выполнения операции i -го вида.

Обозначим через $l = \overline{1, k}$ номер производственного задания. Так как в рамках l -ого производственного задания суммарная длительность операций не может превышать длительность рабочей смены, получаем для каждого l -го производственного задания неравенство вида:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c_{lij} t_{ij} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c_{lij} (y_j + p_j \cdot q_{lij} \cdot x_i) \leq w_l, \quad l = \overline{1, k} \quad (3)$$

где c_{lij} – общее число технологических операций i -го типа в l -ом производственном задании, назначенных на j -е оборудование; q_{lij} – это суммарное число единиц продукции операции i -го вида в l -ом производственном задании, производимым на j -м оборудовании; w_l – длительность рабочего периода l -ого производственного задания.

Если на предприятии ведется статистика фактической загрузки по оборудованию (на месяц, квартал, год), систему неравенств (3) можно дополнить неравенствами по каждому оборудованию:

$$\sum_{l=1}^k \sum_{i=1}^n c_{lij} (y_j + p_j \cdot q_{lij} \cdot x_i) \geq s_j \cdot w_l, \quad j = \overline{1, m} \quad (4)$$

где s_j – значение коэффициента загрузки оборудования по всем сменам всего производственного периода.

Задача оптимизации

Система линейных неравенств (1)-(4) определяет область допустимых значений технологических норм штучного времени $x = (x_1, \dots, x_n)$ по видам операций и технологических норм $y = (y_1, \dots, y_m)$ подготовительно-заключительного времени по оборудованию.

С точки зрения оперативно-производственного планирования важно получить верхние оценки искомых технологических норм x и y , что позволит заложить обоснованные резервы в длительности технологических операций. Это, с одной стороны, позволит нивелировать стохастические и неконтролируемые процессы реального производства, с другой – удержать плановые показатели в рамках, полученных на фактических данных работы предприятия.

В качестве планового показателя предлагается выбрать длительность производственного цикла всех производственных заданий $F(x)$ – он должен стремиться к фактическому значению W :

$$W - F(x) = \sum_{l=1}^k w_l - \sum_{l=1}^k \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c_{lij} (y_j + p_j \cdot q_{lij} \cdot x_i) \rightarrow \min$$

Задача на минимизацию выбранного критерия соответствует задаче максимизации длительности производственного цикла (5):

$$\sum_{l=1}^k \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n c_{lij} (y_j + p_j \cdot q_{lij} \cdot x_i) \rightarrow \max \quad (5)$$

Оптимизационную задачу (1)-(5) будем называть задачей расчета технологических норм времени. Она принадлежит к классу задач линейного программирования, для решения которой существуют эффективные алгоритмы [5, 6].

Метод решения

В качестве метода решения задачи (1)-(5) можно использовать симплекс-метод [7], который предполагает приведение к канонической (стандартной) форме задачи линейного программирования. Система (3) из k ограничений преобразуется в систему из k равенств путем введения дополнительных переменных. Система (4) из m неравенств преобразуется в систему m равенств введением дополнительной переменной. В результате система (3), (4) преобразуется в $k + m$ равенств с $(n + m) + (k + m)$ переменными и с не отрицательными правыми частями. Изменения в целевой функции заключаются в техническом отбрасывании константы W .

Теоретически симплекс метод в худшем случае может перебрать все вершины симплекса, образованного системой равенств, однако на практике он демонстрирует в среднем полиномиальную сходимость при широком выборе распределения значений в случайных матрицах, при этом требуемое машинное время пропорционально кубу от числа ограничений [7] – в результате для алгоритма решения задачи (1)-(5) получаем оценку затрат по времени:

$$T(k, m) = P(k + m)^3 \quad (6)$$

где P – действительный положительный коэффициент, который определяется производительностью вычислительной системы и особенностью распределений значений в получаемых матрицах.

Данная оценка может служить основанием для ответа на важный вопрос об объеме выборки производственных заданий с реального производства. С одной стороны, чем больше данных с различного оборудования, тем теоретически точнее могут быть вычислены искоемые технологические нормы штучного времени, однако при этом в кубической зависимости от объема входных данных растут вычислительные издержки на поиск решения задачи. При этом, в случае малого объема выборки появляется риск получения некорректных норм, которые в итоге не позволят формировать надежные планы в условиях реально работающего производства. Сформулируем проблему выбора представительной выборки производственных заданий с реального производства.

Проблема отсутствия решения по причине ошибок в исторических данных

Сфокусируем внимание на представленной модели (1)-(4) расчета технологических норм времени. Система линейных неравенств сформулирована из предположения о том, что на производстве строго соблюдается график работы и ведется учет производственных заданий. Однако в условиях реального производства нельзя исключать ситуации, при которых будет иметь место неучтенная переработка или банальная техническая ошибка, связанная с некорректным вводом информации. Легко придумать пример ошибочных исторических данных, который приведет к несовместности системы (1)-(4) и, как следствие, невозможности решения задачи расчета технологических норм времени.

С точки зрения практической применимости для любой технологии анализа производственных данных исключительно важно заложить в саму технологию возможность работы с ошибочными данными. Рассмотрим примеры некоторых процессов, которые могут привести к ошибкам в производственных заданиях. Необходимо отметить, что в качестве исходных данных модели (1)-(4) выступают производственные задания, которые могут дополняться коэффициентами загрузки оборудования (4). Таким образом, согласно (3) и (4), информационная модель обобщенного производственного задания включает набор данных:

$$(c_{lij})_{l \times n \times m}, (q_{lij})_{l \times n \times m}, (p_j)_m, (s_j)_m, (w_l)_k$$

В качестве первой системной проблемы получения неполных или неточных данных о производстве рассмотрим случай переработки, когда исполнитель получает сменно-суточное задание, не успевает его выполнить в рамках смены, доделывает работу уже после рабочего периода смены. Если этот факт никак не будет отражен в исторических данных, соответствующая переработка в виде увеличенного значения w_l не будет учтена в модели. В результате в системе ограничений (3) появится более жесткое ограничение на нормы времени, которое может войти в противоречие с корректными неравенствами (4) по загрузке оборудования. Симметричный случай связан с некорректными коэффициентами загрузки оборудования в неравенствах (4), которые могут войти в противоречие с системой ограничений (3). Особый случай связан с неверным определением p_j коэффициентов выполнения нормы j -м оборудованием, которые характеризуют производительность оборудования в среднем по разным видам работ. Если на производстве нет данных о производительности оборудования, то установка всех соответствующих коэффициентов в единичное значение также может приводить к отсутствию совместности всей системы (1)-(4). Отдельный случай связан со эпизодическими случайными ошибками в данных, которые являются следствием человеческого фактора или сбоями в системе сбора и обработки исторических данных. Отсутствие допустимых решений задачи (1)-(4) также может косвенно свидетельствовать об наличии подобных ошибок.

Таким образом, анализ исторических данных на наличие ошибок может быть построен на процедуре проверки совместности системы (1)-(4). Рассмотренный выше симплекс-метод формально позволяет дать ответ на вопрос об отсутствии совместности, однако не позволяет точно локализовать ограничения, которые привели к особому случаю. В качестве алгоритма проверки на совместность предлагается использовать итерационный метод ортогональных проекций Агмона-Мощкина [8]. Данный алгоритм выбирает некоторое решение, последовательно подставляет его в неравенства системы и, если находится нарушаемое ограничение, то за текущее решение системы принимается новый вектор, на котором достигается наименьшее отклонение от границ проверенных неравенств. Такая схема вычисления совместности позволяет идентифицировать и исключить из системы (3), (4) противоречия – ограничения, на которых происходит потеря совместности всей системы. Результатом работы метода ортогональных проекций являются: неравенства и соответствующие им производственные задания, в которых с высокой вероятностью находятся неточности или ошибки; скорректированная совместная система неравенств (3), (4); допустимое решение скорректированной системы, которое можно использовать в качестве стартового в симплекс-методе для решения задачи (1)-(5) расчета технологических норм времени.

Проблема представительной выборки производственных заданий

Как уже отмечалось выше, размер исторических данных опосредованно влияет на качество найденных норм времени – чем больше выборка различных производственных заданий, тем выше ожидаемое качество получаемых норм времени. Однако использование всего набора исторических данных в симплекс-методе может оказаться невозможным по причине ограниченности вычислительного ресурса. В соответствии с приведенными выше оценками (6) и исходя из лимитов времени на работу симплекс-метода можно оценить приемлемые размеры k выборки для заданного числа оборудования m и при известной константе K , которую можно определить экспериментально.

Таким образом, содержательно постановку задачи можно сформулировать так: для заданного L требуется из множества исторических данных требуется выбрать k различных производственных заданий, соответствующих m единицам оборудования, чтобы выполнялось условие:

$$k + m \leq L \quad (7)$$

Сформулируем требования к качеству выборки. Рассмотрим систему (3) из линейных неравенств. Вся система соответствует выпуклому многограннику в $(n + m)$ -мерном пространстве, при этом каждая грань многогранника порождена некоторым линейным ограничением, которому соответствует определенное производственное задание. При этом в общем случае не любое линейное ограничение порождает свою собственную грань в многомерном симплексе – подобные ограничения и соответствующие им производственные задания являются избыточными. Их присутствие в общей системе не влияет на область допустимых значений, но при этом их учет в процессе решения задачи отнимает вычислительные ресурсы. В общем случае идентифицировать подобные избыточными производственные задания является нетривиальной проблемой, но можно предложить типовые требования к данным с простыми алгоритмами распознавания избыточности.

Очевидное требование связано с попарной линейной независимостью ограничений в системе. Для формализации этого требования удобно представить систему неравенств (3) в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} & b_{11} & \dots & b_{1m} \\ a_{21} & \dots & a_{2n} & b_{21} & \dots & b_{2m} \\ \dots & & \dots & \dots & & \dots \\ a_{k1} & \dots & a_{kn} & b_{k1} & \dots & b_{km} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \\ y_1 \\ \dots \\ y_m \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_k \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $a_{li} = c_{li} p_{j(i)} \cdot q_{li} \cdot x_i$, $l = \overline{1, k}$, $i = \overline{1, n}$;

$b_{lj} = \begin{cases} c_l, & \text{если } j = j(l) \\ 0, & \text{если } j \neq j(l), \end{cases}$ где $c_l = \sum_{i=1}^n c_{li}$, $l = \overline{1, k}$, $j = \overline{1, m}$.

Из (7) следует, что любое l -е неравенство задается вектором вида

$$v_l = (a_{l1}, \dots, a_{ln}, b_{l1}, \dots, b_{lm}, w_l), \quad l = \overline{1, k}.$$

Тогда требование отсутствия попарной линейной зависимости неравенств (8) можно выразить через свойства: 1) два вектора линейно зависимы тогда и только тогда, когда они коллинеарны; 2) модуль скалярного произведения коллинеарных векторов равен произведению их длин.

$$|v_l v_r| \neq |v_l| |v_r|, \quad \text{для } \forall l \neq r, \quad l = \overline{1, k}, \quad r = \overline{1, k}. \quad (9)$$

Сформулируем еще одно условие идентификации избыточного неравенства. Рассмотрим пару векторов v_l и v_r , соответствующих l -у и r -у производственным заданиям. Пусть для компонент векторов v_l и v_r выполняются условия

$$a_{li} \leq a_{ri}, \quad i = \overline{1, n}$$

$$b_{lj} \leq b_{rj}, \quad j = \overline{1, m}$$

$$w_l = w_r$$

(10)

С точки зрения ограничений системы (8) это означает, что если некоторые значения технологических норм x и y являются удовлетворяют r -у неравенству, то тогда следует, что они будут удовлетворять l -у. С точки зрения производства это означает, что r -е производственное задание характеризуется более высокой загрузкой в сравнении с l -м производственным заданием. Таким образом, l -е производственное задание является более «мягким» условием, и соответственно является избыточным при наличии в системе ограничения r .

Сформулируем условие (10) для общего случая, когда отсутствует условие на равенство рабочих периодов w_l и w_r производственных заданий. Для этого нормируем ограничения по соответствующим значениям рабочих периодов, получаем

$$\begin{aligned} \frac{a_{ii}}{w_l} &\leq \frac{a_{ri}}{w_r}, \quad i = \overline{1, n} \\ \frac{b_{lj}}{w_l} &\leq \frac{b_{rj}}{w_r}, \quad j = \overline{1, m} \end{aligned} \quad (11)$$

Очевидно, когда для всех коэффициентов (11) имеет место равенство, тогда соответствующие ограничения l и r находится в линейной зависимости. Следовательно, условие (11) является также условием проверки требования (9).

Алгоритм удаления избыточных производственных заданий

Рассмотрим алгоритм удаления избыточных производственных заданий из исторических данных. Технически алгоритм должен перебрать всевозможные пары производственных заданий, для каждой выполнить проверку условий (11) и в случае определения избыточного производственного задания не помещать его в результирующую выборку. Проблема такого подхода в высоких издержках по времени работы, которые оцениваются как произведение затрат на проверку (11) и квадрата от размера исторических данных:

$$O((n + m)l^2). \quad (12)$$

Частично вычислительные издержки можно сократить за счет приведения системы (8) к виду:

$$\begin{pmatrix} a'_{11} & \dots & a'_{1n} & b'_{11} & \dots & b'_{1m} \\ a'_{21} & \dots & a'_{2n} & b'_{21} & \dots & b'_{2m} \\ \dots & & \dots & & & \dots \\ a'_{k1} & \dots & a'_{kn} & b'_{k1} & \dots & b'_{km} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \\ y_1 \\ \dots \\ y_m \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

где $a'_{ii} = \frac{a_{ii}}{w_l}$, $i = \overline{1, n}$; $b'_{lj} = \frac{b_{lj}}{w_l}$, $j = \overline{1, m}$; $l = \overline{1, k}$.

При этом время работы алгоритма удастся уменьшить за счет применения иной вычислительной схемы, при которой происходит не удаление избыточных производственных заданий, а наоборот – осуществляется формирование подмножества без избыточных элементов. Однако в общем случае квадратичная зависимость времени фильтрации исторических данных (12) сохраняется.

Проблема разбиения исторических данных на независимые выборки производственных заданий

Как уже отмечалось, использование всего набора исторических данных даже с учетом отбрасывания избыточных производственных заданий не дает гарантий получения выборки, удовлетворяющего ограничению по объему (7). В результате возникает вопрос по каким принципам можно было бы осуществлять выбор ограниченного числа производственных заданий, которое бы обеспечило максимальное качество получаемых норм времени. Ответ к обозначенному вопросу можно найти в структуре матрицы коэффициентов системы (13), состоящей из двух подматриц:

$$A' = (a'_{ii})_{l \times n} \text{ и } B' = (b'_{lj})_{l \times m}$$

Данные матрицы на практике оказываются существенно разреженные. Матрица B' по построению в каждой строке содержит ненулевые значения только в столбцах, соответствующих исполнителям производственных заданий – сменно-суточные задания, как правило, определяются для единственного исполнителя. Разреженность матрицы A' объясняется тем, что оборудование (исполнитель) редко получает работы различных видов. В основном исполнители работ, включая персонал, оборудование, участки или цеха, специализируются только на отдельных видах работ. Перемножив транспонированную матрицу B' на матрицу A' , получим матрицу $E = (e_{ji})_{m \times n}$, в которой каждый элемент e_{ji} показывает интенсивность загрузки j -о оборудования i -м видом работ:

$$E = B'^T A'$$

Отметим, что по построению каждая строка матрицы E соответствует набору производственных заданий, завязанных на соответствующем оборудовании. Таким образом, каждой j -й строке матрицы E можно ассоциировать число u_j , которое показывает размер соответствующего набора (общее число производственных заданий, связанных с оборудованием j)

$$u_j = \sum_{i=1}^k \begin{cases} 1, & \text{если } b'_{ij} \neq 0; \\ 0, & \text{если } b'_{ij} = 0; \end{cases} \quad j = \overline{1, m} \quad (14)$$

Если матрицу E перестановкой строк и столбцов можно привести к блочному виду:

$$\begin{pmatrix} E_1 & 0 \\ 0 & E_2 \end{pmatrix} \quad (15)$$

где «0» – это подматрицы соответствующих размеров, состоящие из только нулевых значений, то можно утверждать, что исходная задача (1)-(5) размером (k, m) распадается на две независимые подзадачи (k_1, m_1) и (k_2, m_2) .

Это происходит по той причине, что имеют место группы исполнителей (оборудования), которые не пересекаются с точки зрения видов исполняемых операций. Поэтому данные задачи можно решать независимо. На основании (6) выигрыш в затратах по времени на решение общей задачи можно обосновать так:

$$\begin{aligned} ((k_1 + k_2) + 2(m_1 + m_2))^3 &< (k_1 + 2m_1)^3 + (k_2 + 2m_2)^3 \Rightarrow \\ T(k_1, m_1) + T(k_2, m_2) &< T((k_1 + k_2), m_1 + m_2) \end{aligned}$$

Рассмотрим алгоритм разбиения исторических данных на независимые выборки.

Алгоритм разбиения исторических данных на независимые выборки производственных заданий

Технически проблему разбиения исторических данных на независимые выборки можно сформулировать в терминах разбиения графов на связные компоненты. Дело в том, что от матрицы $E = (e_{ji})_{m \times n}$ просто перейти к гиперграфу (V, H) , где V – множество из n вершин соответствует столбцам, а H – множество гиперребер, где каждое гиперребро $h_j \in H$ соответствует строки j матрицы E

$$h_j = \{v_i \in V | e_{ji} \neq 0, i = \overline{1, n}\}$$

В результате задача выделения в матрице E блочной структуры свелась к разбиению гиперграфа на две (или более) связных компонент. Данная задача имеет эффективный алгоритм решения, основанный на построении корневой структуры смежности [9]. Алгоритм на вход получает представление гиперграфа (V, H) в виде списков смежности вершин двудоль-

ного графа Кёнига [10]. Алгоритм стартует с произвольной вершины (корня), помечает эту вершину и помещает ее в очередь. Пока очередь не пуста, алгоритм извлекает очередную вершину из очереди, перебирает не помеченные смежные к ней вершин, помечает их и помещает в очередь. Результатом работы алгоритма является разбиение графа на множество помеченных и непомеченных вершин. Если в результате работы алгоритма оказывается помеченным все множество вершин, то граф представлен единственной связной компонентой.

Легко увидеть, что вычислительная сложность данного алгоритма оценивается как число ребер двудольного графа Кёнига, что соответствует числу ненулевых коэффициентов разреженной матрицы E . Степень разреженности зависит от специфики производства. Если оно построено на базе специализированного оборудования, для которого перечень исполняемых видов работ существенно ограничен и не зависит от масштабов производства, имеем право ожидать линейную оценку времени работы алгоритма от вершин в двудольном графа Кёнига $O(n + m)$.

Проблема разбиения исторических данных на минимально зависимые выборки производственных заданий

Как было показано выше, отбрасыванием избыточных и разбиением исторических данных на независимые выборки производственных заданий удастся сократить размеры решаемых задач без потери в качестве. Однако описанные решения не гарантируют получения выборки, удовлетворяющей требование по объему (7). Для учета этого требования очевидно придется жертвовать качеством выборки. Сформулируем метрику, которая позволит количественно определять качество выборки. В предыдущем параграфе от матрицы коэффициентов производственных заданий перешли к матрице $E = (e_{ji})_{m \times n}$, в которой каждая строка j соответствует группе производственных заданий, в которых было использовано оборудование j . Коэффициенты e_{ji} фактически определяют интенсивность загрузки оборудования по видам работ. Чем больше величина e_{ji} , тем интенсивнее оборудование j используется для исполнения операций вида i . И наоборот: чем меньше величина e_{ji} , тем реже оборудование j назначается на исполнение операций i -о вида в силу разных производственных аспектов. В пределе нулевое значение $e_{ji}=0$ указывает, на то, что оборудование j не выполняло или не предназначено для выполнения i -о вида операций. Таким образом, величину e_{ji} можно трактовать как значимость связи между j -м оборудованием и операцией i -о вида. Допустим, что для матрицы E не существует разбиения на независимые блоки вида (15). Очевидно, последовательным отбрасыванием ненулевых коэффициентов матрицы E можно получить такую матрицу E' , которую можно разбить на независимые задачи. Каждое такое отбрасывание ненулевого коэффициента – это квант информации, который может опосредованно повлиять на расчет норм времени. Чем больше значение отбрасываемого коэффициента, тем выше его влияние на соответствующие нормы времени.

Таким образом, мерой для оценки произвольной выборки производственных заданий может служить сумма всех коэффициентов в соответствующей матрице интенсивности загрузки оборудования по видам работ:

$$I(E) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n e_{ji}. \quad (16)$$

Максимальное значение данная мера достигает на всем наборе исторических данных. В этом случае содержательно проблема заключается в поиске суммарно минимального набора отбрасываемых коэффициентов матрицы E , при котором получаемая матрица приводима к блочному виду (15).

Поставим задачу формально. В качестве исходных данных в задаче выступают: матрица интенсивности использования оборудования по видам работ $E = (e_{ji})_{m \times n}$; вектор

$u = (u_1, \dots, u_m)$, где u_j показывает число (14) производственных заданий в исторических данных для оборудования j ; натуральное число $L \in \mathbb{N}$ – характеризует предельный размер задачи для симплекс-метода (7). В качестве решения принимается бинарный вектор $z = (z_1^a, \dots, z_n^a, z_1^b, \dots, z_m^b)$, где каждый компонент z_i^a соответствует столбцу с номером i матрицы E , каждый компонент z_j^b соответствует строке с номером j матрицы E , а значение указывает на блок, в который распределяется соответствующая строка или столбец матрицы E :

$$z = (z_1^a, \dots, z_n^a, z_1^b, \dots, z_m^b), \quad z_i^a, z_j^b \in \{0,1\}, \quad i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}. \quad (17)$$

Так как подграфы разбиения не должны быть пусты, имеем:

$$0 < \sum_{i=1}^n z_i^a + \sum_{j=1}^m z_j^b < n + m. \quad (18)$$

Примем в качестве первого блока разбиения примем искомую выборку. Тогда ограничение (7) на предельный размер выборки можно сформулировать в следующем виде

$$K(z) + 2M(z) \leq L, \quad (19)$$

где $K(z) = \sum_{j=1}^m u_j z_j^b$; $M(z) = \sum_{j=1}^m z_j^b$

Система ограничений (17)-(19) задает множество допустимых решений Z . Для оценки качества решений определим коэффициенты, которые попадают в формируемые блоки (15) матрицы, согласно некоторому допустимому разбиению $z \in Z$. Сумма коэффициентов блока «1» (соответствует «1» в решении z) можно определить по выражению:

$$I_1(E, z) = z_j^b \sum_{i=1}^n e_{ji} z_i^a$$

Соответствующую сумму коэффициентов блока «0» (соответствует «0» в решении z) можно определить так:

$$I_0(E, z) = (1 - z_j^b) \sum_{i=1}^n e_{ji} (1 - z_i^a)$$

Зная сумму всех коэффициентов (16) исходной матрицы, легко вычислить сумму отбрасываемых значений, которую требуется минимизировать:

$$\begin{aligned} F(E, z) &= I(E) - I_1(E, z) - I_2(E, z) = \\ &= \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n e_{ji} - z_j^b \sum_{i=1}^n e_{ji} z_i^a - (1 - z_j^b) \sum_{i=1}^n e_{ji} (1 - z_i^a) = \\ &= z_j^b \sum_{i=1}^n e_{ji} (1 - z_i^a) + (1 - z_j^b) \sum_{i=1}^n e_{ji} z_i^a \xrightarrow{z \in Z} \min \end{aligned} \quad (20)$$

В итоге формализацию (17)-(20) будем называть проблемой разбиения исторических данных на минимально зависимые выборки производственных заданий. Данная задача технически формулируется в терминах разбиения взвешенного графа $G=(V, Q, u, e)$, где V – множество вершин, состоящее из двух подмножеств $V = V^a \cup V^b$; $V^a = \{v_1^a, \dots, v_n^a\}$ – подмножество вершин первой доли двудольного графа соответствует столбцам матрицы E , которые в свою очередь соответствуют видам работ; $V^b = \{v_1^b, \dots, v_m^b\}$ – подмножество вершин второй доли двудольного графа соответствует столбцам матрицы E , которые в свою очередь

соответствуют оборудованию; $Q = \left\{ \{v_i^a, v_j^b\} \mid e_{ji} \neq 0, v_i^a \in V^a, v_j^b \in V^b \right\}$ – ребра связывают вершины из разных долей графа и соответствуют ненулевым коэффициентам матрицы E ; отображение u определяет веса $u(v_j^b) = u_j$ для вершин $v_j^b \in V^b$ и нулевые веса $u(v_i^a) = 0$ вершин $v_i^a \in V^a$ принимаются равным 0; симметричное отображение e определяет веса для ребер $e(v_i^a, v_j^b) = e(v_j^b, v_i^a) = e_{ji}$. В задаче требуется распределить все вершины двудольного графа по двум подмножествам (V_0, V_1) – они соответствуют блокам матрицы.

В результате постановку задачи (17)-(20) можно записать в следующем виде:

$$V_0 \cup V_1 = V, V_0 \cap V_1 = \emptyset, V_0 \neq \emptyset, V_1 \neq \emptyset, \quad (21)$$

$$\sum_{v \in V_1} u(v) + \|V_1 \cap V^b\| \leq L, \quad (22)$$

$$\sum_{\substack{\{v_i, v_j\} \in Q \\ v_i \in V_0, v_j \in V_1}} e(v_i, v_j) \xrightarrow{(V_0, V_1)} \min \quad (23)$$

Задача (21)-(23) является известной NP-трудной задачей 2-разбиения графа [11,12]. Соответственно ее аналог – задача (17)-(20) также является NP-трудной.

Многоуровневые эвристики для разбиения исторических данных на минимально зависимые выборки производственных заданий

Обратим внимание на полученный парадокс – в попытке упростить или снизить сложность решения полиномиально разрешимой задачи расчета технологических норм времени (1)-(5) мы пришли к необходимости разбиения исторических данных, при этом эффективного алгоритма поиска минимально зависимых выборок из предположения что $NP \neq P$ не существует (пока не доказано обратное утверждение). Однако из этого не следует, что задача (1)-(5) не может быть решена в принципе, это только означает, что нужно подобрать компромиссный вариант приближенного или эвристического алгоритма поиска решения задачи (17)-(20), который в рамках выделенного времени обеспечит нахождение выборок из исторических данных приемлемого качества.

В качестве метода решения задачи (17)-(20) предлагается многоуровневый метод. Для задач 2-разбиения графа разработано большое разнообразие алгоритмов, основанных на многоуровневой оптимизации [13, 14]. Их главным преимуществом является относительно невысокая вычислительная сложность, что обеспечивает возможность решать задачи больших порядков. В основе любого многоуровневого графового алгоритма заложена идея последовательной редукции графа, которая позволяет поэтапно перейти от большеразмерной задачи к задаче приемлемого порядка. Такой подход открывает перспективы для интеграции в общую схему решения задачи разнообразных алгоритмов. Например, на этапах поиска разбиения редуцированной задачи можно использовать качественные приближенные или даже точные методы [15], а найденные решения можно последовательно переносить на исходный граф, активно применяя при этом методы локальной оптимизации.

Общая схема расчета технологических норм времени

Из приведенных рассуждений следует, что практическая реализация технологии анализа производственных заданий с целью расчета пооперационных технологических норм возможна и предполагает решение целого комплекса задач. Рассмотрим общую схему расчета технологических норм времени (рис. 1).

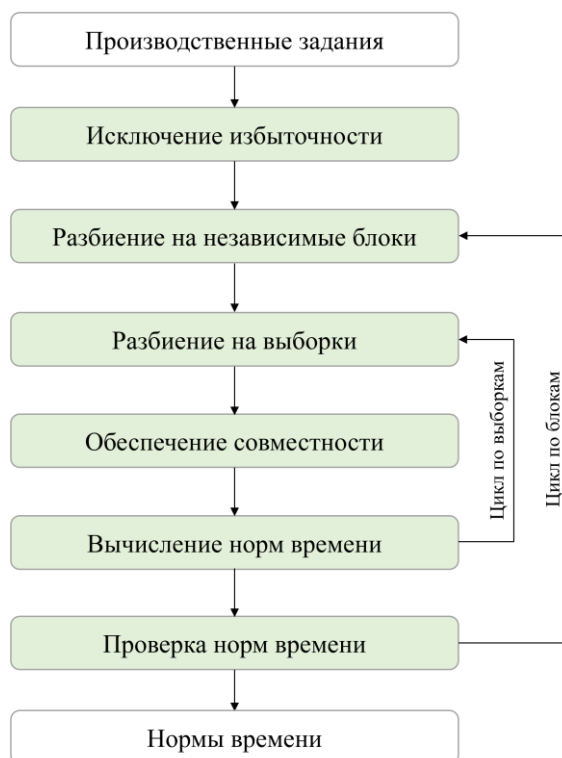


Рис. 1. Общая схема расчета технологических норм времени

Fig.1. General scheme for calculating technological time norms

В качестве входных данных выступают оцифрованные производственные задания, накопленные в течении определенного периода времени. Дополнительно может быть предоставлена информация о графиках работы и статистика фактической загрузки производственных подразделений, рабочих центров, оборудования, персонала. На этапе «Производственные задания» вся исходная информация преобразуется в исходные неравенства вида (3) и (4). Далее, на следующем этапе «Исключение избыточности» исходные неравенства преобразуются к виду (13), и при помощи алгоритма удаления избыточных производственных заданий осуществляется формирование новой системы без избыточных элементов.

Отфильтрованная система неравенств вида (13) поступает на следующий этап «Разбиения на независимые блоки», где алгоритмом разбиения исторических данных осуществляется выделение независимых выборок, для каждой формируется собственная система неравенств вида (13). Каждая выборка в виде системы неравенств (13) проходит через этап «Обеспечение совместности», где итерационным методом ортогональных проекций Агмона-Моцкина осуществляется проверка на совместность системы, идентифицируются и отбрасываются противоречивые ограничения. Затем каждая выборка в виде совместной системы неравенств (13) отправляется на этап «Вычисления норм времени», где формируется и при помощи симплекс-метода решается задача вида (1)-(5), вычисляются оценки технологических норм времени.

Поскольку на этапах «Разбиения на независимые блоки» и «Обеспечение совместности» была отброшена часть информации, на этапе «Проверка норм времени» осуществляется подстановка полученных оценок технологических норм времени во все исходные неравенства. В качестве результатов анализа на этапе «Нормы времени» Пользователю будет доступна не только информация в виде рассчитанных оценок технологических норм времени, но и также перечень «подозрительных на наличие ошибок» производственных заданий, соответствующих противоречивым неравенствам.

Заключение

Сформулирована и рассмотрена проблема выверки и коррекции пооперационных технологических норм времени. На концептуальном уровне описана технология практического преодоления обозначенной проблемы за счет анализа исторических данных работы производства за некоторый период. Построена математическая модель и поставлена задача линейной оптимизации, решение которой обеспечивает нахождение оценок пооперационных технологических норм времени. Выполнен анализ потенциальных проблем, связанных с извлечением минимального возможного набора исходных данных реального производства, главная из них связана с большим объемом исходных данных. Предложены эффективные методы исключения избыточных данных и декомпозиции данных на независимые выборки. Описаны методы разбиения данных на выборки требуемых размеров по критерию минимизации информационных потерь. Предложены алгоритмы работы с данными, содержащие ошибки. Описана общая схема расчета технологических норм времени. Таким образом, реализация и внедрение предложенного решения позволит обеспечить инженеров-технологов дополнительным инструментом для анализа, верификации, выверки и коррекции пооперационных технологических норм времени. В итоге упростится внедрение средств автоматизации планирования и оперативного управления производством и повысится качество работ.

Библиографический список

1. **Афраймович, Л.Г.** Задачи планирования и оперативного управления процессом изготовления интегральных схем с микронными и субмикронными топологическими нормами / Л.Г. Афраймович, В.С. Власов, М.С. Куликов, М.Х. Прилуцкий, Д.В. Седаков, Н.В. Старостин, А.В. Филимонов // Автоматизация в промышленности. 2014. № 8. С. 17-21.
2. **Афраймович, Л.Г.** Планирование и оперативное управление процессом изготовления сложных изделий / Л.Г. Афраймович, В.С. Власов, М.С. Куликов, М.Х. Прилуцкий, Н.В. Старостин, А.В. Филимонов // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 5138-5149.
3. **Прилуцкий, М.Х.** Распределение производственных ресурсов в задачах объемного планирования в условиях неполноты данных / М.Х. Прилуцкий, О.В. Кривошеев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2022. № 2 (137). С. 36-43.
4. **Малюк, В. И.** Производственный менеджмент: учебное пособие / В.И. Малюк, А.М. Немчин. – СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
5. **Хачиян, Л. Г.** Полиномиальные алгоритмы в линейном программировании // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1980. Т. 20. № 1. С. 51-68.
6. **Karmarkar, N.** A New Polynomial-Time Algorithm for Linear Programming. STOC '84: Proceedings of the sixteenth annual ACM symposium on Theory of computing. 1984. P. 302-311
7. **Игумнов, Л.А.** Проблема существования решения у большеразмерных задач линейного программирования / Л.А. Игумнов, М.Х. Прилуцкий // Информационные системы и технологии ИСТ-2020. Сборник материалов XXVI Международной научно-технической конференции. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. С. 825-829.
8. **Borgwardt, K.** The Simplex Method: A Probabilistic Analysis. Algorithms and Combinatorics. Vol 1. Springer Berlin Heidelberg, 1987. – 220 p.
9. **Джордж, А.** Численное решение больших разреженных систем уравнений / А. Джордж, Дж. Лю. – М.: Мир, 1984. – 333 с.
10. **Меликов, А.М.** Применение графов для проектирования дискретных устройств / А.М. Меликов, Л.С. Бернштейн, В.М. Курейчик. – М.: Наука, 1974. – 304 с.
11. **Батищев, Д.И.** К-разбиение графов / Д.И. Батищев, Н.В. Старостин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Математическое моделирование и оптимальное управление. 2000. № 1. С. 27-35.
12. **Батищев, Д.И.** Гибридный подход к решению экстремальных задач на графовых структурах. Д.И. Батищев, Н.В. Старостин // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2002. № 3. С. 10-17.

13. **Batischev, D.L.** Multilevel hypergraph partitioning / D.L. Batischev, N.V. Starostin, A.V. Filimonov // Information Technologies. 2008. № S5. С. 1-32.
14. **Старостин, Н.В.** Многоуровневый итерационный алгоритм декомпозиции графа // Системы управления и информационные технологии. 2015. № 3 (61). С. 27-30.
15. **Старостин, Н.В.** Разработка и реализация точного алгоритма сбалансированного разбиения графа / Н.В. Старостин, Е.С. Сударский // Информационные системы и технологии ИСТ-2020. Сборник материалов XXVI Международной научно-технической конференции. – Н. Новгород: НГТУ им. П.Е. Алексеева, 2020. С. 870-874.

*Дата поступления
в редакцию: 08.08.2023*

*Дата принятия
к публикации: 01.11.2023*

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.039.4

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_51

АНАЛИЗ ШУМОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИГНАЛОВ ДАТЧИКОВ ПРЯМОГО ЗАРЯДА НА МАНЕВРЕННЫХ РЕЖИМАХ ВВЭР**Г.В. Аркадов**

ORCID: 0009-0005-4464-9973 e-mail: arkgen47@gmail.com

Некоммерческое партнерство содействии развитию системной инженерии «Райз»
Москва, Россия**В.И. Павелко**Акционерное общество «Научно-технический центр «Диалом»
Москва, Россия**М.Т. Слепов**

ORCID: 0000-0001-5563-0526 e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии
на атомных станциях, Нововоронежская атомная станция
Нововоронеж, Россия

Исследовано влияние перемещения органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) на нейтронный шум датчиков прямого заряда (ДПЗ) при проведении маневренных режимов реакторной установки ВВЭР-1200. В исследуемых режимах частота шагов регулирующих ОР СУЗ резко возрастает по сравнению со стационарным 100 % режимом мощности распределительного устройства (РУ). Их воздействие на нейтронный поток носит высокочастотный, вплоть до 8 Гц, глобальный характер. Обнаружено резонансное возбуждение нейтронного поля на частоте акустической стоячей волны – 8,6 Гц при перемещении ОР СУЗ.

Ключевые слова: нейтронный шум, автоспектральная плотность мощности, когерентность, акустическая стоячая волна, датчик прямого заряда, ВВЭР-1200, маневренный режим, ксеноновые колебания.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Аркадов, Г.В. Анализ шумовой составляющей сигналов датчиков прямого заряда на маневренных режимах ВВЭР / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 51-61. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_51

ANALYSIS OF NOISE COMPONENT OF DIRECT CHARGE SENSOR SIGNALS IN MANEUVERABLE VVER MODES**G.V. Arkadov**

ORCID: 0009-0005-4464-9973 e-mail: arkgen47@gmail.com

Non-profit Partnership to promote the Development of system Engineering «Rise»
Moscow, Russia**V.I. Pavelko**Joint Stock Company «Scientific and technical center «Diaprom»
Moscow, Russia

M.T. Slepov

ORCID: 0000-0001-5563-0526 e-mail: slepovmt@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Branch of the Joint-Stock Company «Russian Concern for the Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants» Novovoronezh Nuclear Power Plant
Novovoronezh, Russia

Abstract. The influence of the movement of the control and protection system (CPS) control elements on the neutron noise of direct charge sensors during maneuvering modes of the VVER-1200 reactor is investigated. The frequency of the steps of the CPS control elements increases sharply in the studied maneuverable modes compared to the stationary full power (100%) mode of the switchgear. Their impact on the neutron flux is high-frequency, up to 8 Hz, global in nature. Resonant excitation of the neutron field at the frequency of the acoustic standing wave (8.6 Hz) when moving the CPS control elements was detected.

Key words: neutron noise, autospectral power density, coherence, acoustic standing wave, direct charge sensor, water-water energetic reactor, VVER-1200, maneuverable mode, xenon oscillations.

FOR CITATION: G.V. Arkadov, V.I. Pavelko, M.T. Slepov. Analysis of noise component of direct charge sensor signals in maneuverable VVER modes. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 51-61.
DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_51

Введение

Многолетние разработки маневренных режимов водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) находятся на стадии натурных экспериментов [1]. В июле 2022 г. были выполнены маневренные испытания на блоке 1 НВАЭС-2. Планировалось, что в течение суток реактор вначале будет переводиться с максимальной допустимой скоростью (3 % / мин) из состояния 96 % в состояние 77 % номинальной мощности, далее в течение 5 ч оно должно быть стационарным. Затем с максимальной допустимой скоростью (1 % / мин) производится подъем мощности вновь до 96 %, и данное стационарное состояние поддерживается в течение 19 ч. В итоге получаем суточный цикл: 96 % – 77 % – 96 %. Планировалось пять таких суточных циклов, следующих непрерывно один за другим. После завершения данного этапа испытаний планировался цикл 96 % – 56 % – 96 % в течение следующих пяти суток, непрерывно один за другим (рис. 1). Предполагалось, что всякий раз в одно и то же время суток (8.00 мск) мощность РУ будет снижаться с 96 до 77 % пять раз, а затем с 96 до 56 % также пять раз. Таким образом, в десятисуточных испытаниях достигаются маневренные режимы с заданной кривой изменения мощности с суточным периодом.

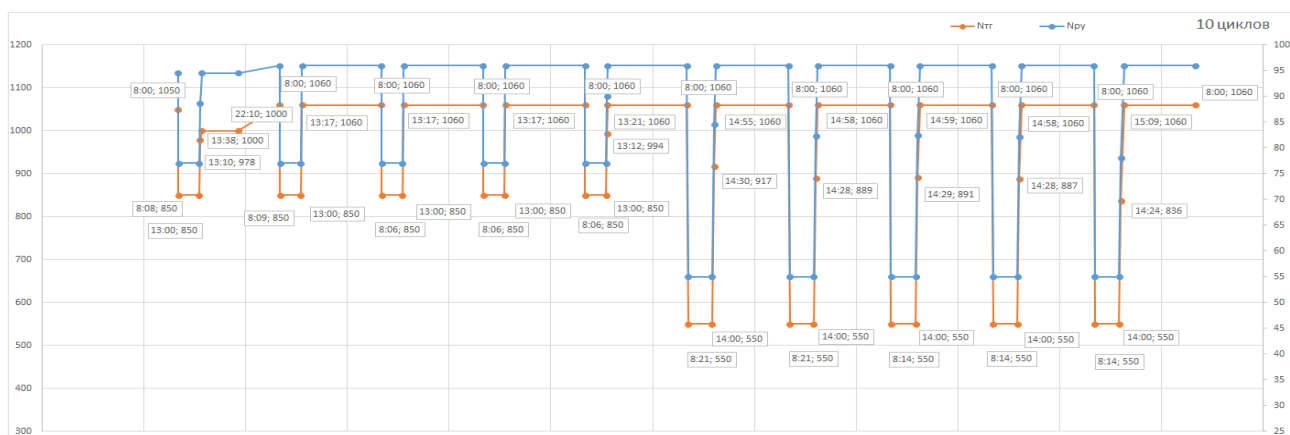


Рис. 1. Десять суточных циклов мощности турбогенератора и реактора

Fig. 1. Ten daily power cycles of the turbogenerator and reactor

Любое изменение мощности РУ вызывает ксеноновые колебания (КК). Их подавление – штатная операция при эксплуатации РУ любого типа ВВЭР. Для реализации планируемого суточного изменения мощности, очевидно, необходимо решать и задачу подавления КК. Но это не является единственной задачей, которую предстоит решить для достижения маневренного режима. Нисходящее воздействие на мощность РУ вызывает нисходящий тренд КК длиной в четверть периода (порядка 7 ч); т.н. свободные КК без последующих управлений мощностью имеют период от 28 до 30 ч (рис. 1). Таким образом, в течение первых пяти часов на пониженной мощности будет наблюдаться монотонный нисходящий тренд свободных КК. В соответствии с программой испытаний, в этот период необходимо удерживать постоянную мощность РУ на уровне 77 %, для чего необходимо производить подавление КК. Поэтому оно начинается сразу после достижения 77 % мощности РУ и производится с помощью перемещения регулирующих групп № 11 и № 12 вверх, а также водообменом борной кислотой (БК) или чистым дистиллятом (ЧД). Регулирующие группы перемещаются автоматически при помощи авторегулятора мощности (АРМ), при этом допускается также совмещение автоматического и ручного управления. Цель регулирования – подавление КК и удержание с высокой точностью стационарного уровня мощности 77 % с изменением при этом положения регулирующих групп ОР СУЗ и концентрации БК. После возврата с 77 на 96 % мощности РУ у свободных КК будет наблюдаться тренд вверх (увеличение мощности). Цель управления аналогична: удерживать стационарную мощность РУ, но уже на уровне 96 % и уже в течение 19 ч до окончания суток. В начале этого интервала времени мощность РУ увеличивается за счет перемещения 12-й группы ОР СУЗ вверх, а после достижения заданного уровня мощности 12-я группа вновь вводится в активную зону, и стабилизация мощности РУ производится водообменом с уменьшением концентрации БК [2].

Источники измерительной информации в испытаниях маневренных режимов

Две штатные системы контроля – система верхнего блочного уровня (СВБУ) и система внутриреакторного контроля (СВРК) – в режиме реального времени синхронно накапливают архивы штатных сигналов со скоростью не более одного измерения в 1 с (т.е. с частотой дискретизации не более 1 Гц). Персонал отдела технической диагностики Нововоронежской Атомной электростанции (ОТД НВАЭС) извлек из архивов этих систем выборку основных штатных сигналов за период 11 суток с 10 по 20 июля с частотой дискретизации 0,0167 Гц (т.е. одно измерение за 60 с), всего 16000 точек [3, 4]. Очевидно, что данная выборка не содержит быстрых компонент процессов, но отражает их общий характер на длительном (11 суток) интервале времени. Данный временной интервал покрывает весь интервал испытаний маневренных режимов. Выборка включает:

- мощность РУ;
- температуры теплоносителя (ТН) горячей и холодной ниток по петлям;
- концентрацию БК;
- положения 10, 11 и 12 групп ОР СУЗ;
- уровень ТН в компенсаторе давления (КД);
- аксиальный офсет (АО), вычисленный по сигналам датчиков прямого заряда (ДПЗ);
- скорректированные средние токи ДПЗ 06-23 (7 штук) с ОР СУЗ 12-й группы.

Специально для анализа маневренных режимов был составлен план регистрации «быстрых» процессов, в соответствии с которым с высокой частотой дискретизации (1 кГц) производилась синхронная многоканальная регистрация шумовых компонент сигналов:

- ДПЗ (14 шт. сигналов ДПЗ двух сборок каналов нейтронных измерений – КНИ);
- внезонных ионизационных камер – ИК (3 шт.);
- корпусных (4 шт.) и петлевых (8 шт.) акселерометров.

Длительность регистрации «быстрых» процессов составляет несколько часов. В данной работе рассматривается первая запись, длительность которой составила 400 мин, начало соответствует времени достижения стационарного состояния 77 %, а конец – стационарному уровню 96 %. В каждой записи коммутировалась новая пара КНИ [3, 4]. В первой из них в качестве первого КНИ выступала сборка 04-29, в качестве второго КНИ – сборка 04-27. Необходимо отметить, что КНИ 04-29 установлена в тепловыделяющей сборке (ТВС), где перемещается ОР СУЗ 12-й группы, а КНИ 04-27 находится в соседней ТВС. Для получения спектральных характеристик перечисленных сигналов процессы подвергались цифровой фильтрации и разреживанию так, чтобы верхняя частота составляла или 32 или 16 Гц.

Совместный анализ «быстрых» и «медленных» измерений

На интервале времени длительностью 400 мин, во вторые сутки испытаний, начиная с мощности 77 % и заканчивая мощностью 96 %, были произведены шумовые измерения с пересечением сигналов в соответствии с предыдущим разделом [5, 6]. В «медленных» измерениях положение ОР СУЗ во времени на уровне мощности 77 % представляется «медленной» монотонно возрастающей ступенчатой функцией времени. В действительности система группового и индивидуального управления (СГИУ) генерирует довольно высокочастотные управления положением ОР СУЗ. Так, в шумах нейтронных датчиков внезонных (ИК) и внутризонных (ДПЗ) наблюдаются δ -образные возмущения нейтронного потока значительной по отношению к фону амплитуды (рис. 2). ДПЗ с номерами 7, 6, 5, 4, 3 синхронно реагируют на перемещения ОР СУЗ, что свидетельствует об общей причине их происхождения. Амплитуда одного выброса может превосходить СКЗ фона в десятки раз, что значительно увеличивает мощность (дисперсию) процесса [3, 4].

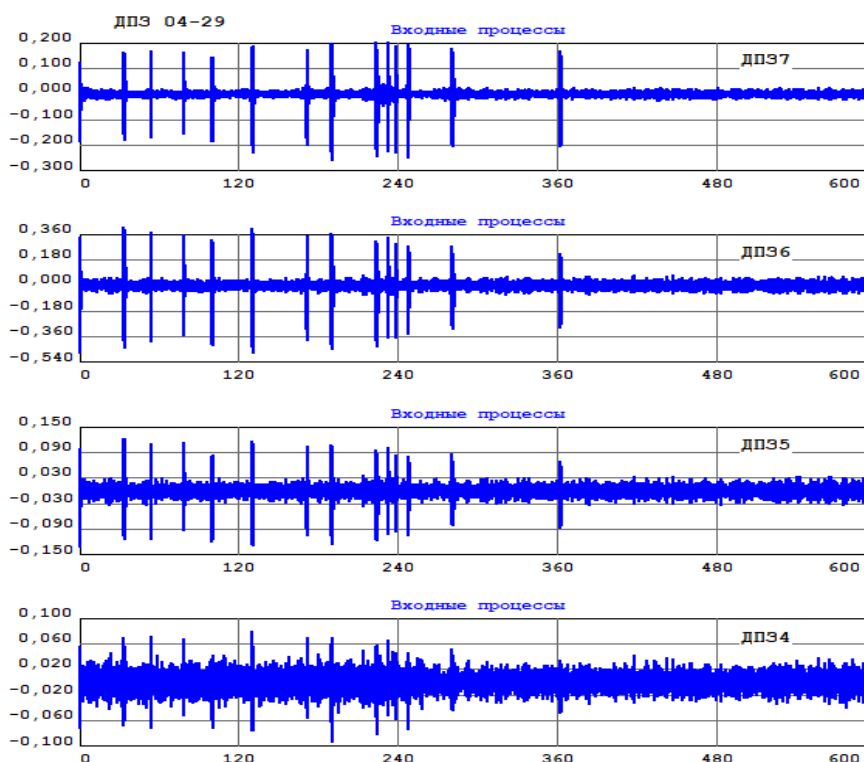


Рис. 2. Реализации шумов верхних ДПЗ (ДПЗ7,6,5,4 – сверху – вниз) в ТВС 04-29 с ОР СУЗ 12 группы на уровне мощности 77 % в течение 10 мин

Fig. 2. Implementation of noise from the upper direct charge sensors (DPZ 7,6,5,4 – top to down) in the fuel assembly 04-29 with the CPS control elements of group 12 at a power level of 77 % for 10 minutes

ОР СУЗ 12-й группы находится в той же ТВС, что и измеряемые ДПЗ КНИ № 04-29, т.е. расстояние между ПС СУЗ и ДПЗ7 составляет несколько см, а 18 направляющих каналов для перемещения ОР СУЗ в одной ТВС обладают центральной симметрией по отношению к вертикальной оси симметрии ТВС и равномерно распределены в поперечнике ТВС. Измерительный канал КНИ смещен от вертикальной оси симметрии ТВС так, что в нескольких см окрестности КНИ расположены четыре ПС СУЗ. Их перемещение, как локальное возмущение нейтронного поля, фиксируется ближайшими ДПЗ.

Для оценки одной спектральной характеристики сигналов ДПЗ выбирался участок в 10 мин, т.е. на всей длине реализации (400 мин) было получено 40 штук автоспектров плотности мощности (АСПМ), которые представляются в трехмерном виде «водопада» спектра (рис. 3), таким образом, на рис. 2 показаны выборки нейтронных шумов для получения всего одной АСПМ. На каждом таком десятиминутном интервале встречается разное число δ -образных возмущений, но в любом случае они определяют гребенчатую форму спектра. Например, на стационарном уровне мощности в 77 %, средняя интенсивность перемещений 12-й группы ОР СУЗ составляет величину порядка одного шага за минуту. Выбросы нейтронного поля из-за перемещения ОР СУЗ создают импульсную нестационарность. В процессе увеличения мощности РУ с 77 до 96 % за 6,5 мин ОР СУЗ совершил 31 перемещение, из них 14 перемещений с двойным шагом и 17 – с одинарным. Таким образом, всего 45 одинарных шагов или порядка семи шагов за одну минуту, т.е. каждая из сорока АСПМ на рис. 3 имеет индивидуальный образ. При этом не имеет значения, в каком месте реализации встретилось δ -образное возмущение и каково их число. После спектрального преобразования получим гармонический ряд частотных максимумов. Единственный шаг ОР СУЗ (единственный выброс) на интервале времени оценивания АСПМ 10 мин – слабо увеличивает общую дисперсию сигнала, а гребенчатая структура находится на уровне собственного нейтронного фона [7-9]. Но, уже начиная с момента совместного движения 11 и 12 групп ОР СУЗ появляется характерная гребенчатая структура в АСПМ сигнала ДПЗ и в функции когерентности сигналов ИК1-ИК2 (красная вертикальная стрелка на рис. 4).

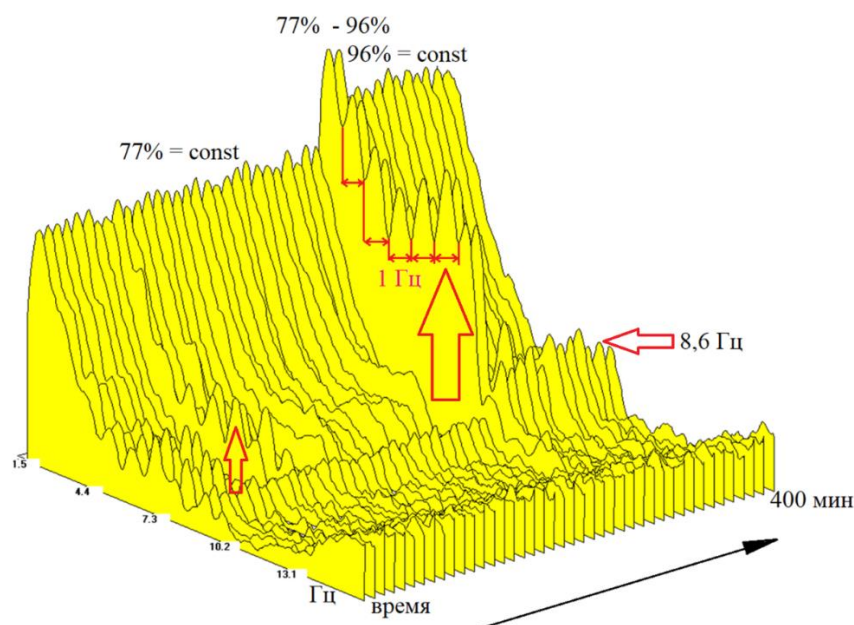


Рис. 3. Водопад спектров АСПМ в логарифмическом масштабе для сигнала ДПЗ6 в течение всего времени «быстрых» измерений

Fig. 3. Waterfall of power density autospectra on a logarithmic scale for the direct charge sensor DPZ6 signal during the entire time of «fast» measurements

Частота дискретизации СВРК величиной не более 1 Гц не дает информацию о высокочастотном возмущении со стороны ОР СУЗ, поэтому при исследовании маневренных режимов требуется дополнительно проводить высокочастотную регистрацию нейтронных шумов. Если развернуть во времени δ -образные возмущения (рис. 2), то оказывается, что они имеют длительность в точности 1 с и состоят из высокочастотного наполнения, в которых неоднократно повторяется элементарный шаг длительностью 0,125 с, или частота 8 Гц, что свидетельствует о высокочастотном полигармоническом возмущении нейтронного поля (рис. 5). Теперь гребенчатая структура обрела числовые параметры: спектральная характеристика шума ДПЗ или ИК имеет гребенчатый вид с шагом по частоте в точности 1 Гц, и эти гармоники достигают, по крайней мере, частоты 8 Гц (рис. 3).

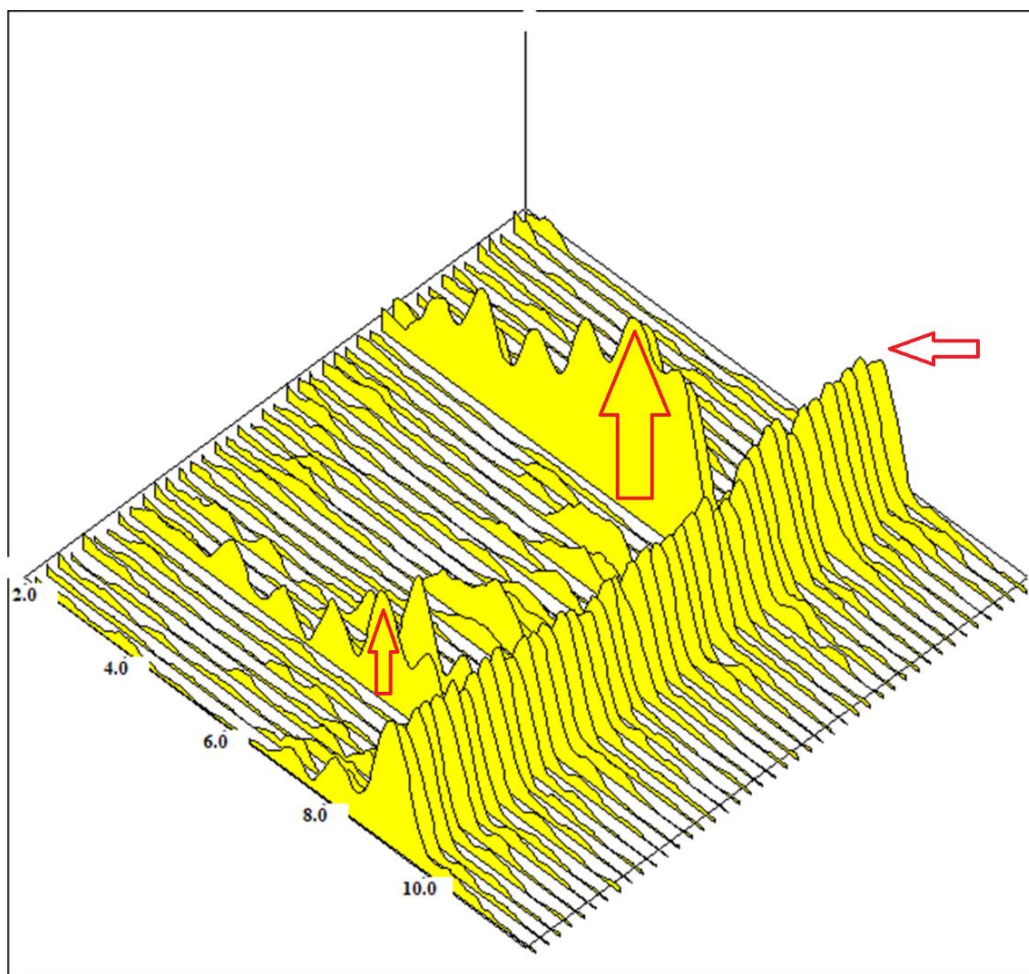


Рис. 4. Семейство функций когерентности сигналов удаленных друг от друга ИК1-ИК2 за все время измерений нейтронных шумов (400 мин)

Fig. 4. Family of coherence functions of signals distant from each other ИК1-ИК2 over the entire time of neutron noise measurements (400 min)

Нейтронно-шумовые поля принято подразделять на глобальные и локальные. Глобальные шумы пространственно независимы, описываются точечной нейтронной кинетикой и характерны для низкочастотных составляющих (например, с периодом менее 1 с). Возмущения нейтронного поля многократными перемещениями ОР СУЗ носят глобальный характер, т.е. фиксируются удаленными нейтронными датчиками. Например, формы соответствующих фрагментов сигналов удаленных ДПЗ7 и ИК идентичны друг другу (рис. 5), а в функции коге-

рентности сигналов ИК1-ИК2, также удаленных друг от друга, присутствует тот же гребенчатый вид с шагом 1 Гц (рис. 4). В данном эксперименте показано, что многократное высокочастотное возмущение нейтронного поля достаточной амплитуды средствами ОР СУЗ может также носить глобальный характер [3, 4, 9-11].

Таким образом, регулирующие группы ОР СУЗ представляют собой не только «тяжелые» по вносимой реактивности органы управления, но и довольно высокочастотные. Их перемещения эквивалентны высокочастотным гармоническим воздействиям, которые изменяют энерговыделение по всему объему активной зоны. При обосновании маневренных режимов необходимо учитывать число циклов воздействия с частотой до 8 Гц. Вблизи частоты 8 Гц находится глобальная корпусная акустическая волна (АСВ_{1К}), покрывающая своей полуволной всю активную зону и модулирующая плотность ТН, а значит, модулирующая и нейронный поток [12, 13].

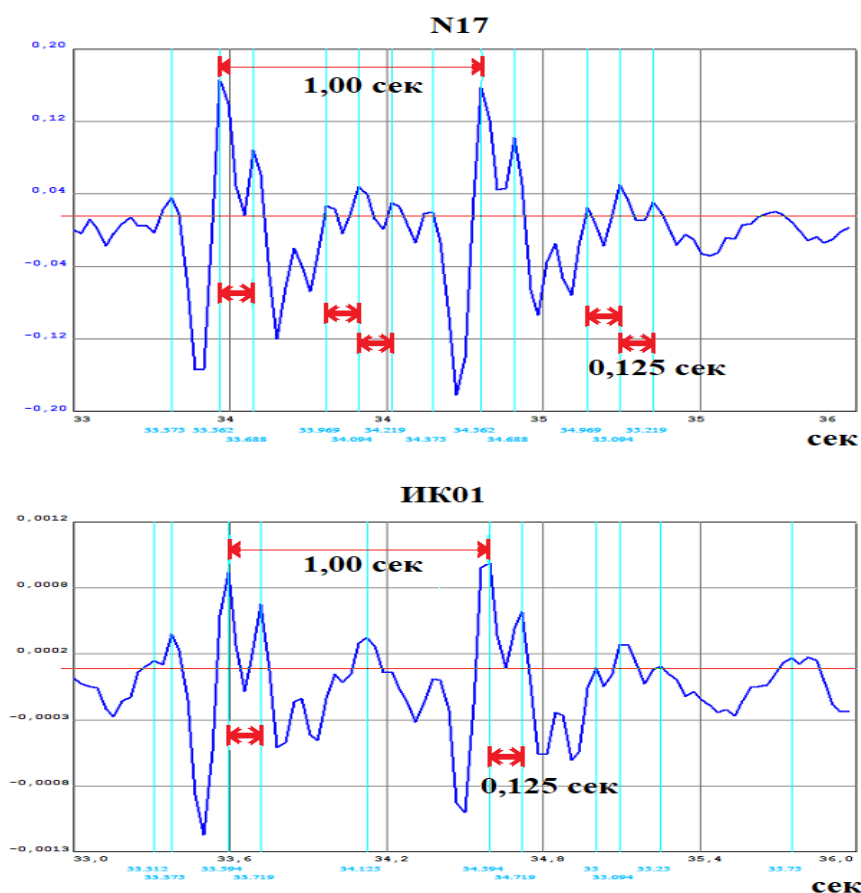


Рис. 5. Двойной шаг ОР СУЗ длительностью две секунды (периодическое возмущение) в сигнале ДПЗ7 (верхний график) и ИК (нижний график)

Fig. 5. Double step of CPS control elements lasting two seconds (periodic disturbance) in the signal of direct charge sensors DPZ7 (top graph) and ionization chambers (bottom graph)

Пошаговые возмущения нейтронного поля в результате перемещения ОР СУЗ со скоростью не более 2 см в секунду «раскачивают» этот барометрический эффект, входя с ним в резонанс. Слишком частое перемещение вверх ОР СУЗ может монотонно увеличивать дисперсию нейтронного потока из-за увеличения амплитуды АСВ_{1К}. Как следует из рис. 3, переход 77 % – 96 % резко увеличивает дисперсию нейтронного шума, а после достижения уровня мощности 96 % удерживается повышенная амплитуда АСВ_{1К} [3]. Чтобы соизмерить амплитуды выбросов сигналов разных ДПЗ друг с другом, на рис. 6 показаны «склеенные» во вре-

мени их реализации. Очевидно, что максимум выбросов наблюдается в горизонте ДПЗ6. Перемещение любой из регулирующих групп ОР СУЗ представляет собой глобальное возмущение нейтронного поля.

Помимо выбросов амплитуд нейтронного потока из-за перемещений ОР СУЗ, наблюдаются такие нестационарности, как «медленный» рост дисперсии (СКЗ) фона во времени при многократных шагах ОР СУЗ (рис. 6). На этих графиках СКЗ нейтронного фона много меньше амплитуды единичного выброса, но при многократных шагах ОР СУЗ в течение, например, кампании, СКЗ может достигнуть nepoзволительно больших величин [14, 15]. Мощность стоячих волн в ТН ГЦК определяется амплитудами пульсаций давления, производимых четырьмя ГЦН. При маневрировании мощностью РУ режим функционирования ГЦН остается неизменным, то есть и параметры АСВ1К остаются неизменными. АСВ1К по отношению к активной зоне является неизменной вынуждающей силой, модулирующей нейтронный поток на частоте 8,6 Гц. После многократного перемещения ОР СУЗ происходит рост амплитуды колебаний нейтронного потока на частоте 8,6 Гц, как результат резонансного возбуждения. Частота внешнего механического воздействия, точнее, гармоника 8 Гц, производимая перемещением ОР СУЗ, практически совпала с центральной частотой низкодобротного резонанса АСВ1К, который также представляет собой внешнее, но барометрическое воздействие на активную зону. Два разных физических явления – механическое и барометрическое – резонансно увеличили амплитуду нейтронного потока на частоте вблизи 8,6 Гц.

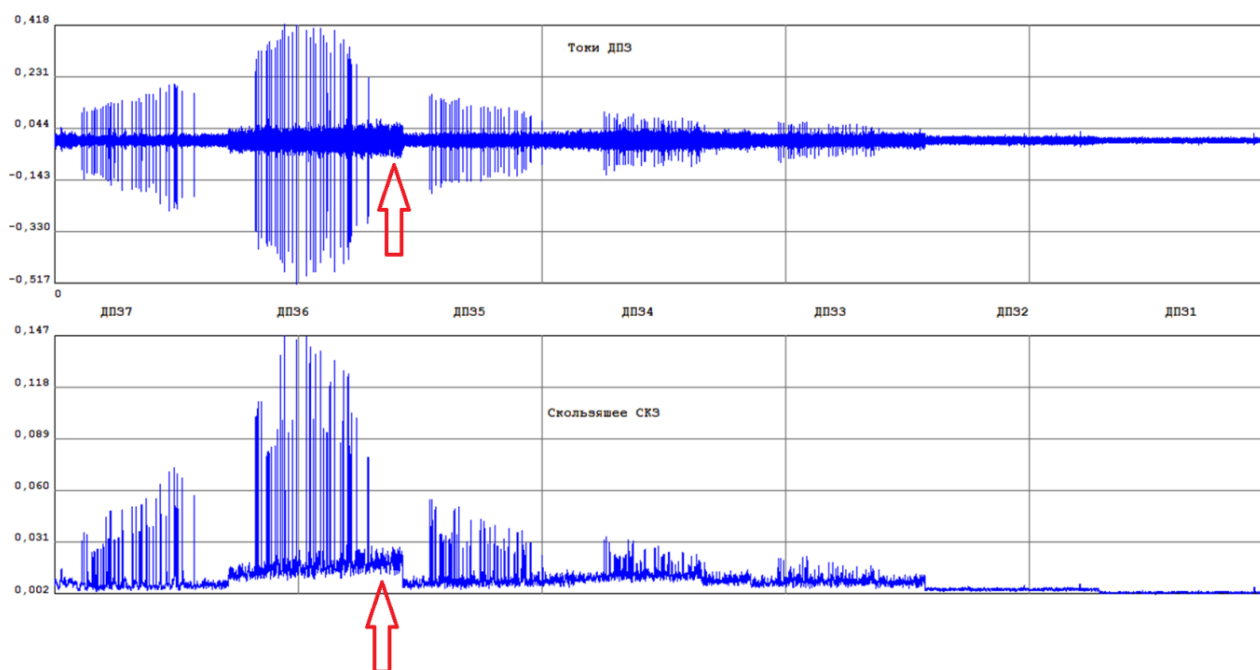


Рис. 6. «Склеенные» один за другим во времени реализации семи ДПЗ (ДПЗ7,..., ДПЗ1 – слева – направо) при переходе мощности РУ с 77 до 96 % за 6,5 мин каждая (верхний график). Их скользящие СКЗ (нижний график)

Fig. 6. «Склеенные» один за другим во времени реализации семи ДПЗ (ДПЗ7,..., ДПЗ1 – слева – направо) при переходе мощности РУ с 77 до 96 % за 6,5 мин каждая (верхний график). Их скользящие СКЗ (нижний график)

Резонансное возбуждение подразумевает взаимодействие совпадающих по частоте явлений: не только ОР СУЗ воздействует на нейтронное поле, но и, наоборот, нейтронное поле может создавать ненулевой градиент вертикальных сил с частотой 8,6 Гц, действующих на ОР СУЗ. В маневренных режимах за сутки физически производится два переходных процесса 96 % – 77 % и 77 % – 96 % и два стационарных уровня мощности – 77 % и 96 %. Однако для реализации этих четырех режимов в течение одних суток органы управления мощностью РУ

совершают многократные воздействия на активную зону, создавая тем самым непрерывный нестационарный шумовой нейтронный процесс. Свойства шумового нейтронного поля ВВЭР-1200 достаточно хорошо изучены, но только для стационарных режимов РУ [16, 17]. Таким образом, многократные перемещения ОР СУЗ резонансно возбуждают АСВ_{1к} (4-5, 5-6, 6-7, 4-6, 5-7, 4-7, 3-7), что приводит к монотонному увеличению амплитуды АСВ_{1к}. АСВ_{1к} – явление глобальное, но доминирующее вверху активной зоны. В нижней половине активной зоны резонансное возбуждение АСВ_{1к} на частоте 8,6 Гц не наблюдается (3-4). ПС ОР СУЗ 12-й группы, начиная свое перемещение с горизонта ДПЗ5, более всего изменяет когерентности сигналов ДПЗ5-ДПЗ6. Каждая из сорока функций когерентности сигналов ДПЗ5-ДПЗ6 имеет гребенчатый вид, реагируя тем самым локально и на малое число шагов ОР СУЗ. Когерентность ДПЗ5-ДПЗ6 может выполнять тестовые функции при проведении маневренных режимов. Сигналы ДПЗ одного КНИ, установленного в ТВС, в котором перемещается ОР СУЗ 12-й группы, чувствительны и к локальным, и к глобальным нестационарным нейтронным эффектам. К ним относится и высокочастотный эффект резонансного возбуждения АСВ_{1к}. Шумовые нейтронные измерения необходимо проводить совместно с другими штатными измерениями при проведении испытаний маневренных режимов.

Заключение

1. В исследуемых маневренных режимах частота шагов регулирующих ОР СУЗ резко возрастает по сравнению со стационарным 100 % режимом мощности РУ. Их воздействие на нейтронный поток носит высокочастотный, вплоть до 8 Гц, глобальный характер.

2. При перемещении ОР СУЗ происходит резонансное возбуждение нейтронного поля на частоте акустической стоячей волны – 8,6 Гц.

3. Скачки нейтронной мощности при перемещении ОР СУЗ вызывают скачки температуры топлива, температуры оболочки твэлов, что вызывает в них дополнительные напряжения. Требуется обоснование циклической механической прочности оболочек твэл при большом количестве перемещений ОР СУЗ, из-за чего твэл «проскальзывает» относительно дистанционирующих решеток, что усиливает эффект фреттинг-коррозии [18].

4. В маневренных режимах требуются дополнительные обоснования:

- надежности системы группового и индивидуального управления при резком повышении среднего числа шагов ОР СУЗ и, как следствие, повышения температуры электромагнитов СУЗ;
- теплотехнической надежности и ресурса поглощающего стержня ОР СУЗ и в части радиационной стойкости (не распухания), и в части *непревышения* допустимых пределов выгорания, и в части циклического механического нагружения при глубоком погружении в активную зону, и в части виброресурса [19];
- отсутствия такого формоизменения геометрии ТВС (в частности, прогиба ТВС), который бы препятствовал перемещению ОР СУЗ;
- циклического температурного нагружения ВКУ;
- вибростойкости ТВС при увеличении поперечного расхода ТН;
- *невсплытия* ТВС на сниженных уровнях мощности РУ при уменьшении средней температуры ТН и увеличении плотности ТН;
- достаточной эффективности аварийных ОР СУЗ при различных положениях регулирующих групп ОР СУЗ на пониженной мощности;
- допустимости суточного повышения неравномерности поля энерговыделения и неравномерности выгорания топлива по высоте.

5. В соответствии с экспериментальными результатами испытаний маневренных режимов необходимо верифицировать программный комплекс «Имитатор реактора», а также расчетно подтвердить *непревышение* порога по линейной тепловой нагрузке на твэл и *невозникновение* кризиса теплоотдачи [20].

6. Помимо штатных сигналов СВРК и СВБУ, для анализа маневренных режимов необходимо осуществлять многоканальные шумовые нейтронно-вибрационные измерения.

7. Построение приемлемого с практической точки зрения маневренного режима РУ с ВВЭР-1200 представляет собой многофакторную задачу оптимального управления, которая затрагивает фундаментальные проблемы безопасной эксплуатации, надежности, ресурса оборудования и экономичности его функционирования. Необходимо согласованно решать такие взаимно противоречивые экстремальные задачи, как:

- минимизация числа шагов регулирующих групп ОР СУЗ для поддержания стационарного уровня мощности в заданных пределах;
- минимизация объема водообмена;
- минимизация числа актов авторегулирования в системе компенсации давления.

Библиографический список

1. **Игнатенко, Е.И.** Маневренность реакторов типа ВВЭР. Библиотека эксплуатационника АЭС; вып. 6 / Е.И. Игнатенко, Ю.Н. Пыткин – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 88 с.
2. **Аверьянова, С.П.** Контроль локальной линейной мощности твэлов в активной зоне ВВЭР- 1000 с помощью офсет-мощностной диаграммы / С.П. Аверьянова., Г.Л. Лунин, В.Н. Проселков // Атомная энергия. 2002. Т. 93. № 1. С. 13-18.
3. **Аркадов, Г.В.** Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. Серия: Библиотека технической диагностики атомных электростанций / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов. – М.: Наука, 2018. – 469 с.
4. **Аркадов, Г.В.** Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. Серия: Библиотека технической диагностики атомных электростанций / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов. – М.: Наука, 2021 – 222 с.
5. **Терешонок, В.А.** Предупреждение и подавление аксиальных ксеноновых колебаний в активной зоне ВВЭР-1000 / В.А. Терешонок, В.С. Степанов, В.П. Поваров, О.В. Лебедев, В.В. Макеев // Теплоэнергетика. 2003. № 5. С. 11-15.
6. **Аверьянова, С.П.** Внедрение усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением активной зоны ВВЭР-1000 на Хмельницкой АЭС / С.П. Аверьянова, Ю.М. Семченков, П.Е. Филимонов, А.К. Горохов, В.Л. Молчанов, А.А. Коренной, В.П. Макеев // Атомная энергия. 2005. Т. 98. № 6. С. 414- 421.
7. **Аверьянова, С.П.** Испытание усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением ВВЭР-1000 в условиях маневренных режимов на Тяньваньской АЭС (Китай) / С.П. Аверьянова, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, П.Е. Филимонов, Лю Хайтао, Ли Йоу // Атомная энергия. 2007. Т. 103. № 5. С. 277-282.
8. **Аверьянова, С.П.** Развитие, внедрение и современное состояние расчетной программы «Имитатор реактора» / С.П. Аверьянова, А.И. Ковель, В.В. Мамичев, П.Е. Филимонов // Атомная энергия 2008. Т. 105. № 4. С. 237-240.
9. **Аверьянова, С.П.** Ксеноновая устойчивость ВВЭР-1200 / С.П. Аверьянова, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. 2009. Т. 107. № 6. С. 348-351.
10. **Аверьянова С.П.** Температурное регулирование и маневренность ВВЭР-1000 / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. 2010. Т. 109. № 6. С. 198-202.
11. **Аверьянова, С.П.** Работа ВВЭР-1200/130 в суточном графике нагрузки / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. 2012. Т. 113. № 5. С. 247-252.
12. **Аверьянова, С.П.** Развитие способов управления ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. 2013. Т. 114. № 5. С. 249-253.
13. **Глушенков, Р.С.** Исследование ключевых аспектов внедрения режима суточного регулирования мощности на АЭС Украины // Технологический аудит и резервы производства. 2015. Т. 2-1(22). – С.18-26. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.41404.

14. **Аверьянова, С.П.** Метод офсет-мощностной фазовой диаграммы для управления энерговыделением реактора / С.П. Аверьянова, Н.С. Вохмянина, Д.А. Злобин, П.Е. Филимонов, В.И. Кузнецов, В.Б. Лаговский // Атомная энергия. 2016. Т. 121. № 3. С. 123-127.
15. **Выговский, С.Б.** Оптимизация алгоритмов управления ЯЭУ с ВВЭР-1200 для минимизации водообмена в 1-ом контуре при реализации суточных маневренных режимов / С.Б. Выговский, Р.Т. Аль Малкави, А.Г. Хачатрян, Ш.А. Абраамян // Глобальная ядерная безопасность. 2018. № 3(28). С. 49-63.
16. **Аверьянова, С.П.** Исследование ксеноновых переходных процессов на Нововоронежской АЭС / С.П. Аверьянова, Н.С. Вохмянина, Д.А. Злобин, П.Е. Филимонов, В.П. Поваров // Атомная энергия. 2018. Т. 124. № 4. С. 183-187.
17. **Филимонов, П.Е.** Испытания ВВЭР-1200 при эксплуатации в режиме суточного графика нагрузки на 6-м энергоблоке Нововоронежской АЭС / П.Е. Филимонов, Ю.М. Семченков, В.В. Малышев, Н.Ю. Долгополов, В.П. Поваров, И.Н. Гусев // Атомная энергия. 2020. Т. 129. № 3. С. 123-129.
18. **Поваров, В.П.** Экспериментальные исследования нейтронно-физических процессов в активной зоне ВВЭР-1200 / В.П. Поваров, В.Ф. Украинцев, Е.И. Голубев, М.М. Жук. – Нововоронеж: ООО РПГ «Девятое облако», 2021. – 264 с.
19. **Филимонов, П.Е.** Испытания нестационарных режимов работы ВВЭР-1200 на первом энергоблоке Белорусской АЭС / П.Е. Филимонов, А.А. Дубов, Ю.М. Семченков, А.М. Бондарь, Д.Ф. Воробьев // Атомная Энергия. 2021. Т. 131. Вып. 248. № 5. С. 243-249.
20. **Долгополов, Н.Ю.** Результаты испытаний маневренных режимов на энергоблоках АЭС-2006: сборник тезисов VI Международной научно-технической конференции «Ввод АЭС в эксплуатацию» / Н.Ю. Долгополов, П.П. Мезенцев. – М.: Атомтехэнерго. С.11-12.

*Дата поступления
в редакцию: 18.09.2023*

*Дата принятия
к публикации: 25.10.2023*

УДК 621.0+532.5

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_62

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОВОГО МАССООБМЕННОГО АППАРАТА ДЛЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК БРС-ГПГ НА ВОДЯНОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

Т.А. БоковаORCID: 0000-0002-7666-2866 e-mail: tatabo@bk.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Н.С. Волков**ORCID: 0000-0003-2256-0984 e-mail: Hortmetall@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Р. Маров**ORCID: 0000-0003-4398-5631 e-mail: marov_2011@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Г. Мелузов**ORCID: 0000-0002-3870-0905 e-mail: meluzov@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Т.К. Зырянова**ORCID: 0000-0002-5336-3556 e-mail: tanusha3111@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований работоспособности устройства ввода газообразных сред для задач технологии тяжелого жидкометаллического теплоносителя газового массообменного аппарата (ТЖМТ ГМА) применительно к инновационной реакторной установке средней и малой мощности БРС-ГПГ. Приведена схема новой экспериментальной установки на водяном теплоносителе, дано описание разработанных экспериментальных сменных участков, устанавливаемых для дробления водяного потока и введения воздушной составляющей. Представлена программа и методика выполнения экспериментальных исследований, включая фото- и видеofиксацию проведенных работ, а также их результаты. Разработаны научно-технические рекомендации, касающиеся особенностей конструкции и режимных параметров эксплуатации ГМА оригинальной конструкции, принципиально отличающегося от аналогов и предназначенного для регулировки окислительного потенциала ТЖМТ – Рb, Рb-Vi применительно к установке средней и малой мощности БРС-ГПГ. Результаты работы являются концептуально-методологической основой конструктивных решений газового массообменника в контурах со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями.

Ключевые слова: реакторные установки, реакторы на быстрых нейтронах, технология тяжелого жидкометаллического теплоносителя, горизонтальный парогенератор, газовый массообменный аппарат, очистка тяжёлого жидкометаллического теплоносителя.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бокова, Т.А. Экспериментальные исследования эффективности газового массообменного аппарата для реакторных установок БРС-ГПГ на водяном теплоносителе / Т.А. Бокова, Н.С. Волков, А.Р. Маров, А.Г. Мелузов, Т.К. Зырянова // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 62-71.
DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_62

EXPERIMENTAL STUDIES TO CONFIRM THE EFFECTIVENESS OF THE GAS MASS TRANSFER APPARATUS FOR THE BRS-GPG ON A WATER COOLANT

T.A. Bokova

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

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

N.S. Volkov

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

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

A.R. Marov

ORCID: 0000-0003-4398-5631 e-mail: marov_2011@mail.ru

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

A.G. Meluzov

ORCID: 0000-0002-3870-0905 e-mail: meluzov@mail.ru

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

T.K. Zyryanova

ORCID: 0000-0002-5336-3556 e-mail: tanusha3111@yandex.ru

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

Abstract. The results of experimental and theoretical studies of the performance of the gaseous media input devices for the tasks of heavy liquid metal coolant gas mass transfer apparatus (HLMC GMTA) technology in relation to the innovative small and medium-sized reactor plants with horizontal steam generators (BRS-GPG) are presented. A diagram of a new experimental setup with water coolant is presented, and a description of the developed experimental replacement sections installed to crush the water flow and introduce an air component is given. The program and methodology for performing experimental studies are presented, including photo and video recording of the performed work, as well as their results. Scientific and technical recommendations on the design features and operating parameters of a gas mass transfer apparatus of an original design, which is fundamentally different from its analogues and intended to regulate the oxidation potential of HLMC – Pb, Pb-Bi, in relation to the small and medium-sized reactor plants BRS-GPG have been developed. The results of the study are the conceptual and methodological basis for design solutions for a gas mass exchanger in circuits with lead and lead-bismuth coolants.

Key words: reactor plant, fast-neutron reactor, heavy liquid metal coolant technology, horizontal steam generator, gas mass transfer apparatus, heavy liquid metal coolant purification.

FOR CITATION: T.A. Bokova, N.S. Volkov, A.R. Marov, A.G. Meluzov, T.K. Zyryanova. Experimental studies to confirm effectiveness of gas mass transfer apparatus for water coolant BRS-GPG reactor plants. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 62-71. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_62

Введение

В настоящее время в российской атомной энергетике реализуется уникальный инновационный проект «Прорыв», в рамках которого уделяется особое внимание установкам средней и малой мощности, в том числе, работающим на тяжелых жидкометаллических теплоносителях (ТЖМТ). Это направление требует глубокой проработки с применением инновационных методов экспериментальных исследований. Они дают импульс для развертыва-

ния разноплановых работ по разработке, проектированию, созданию и научному исследованию конструктивных решений узлов и механизмов реакторных установок (РУ) малой и средней мощности. Такие решения могут быть приняты с учетом многообразного опыта создания и эксплуатации как стендов-прототипов, так и уникальных транспортных установок проектов атомных подводных лодок 645 и 705К проектов, создаваемых и эксплуатирующихся в конце прошлого века. Сейчас разворачиваются работы по созданию РУ БРЕСТ, требующие, в свою очередь, решения проблемы очистки ТЖМТ газосодержащими смесями. Эксплуатация РУ с ТЖМТ, благодаря особым свойствам и характеру течения такого теплоносителя, требует особого подхода к технологии. Поддержание требуемого окислительного потенциала ТЖМТ с применением газового массообменного аппарата (ГМА), работа которого основана на принципе «падающих струй», выступает одной из приоритетных задач. Один из вариантов ее решения – создание ГМА для формирования двухкомпонентных потоков *газовая смесь – ТЖМТ* за счет энергии «падающих струй». Российскими и зарубежными специалистами разработано несколько вариантов систем технологии ТЖМТ (т.е. введения газовых смесей для очисток контуров с ТЖМТ). Среди них – твердотельный массообменный аппарат, массообменный аппарат пневмодозаторного типа, массообменный аппарат с газлифтным насосом и ряд других. Также для этой же цели нашли применение различные способы ввода газовых смесей H_2 и O_2 в теплоноситель: эжекция, обработка свободной поверхности теплоносителя, а также диспергация газа различными вариантами, в том числе, с помощью метода захвата газа с помощью «падающих струй», который реализуется ГМА.

В соответствии с общепринятой методологией проведения экспериментальных исследований на ТЖМТ, было решено провести испытания на водяном теплоносителе на модели части реакторного контура БРС-ГПГ для определения степени применимости данного ГМА к этой установке. Данный этап позволяет сделать начальные конструктивные решения аппарата более соответствующими дальнейшему ходу исследований на натуральных средах и параметрах. Предлагалось выполнение прозрачной макетной модели массообменника из органического стекла и на водяном теплоносителе для лучшего понимания происходящих процессов, а также для снижения финансовых затрат по сравнению с натурными экспериментами.

Требуют решения следующие основные задачи:

- определения местоположения массообменника в РУ с горизонтальными парогенераторами, исходя из создания пузырей наименьшего размера;
- разработки экспериментальной установки из органического стекла с водой в качестве теплоносителя, учитывая конструктивные особенности РУ БРС-ГПГ;
- подготовки ЧТД для создания узлов и механизмов экспериментальной установки;
- монтажа экспериментальной установки;
- написания программы и методики эксперимента;
- определения влияния ГМА на степень газонасыщения контура экспериментальной установки;
- анализа экспериментальных данных.

Планировалось получение массива качественных данных работоспособности массообменника при разных компоновках и режимах работы экспериментального стенда с применением фото- и видеокадров градиента концентраций «легкой» фракции в водяном теплоносителе.

1. Ввод окислительно-восстановительных газов в поток теплоносителя с помощью «падающих струй» применительно к реакторной установке БРС-ГПГ

Предлагаемая инновационная реакторная установка с горизонтальными парогенераторами имеет компоновку и циркуляцию ТЖМТ, позволяющую снизить его длину, а также исключить подъемно-спускные участки [2]. Минуя активную зону, теплоноситель направляется в горизонтальный парогенератор (пароперегревательную секцию), который имеет сво-

бодный уровень, далее в секцию испарителя, а потом, за счет напора главного циркуляционного насоса, опускается на вход активной зоны. Такая компоновка позволяет создать естественную циркуляцию теплоносителя, повышая тем самым безопасность РУ. При максимальной удельной мощности и небольших массогабаритных характеристиках возможно повышение безопасности реакторной установки.

2. Экспериментальные исследования по определению применимости газового массообменного аппарата

2.1. Конструктивная схема ГМА

Одной из задач, стоящих перед разработчиками РУ БРС-ГПП, является создание аппарата для очищения контура ТЖМТ путем ввода восстановительно-окислительной газообразной фазы для поддержания качества теплоносителя и контура в заданных пределах [3]. Научным коллективом кафедры «Атомные и тепловые станции» НГТУ им. Р.Е. Алексева был представлен вариант ГМА, работа которого основывается на принципе «падающих струй». При этом в теплоноситель планируется вводить любую газовую фазу и их комбинацию, в зависимости от состояния контура и стоящих задач перед эксплуатационным персоналом (рис. 1).

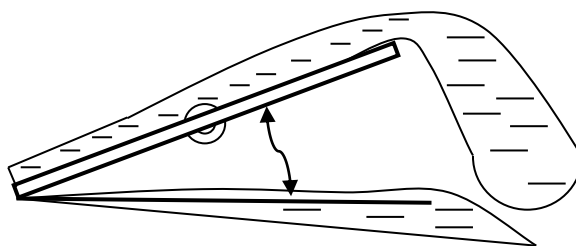


Рис. 1. Схематичное изображение массообменного аппарата для БРС-ГПП

Fig. 1. Schematic representation of a mass transfer apparatus for a BRS-GPG

Предлагаемое техническое решение включает в себя пластину, помещенную под уровень ТЖМТ, расположенную под углом навстречу направлению его течения.

2.2. Определение местоположения газового массообменного аппарата в реакторной установке с горизонтальными парогенераторами

Исходя из особенностей конструкции БРС-ГПП, а также на основе имеющегося опыта эксплуатации экспериментальных высокотемпературных стендов и установок, было определено место установки предлагаемого массообменного аппарата применительно к РУ БРС-ГПП [4]. Благодаря возможности подхвата пузырьков аргона или водорода, а также попадания и дробления их в циркуляторе установки, было выбрано место на входе в главный циркуляционный насос на линии выхода теплоносителя из ПГ и входа в ГЦН.

2.3. Экспериментальный стенд

Движение теплоносителя на вновь созданном и изготовленном стенде ФТ-17 (рис. 2) осуществляется следующим образом: посредством напора циркулятора, водяной теплоноситель направляется вниз по каналу (4), далее он идет по нижнему (5) участку, поднимаясь в подъемный канал (6), в котором размещен экспериментальный участок (2). Циркуляция замыкается на верхнем горизонтальном канале, падая в опускную часть (4) [5]. Экспериментальная установка создана с учетом масштабирования БРС-ГПП 1:1.

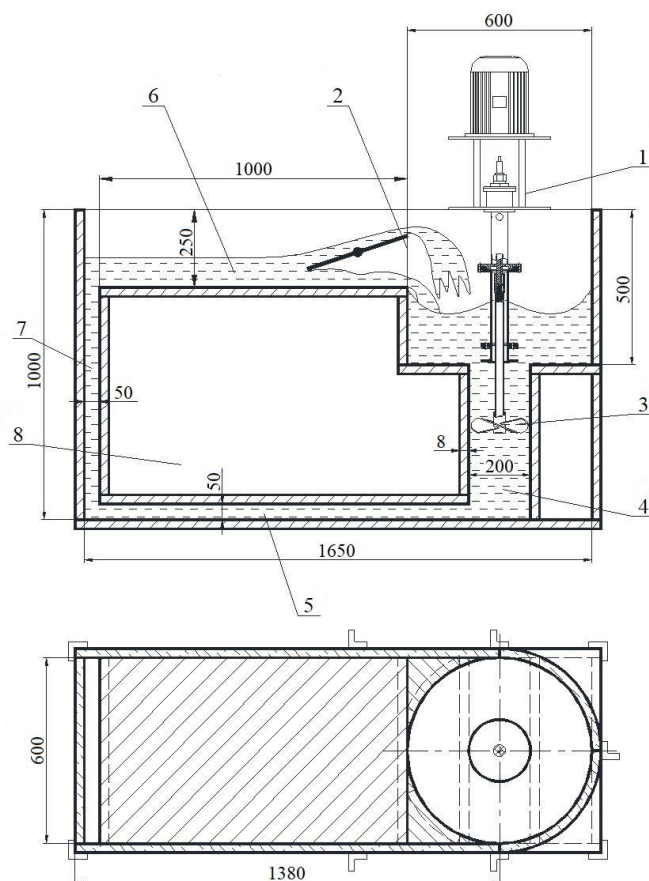


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки ФТ-17 НГТУ:
 1 – циркулятор, 2 – экспериментальный участок, 3 – рабочее колесо, 4 – опускающий канал,
 5 – нижний канал, 6 – верхний канал, 7 – подъемный канал, 8 – вытеснитель

Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup FT-17 NNSTU:
 1 – circulator, 2 – experimental section, 3 – impeller, 4 – lowering channel,
 5 – lower channel, 6 – upper channel, 7 – lifting channel, 8 – displace

2.4. Методика проведения экспериментальных исследований

Исследовательские испытания проводились на стенде с моделированной входной частью ГЦН РУ БРС-ГПГ на водяном теплоносителе при температуре 25 °С. Экспериментальный участок представлял собой пластины разного размера и формы, которые устанавливались под различными углами в верхнюю горизонтальную часть установки (рис. 3, 4). Использовались пластины двух видов: первый тип крепления – с помощью петель, второй – с помощью реек. Движение водяного теплоносителя достигалось с помощью циркулятора, который был подключен к преобразователю частоты (ПЧ) для регулировки частоты вращения колеса. С помощью ПЧ выставлялась требуемая скорость теплоносителя в контуре [6, 7].

Программа-методика испытаний включала:

- обоснование эффективной работы пластин предложенной конфигурации ГМА на экспериментальном стенде;
- проектирование экспериментальной высокотемпературной установки для проведения работ со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями применительно к реакторной установке БРС-ГПГ с подобранными геометрией и местом установки пластинами, показавшими наилучший результат в дроблении пузырей;
- сравнение и анализ полученных результатов и формулировка обоснованных рекомендаций по конструкции и месте установки массообменного аппарата для контуров с ТЖМТ.

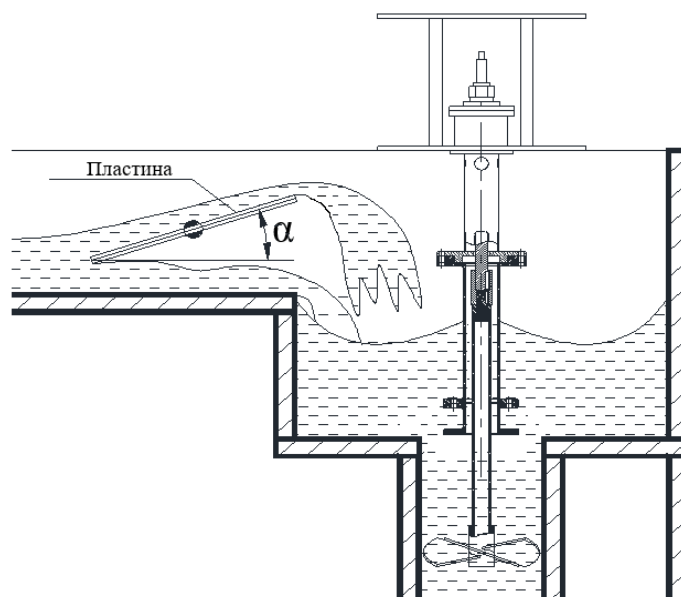


Рис. 3. Место установки массообменного аппарата в экспериментальном стенде ФТ-17 НГТУ

Fig. 3. Place of installation of the mass transfer apparatus in the experimental setup FT-17 NNSTU

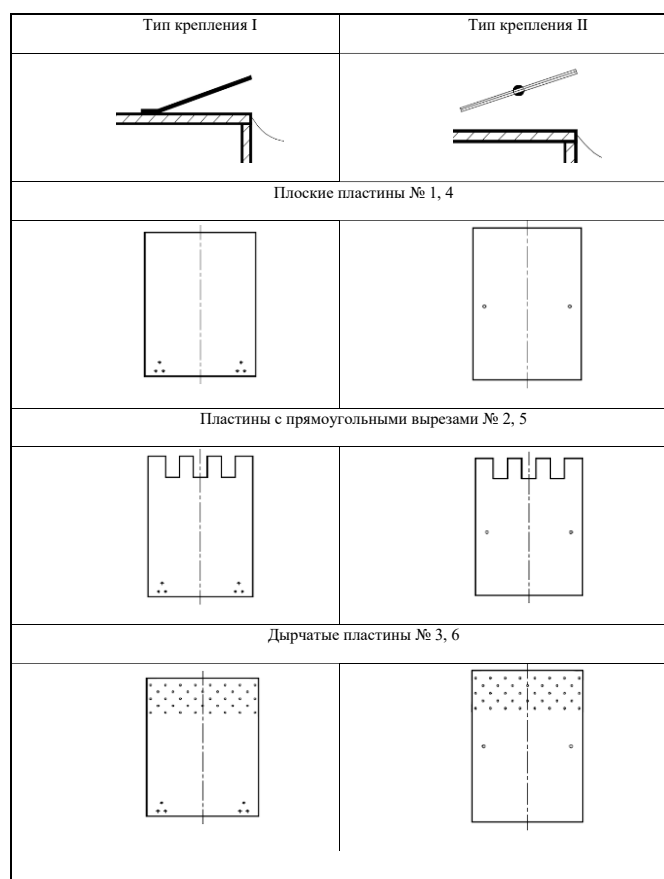


Рис. 4. Схема геометрии пластин газового массообменного аппарата для стенда ФТ-17НГТУ на водяном теплоносителе

Fig. 4. Scheme of the plate's geometry of a gas mass transfer apparatus for the setup FT-17 NNSTU with water coolant

Для определения скорости течения водяного теплоносителя использовался метод поверхностных поплавков: до момента начала испытаний производилась разметка верхнего лотка экспериментального стенда, отмечались начальная и конечная точки, определялся путь между ними. В первый момент производился сброс поплавка на поверхность воды до начальной точки с одновременной фиксацией секундомером, измерялось время прохождения всего участка до точки окончания. Этапы повторялись десять раз, определялось среднее арифметическое показание скорости потока воды.

2.6. Программа проведения испытаний

Испытания проводились в три основных этапа. На первом из них проводился пуск без массообменного аппарата, при этом велась видеофиксация, на втором этапе устанавливались поочередно пластины с петлевым креплением, и также проводилась видеофиксация, на третьем этапе исследовались пластины с реечным креплением. На втором и третьем этапах пластины устанавливались под углом α (рис. 3, 4), равным 10, 20 и 30° [8].

Фиксировалось состояние водо-воздушного потока непосредственно за установленными пластинами, определялась их эффективность. В качестве критериев эффективности выбраны размеры пузырей и скорость потока, что является наиболее важными факторами для работы массообменника в среде ТЖМТ. На рис. 5-7 показаны фото работы массообменного аппарата с пластиной с отверстиями петлевого типа крепления, расположенной под углом $\alpha=20^\circ$.



Рис. 5. Работа экспериментального стенда с водо-воздушным потоком

Fig. 5. Photo of the experimental setup with water-air flow in operation

Эффективность работы различных пластин при проведении испытаний было необходимо подтвердить независимым экспериментальным параметром, определяемым на представленном экспериментальном стенде, для чего был выбран параметр $S_{отн}$ – относительная площадь воздушной (газовой) фазы (%). Он показывает отношение площади воздушных пузырьков к площади водяного теплоносителя. Эта площадь может быть определена по фотографиям из видеосъемки, проводимой во время экспериментальных исследований.

Способ обработки фотографий на подъемном участке стенда показан на рис. 7. С помощью программного редактора фото он конвертируется в черно-белое изображение, на котором отчетливо видны пузыри воздуха в потоке воды (рис. 8).



Рис. 6. Фотография рабочего колеса циркулятора экспериментального стенда в действии
Fig. 6. Photo of the circulator impeller of the experimental setup in action



Рис. 7. Фотография подъемного участка стенда в момент снятия данных
Fig. 7. Photo of the lifting section of the setup at the time of data collection



Рис. 8. Фотография подъемного участка стенда после программной обработки

Fig. 8. Photo of the lifting section of the setup after software processing

Фотография и изображение обрезается в масштабном соотношении (исходя из габаритов экспериментальной установки) в том месте, где пузыри воздуха отчетливо различимы (рис. 9).

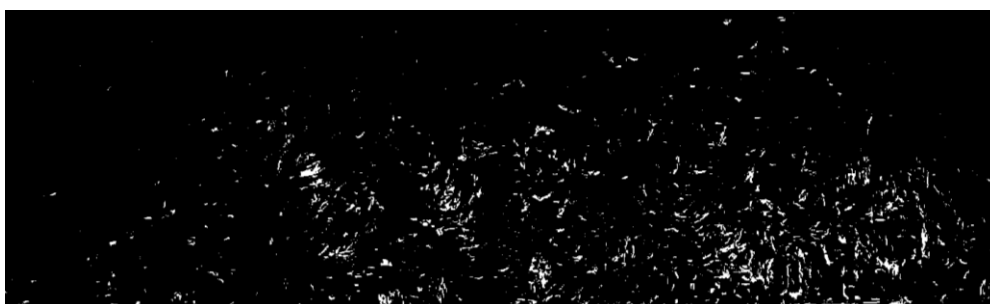


Рис. 9. Преобразованное изображение воздушных пузырей, подготовленное для обработки

Fig. 9. Converted image of air bubbles prepared for processing

Далее проводилась обработка фотографии с помощью графической программы, которая служит для анализа различных изображений, в том числе, для определения количественного определения габаритов объекта. Для получения наиболее исчерпывающей информации, было принято решение сделать выборку из пяти кадров. После обработки выборки, результаты предложены в табличном виде (рисунки 10).

Процентное соотношение площади пузырей к площади теплоносителя в контуре - Сотн, %							
Тип Геометрия	Петлевое			Шпилька			БЕЗ пластин, контроль
	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=10^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=30^\circ$	
Плоская	0,494	2,238	2,452	0,288	1,324	2,374	0,1
Отверстия	0,352	2,196	2,346	0,246	1,634	2,358	
Вырезы	0,364	1,956	2,454	0,296	1,31	2,384	
		Сред= 2,417			Сред= 2,372		

Рис. 10. Сводная таблица результатов обработки видеоматериалов

Fig. 10. Summary table of video processing results

Заключение

Выбор места установки массообменного аппарата применительно к РУ БРС-ГПП должен определяться особенностями компоновки реакторной установки БРС-ГПП, исходя из максимального эффекта разбиения «легкой фракции», вводимой в ТЖМТ. Выбранный участок (смоделированный в процессе выполнения работы) наиболее эффективен для расположения аппарата для очистки теплоносителя в рамках работ технологии ТЖМТ. По итогам работы можно сделать вывод об эффективной работе плоских пластин петлевого типа крепления с углом наклона $\alpha=20^\circ$ и $\alpha=30^\circ$.

Разработаны научно-технические рекомендации для конструктивных решений газового массообменника в контурах со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. Для качественного определения эффективности работы пластин различных конфигураций предложен параметр отношения площади газовой фазы к площади теплоносителя, определяемого по кадрам видеоряда: относительная площадь газовой фазы – $S_{отн}$ (%). Результаты работ будут использованы для обоснованного выбора методики проведения экспериментальных исследований газового массообменного аппарата на свинцовом и свинец-висмутовом теплоносителях.

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023-0005 «Особенности и специфика применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей в реакторных установках на быстрых нейтронах»).

Библиографический список

1. **Громов, Б.Ф.** Применение расплавов эвтектики свинец-висмут и свинца в качестве теплоносителя ЯЭУ / Б.Ф. Громов, В.И. Субботин, Г.И. Гошинский // Атомная энергия. 1992. Т. 73. Вып. 1. С. 19.
2. **Сорокин, А.П.** Экспериментальное моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в реакторах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями / А.П. Сорокин, Ю.А. Кузина, А.И. Орлов // Вопросы атомной науки и техники. 2019. Вып. 1.
3. **Askhadullin, R.** Estimating the change of a mass exchanger productivity on account of oxygen resource decreasing / R. Askhadullin, A. Legkikh. // V international conference Heavy liquid metal coolant in nuclear technologies (HLMC-2018) 8-10 October 2018 Obninsk, Russia.
4. **Боков, П.А.** Исследование условий возникновения и характеристик кавитации в главный циркуляционных насосах реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых ТЖМТ: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.11 / П.А. Боков. – Нижний Новгород, 2015. – 177 с.
5. **Лаврова, О.В.,** Влияние термодинамической активности кислорода на границе раздела «сталь - теплоноситель» на массоперенос железа и хрома / О.В. Лаврова, А.Ю. Легких. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2023. № 3. С. 221-232.
6. **Иванов, К.Д.** Особенности окисления сталей в тяжелых жидкометаллических теплоносителях / К.Д. Иванов, С.А. Ниязов, А.А. Осипов. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2022. № 2. С. 76-88.
7. **Махов, К.А.** Исследование структуры и триботехнических характеристик пристенного слоя в потоке ТЖМТ применительно к элементам контуров с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых ТЖМТ: дис. ... канд. техн. наук / К.А. Махов. – Нижний Новгород, 2015. – 164 с.
8. **Безносков, А.В.** Обоснованные технические решения реактора установок БРС-ГПП малой и средней мощности со свинцовыми свинец-висмутовым теплоносителями / А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, П.А. Боков, Н.С. Волков, А.А. Карбышев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 2. С. 42-48.

*Дата поступления
в редакцию: 10.06.2023*

*Дата принятия
к публикации: 11.11.2023*

УДК 621.039.586

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_72

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ СВИНЦОВО-ВИСМУТОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Н.А. ПрибатуринORCID: 0009-0005-3861-6630 e-mail: nialp@ibrae.ac.ruИнститут проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
*Москва, Россия***П.Д. Лобанов**ORCID: 0000-0002-3020-6021 e-mail: lobanov@itp.nsc.ruИнститут теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
*Новосибирск, Россия***А.С. Курдюмов**ORCID: 0000-0002-1833-0484 e-mail: kurdumov@itp.nsc.ruИнститут теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
*Новосибирск, Россия***А.И. Светоносков**ORCID: 0009-0000-3540-4070 e-mail: svetonosov.a.i@gmail.comИнститут теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
*Новосибирск, Россия***А.В. Чинак**ORCID: 0000-0003-3011-7464 e-mail: chinak@mail.ruИнститут теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
*Новосибирск, Россия***В.В. Чуданов**ORCID: 0000-0002-6227-6083 e-mail: chud@ibrae.ac.ruИнститут проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
*Москва, Россия***А.Е. Аксенова**ORCID: 0000-0003-4649-6788 e-mail: aks@ibrae.ac.ruИнститут проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
*Москва, Россия***В.А. Первичко**ORCID: 0000-0002-0466-6358 e-mail: valper@ibrae.ac.ruИнститут проблем безопасного развития атомной энергетики РАН
Москва, Россия

Выполнено экспериментально-расчетное исследование развития естественной циркуляции свинцово-висмутового теплоносителя в замкнутом циркуляционном контуре. Показано формирование устойчивого течения жидкометаллического теплоносителя из состояния покоя за счет подвода избыточного тепла к имитатору

тепловыделяющей сборки. С помощью CFD модуля CONV-3D на базе DNS выполнено моделирование происходящих процессов. Показано хорошее совпадение между результатами эксперимента и расчета по достигаемому температурному напору и расходу теплоносителя при различной мощности энерговыделения в имитаторе тепловыделяющей сборки.

Ключевые слова: тяжелый жидкометаллический теплоноситель, естественная циркуляция, эксперимент, DNS.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Прибатурин, Н.А. Экспериментально-расчетное исследование естественной циркуляции свинцово-висмутового теплоносителя / Н.А. Прибатурин, П.Д. Лобанов, А.С. Курдюмов, А.И. Светоносков, А.В. Чинак, В.В. Чуданов, А.Е. Аксенова, В.А. Первичко // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 72-81. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_72

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF NATURAL CIRCULATION OF LEAD-BISMUTH COOLANT

N.A. Pribaturin

ORCID: 0009-0005-3861-6630 e-mail: nialp@ibrae.ac.ru
Nuclear Safety Institute RAS
Moscow, Russia

P.D. Lobanov

ORCID: 0000-0002-3020-6021 e-mail: lobanov@itp.nsc.ru
Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS
Novosibirsk, Russia

A.S. Kurdyumov

ORCID: 0000-0002-1833-0484 e-mail: kurdumov@itp.nsc.ru
Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS
Novosibirsk, Russia

A.I. Svetonosov

ORCID: 0009-0000-3540-4070 e-mail: svetonosov.a.i@gmail.com
Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS
Novosibirsk, Russia

A.V. Chinak

ORCID: 0000-0003-3011-7464 e-mail: chinak@mail.ru
Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS
Novosibirsk, Russia

V.V. Chudanov

ORCID: 0000-0002-6227-6083 e-mail: chud@ibrae.ac.ru
Nuclear Safety Institute RAS
Moscow, Russia

A.E. Aksenova

ORCID: 0000-0003-4649-6788 e-mail: aks@ibrae.ac.ru
Nuclear Safety Institute RAS
Moscow, Russia

V.A. Pervichko

ORCID: **0000-0002-0466-6358** e-mail: **valper@ibrae.ac.ru**

Nuclear Safety Institute RAS

Moscow, Russia

Abstract. An experimental and numerical study of the development of natural circulation of lead-bismuth coolant in a closed circulation loop was carried out. The formation of a stable flow of liquid metal coolant from a state of rest due to the supply of excess heat to the fuel assembly simulator is shown. Simulation of the ongoing processes was performed using the CFD module CONV-3D based on DNS. A good agreement between the results of experiment and calculation is shown in terms of the achieved temperature difference and coolant flow rate at different power output in the fuel assembly simulator.

Key words: heavy liquid metal coolant, natural circulation, experiment, DNS.

FOR CITATION: N.A. Pribaturin, P.D. Lobanov, A.S. Kurdyumov, A.I. Svetonosov, A.V. Chinak, V.V. Chudanov, A.E. Aksenova, V.A. Pervichko. Experimental and numerical study of natural circulation of lead-bismuth coolant. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 72-81. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_72

Для безопасности реакторных установок большое значение имеют исследования течения с естественной циркуляцией теплоносителя. Присутствие остаточного тепловыделения при расхолаживании реактора в силу высокой температуры теплоносителя требует сложных решений. Реальные размеры контура реакторной установки также усложняют проведение экспериментов и использование методик измерения скоростей течения, полей температуры и касательных напряжений на стенках каналов. Подобные исследования развития естественной конвекции в жидкостях с малым числом Прандтля при разных числах Рэлея требуют как проведения экспериментов на лабораторных стендах, так и пре- и пост-тестовых расчетов при помощи CFD-кодов, которые позволят дополнить матрицу верификации, выработать рекомендации экспериментаторам, повысив таким образом качество расчетных обоснований для промышленно-энергетического комплекса.

Работы по исследованию режима естественной циркуляции применительно к охлаждению реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем активно ведутся в Италии, Швеции, Германии, Индии и Китае, а также в Европейском атомном агентстве [1-4]. Эти экспериментальные данные и результаты численного моделирования актуальны для анализа конструкции разрабатываемых быстрых ядерных реакторов бассейнового типа с жидкометаллическим теплоносителем с точки зрения их безопасности и понимания процессов тепло и гидродинамики, а также оценки работоспособности и надежности систем пассивной безопасности. В процессе проверки вычислительных кодов проводятся открытые и слепые расчеты с использованием результатов интегральных экспериментов, позволяющие оценить уровень достоверности инструментов, используемых для анализа. Например, в [5] приведены экспериментальные данные для установки TALL-3D, касающиеся изучения условий развития неустойчивости циркуляции. Установка используется для получения данных для связанных систем кодов: автономных, теплогидравлических (STH) и вычислительной гидродинамики (CFD). В работе дан обзор открытого и слепого бенчмарка для контура со свинцово-висмутовой эвтектикой. Для обоснования тепло- и гидродинамических характеристик ядерных энергетических установок и анализа их изменения в переходных процессах и аварийных ситуациях используются как системные, так и универсальные термогидродинамические CFD-коды [6]. Полученные с их помощью данные позволяют указать направления оптимизации параметров реакторных установок промышленно-энергетического комплекса и дополнить матрицу верификации разрабатываемых CFD-кодов.

Целью данной работы является экспериментальное и расчетное исследование формирования естественной циркуляции в контуре с предварительно заполненным неподвижным свинцово-висмутовым теплоносителем, определение зависимостей изменения расхода теплоносителя и температурного напора от выделяемой в имитаторе ТВС мощности для устано-

вившегося режима естественной циркуляции. Для вычислений использовался вихререзающий CFD-модуль на базе DNS-приближения (CONV-3D).

Экспериментальное исследование развития естественной циркуляции при течении свинцово-висмутового теплоносителя было выполнено на стенде, имеющем четыре циркуляционных контура, соединяющихся в верхней камере, семистержневой имитатор ТВС и четыре теплообменника. Стенд был собран по модульной схеме, что позволило в дальнейших исследованиях включать в работу от одного до четырех замкнутых гидродинамических контуров. В данной работе была использована одна циркуляционная петля. Схема стенда с местами установки термопар и основными размерами приведена на рис. 1а.

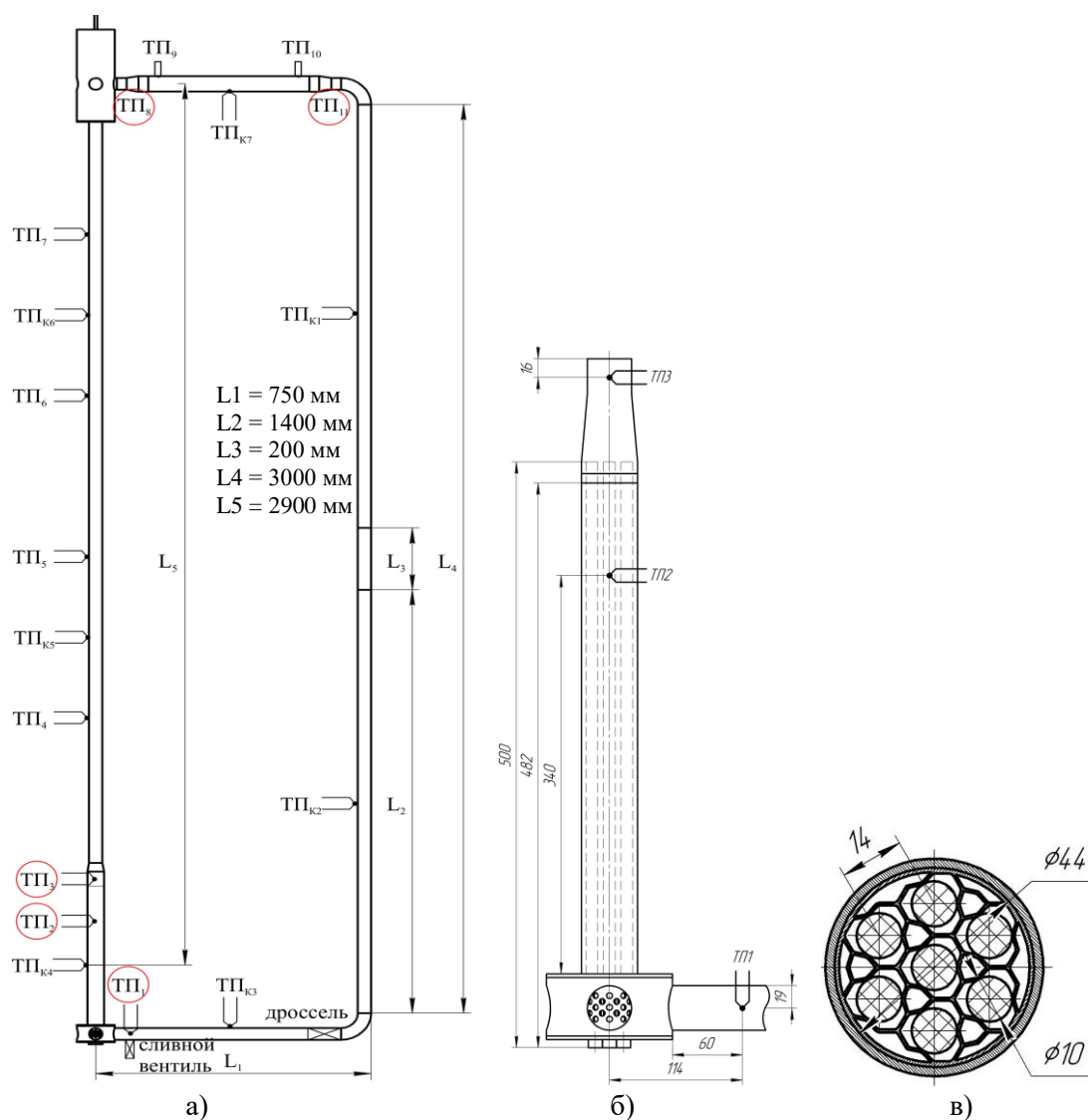


Рис. 1. Схемы циркуляционного стенда:

а) места установки термопар, б) имитатор ТВС, в) дистанционирующая решетка

Fig. 1. Schemes of the circulation test bench:

a) thermocouple installation places, б) fuel assembly simulator, в) spacer grid

Цилиндрические каналы стенда имеют один восходящий и нисходящий участки, изготовленные из нержавеющей стали. Внутренний диаметр каналов 35 мм с толщиной стенки 1,5 мм. Высота нисходящего участка $L_4=3000$ мм, расстояние между центрами областей нагрева теплоносителя и стока тепла составляет $L_5=2900$ мм. Значения смоченного периметра P каналов стенда, площади поперечного сечения S и гидравлического диаметра D_g приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Геометрические параметры элементов стенда

Table 1.
Geometric parameters of test bench elements

	P, мм	S, мм²	Dг, мм
трубопровод	109,96	962,1	35
теплообменник	414,7	1017,9	9,81
ТВС	358,1	970,8	10,84

Модель-имитатор ТВС состоит из семи вертикальных стержней – имитаторов твэла внешним диаметром 0,01 м и длиной 0,5 м, установленных в гексагональной компоновке с относительным шагом 1,4 между центрами стержней. Сборка стержней помещена в цилиндрический корпус из нержавеющей стали внутренним диаметром 0,044 м. Схемы имитатора ТВС и положения тепловыделяющих стержней приведены на рис. 1 б,в. В качестве имитаторов твэлов были использованы «пальчиковые» электрообогреваемые устройства с номинальной мощностью каждого имитатора 2000 Вт. Для отвода тепла от циркуляционного контура использовался горизонтально установленный в верхней части контура проточный теплообменник. Было использовано масло для отвода тепла от свинцово-висмутowego теплоносителя. Масло прокачивалось через термостатирующее устройство, поддерживающее температуру масла на постоянном уровне. Вверху стенда был установлен расширительный бак цилиндрической формы с внутренним диаметром 100 мм и высотой 300 мм. Расстояние от дна бака до оси симметрии патрубка ввода теплоносителя равно 120 мм.

Система термостатирования стенда позволяла контролировать и поддерживать на постоянном уровне температуру и подводимую ко всем элементам стенда мощность. Было выделено 7 участков, на стенке каждого из которых были установлены контрольные термомпары (ТП_{к1} – ТП_{к7}). Для нагрева участков на них были намотаны индивидуально нагревательные элементы, подводимая мощность нагрева к которым контролировалась программным образом с использованием обратной связи от термомпар. Сигналы термомпар подавались на электронную плату, которая управлялась микроконтроллером *ATmega2560*. Микроконтроллер был подключен к компьютеру, что позволяло не только контролировать параметры эксперимента, но и осуществлять запись хода эксперимента в файл для последующей обработки и анализа. Во время проведения измерений каждую секунду производилась запись в файл значений температур на всех датчиках и подводимой мощности. Изменение подводимой с имитатору ТВС электрической мощности проводилось путем модуляции управляющих импульсов, подаваемых от электронной платы на твердотельные реле. Расположение термомпар на каналах стенда показано на рис. 1 а. Термомпары с обозначением ТП_{кх} использовались для контроля и поддержания внешней температуры стенок элементов стенда. Обогрев элементов стенда осуществлялся с помощью навивки нагревательного провода ВТН 1х1,0 с номинальной мощностью 140 Вт/м и максимальной температурой использования 400 °С.

Температура верхней части нисходящей секции контролировалась с помощью термомпары ТП_{к1}, нижней – термомпары ТП_{к2}. Для контроля температуры нижнего горизонтального участка использовалась ТП_{к3}, для контроля температуры внешней стенки имитатора ТВС – ТП_{к4}. Восходящий участок был разделен на нижний, температура которого измерялась термомпарой ТП_{к5}, и верхний с контролирующей термомпарой ТП_{к6}. Температура стенки теплообменника измерялась при помощи термомпары ТП_{к7}. Измерение температуры теплоносителя на выходе из имитатора ТВС осуществлялось с помощью ТП₃, место установки которой показано на рис. 1б, где приведены основные размеры имитатора ТВС. Теплоноситель, попадая в имитатор, перемешивался с помощью установленных внизу перфорированных элементов и дистанционирующей решетки, используемой для позиционирования имитаторов твэла (рис. 1в). Использовались две дистанционирующие решетки, установленных на расстоянии 10 мм

от торцов имитаторов твэла. Термопары, обозначенные как ТП₄-ТП₇, предназначены для контроля температуры стенки восходящего участка при течении перегретого за счет активации имитаторов твэлов тяжелого жидкометаллического теплоносителя. Они установлены на расстоянии от 500 мм от края имитатора ТВС и через 500 мм друг от друга. Температура свинцово-висмутового теплоносителя измерялась, помимо термопар ТП₁-ТП₃, в канале на входе и выходе из теплообменного устройства в позициях, обозначенных ТП₈ и ТП₁₁. Помимо этого, измерялась температура масла термопарами ТП₉ и ТП₁₀. Они были плотно прижаты к стенке трубы маслопровода (толщина стенки – 0,2 мм) и сверху покрыты теплоизоляцией. Для измерений температуры теплоносителя в области энерговыделения внутри модели ТВС были использованы термопары с электроизолированным спаем. Перед выполнением экспериментов была проведена предварительная градуировка всех термопар совместно с электронными усилителями. Скорость теплоносителя измерялась двухсенсорным датчиком, отслеживающим распространение «тепловой метки» в потоке теплоносителя.

Экспериментальные исследования были проведены при энерговыделении в имитаторе ТВС, величина которого изменялась в диапазоне от 1000 до 4000 Вт. В данном экспериментальном исследовании при старте эксперимента отсутствовала вынужденная циркуляция жидкометаллического теплоносителя и его движение осуществлялась только за счет развития естественной конвекции. Для этого контур предварительно из бака-хранилища полностью заполнялся жидким свинцово-висмутовым теплоносителем, затем проводился нагрев его температуры до 140 °С и последующее ее поддержание с помощью автоматической системы термостабилизации. После установления постоянной температуры во всех элементах стенда производился наброс энерговыделения на имитаторе ТВС. При выделении тепла в имитаторе ТВС происходил рост температуры теплоносителя в каналах стенда. При этом можно было отслеживать движение образованной в результате наброса мощности «тепловой метки» с помощью термопарных преобразователей ТП₄ – ТП₈ и ТП₁₁, а также контрольных термопар. После фиксации изменения температуры перед теплообменным устройством включалась принудительная циркуляция масляного теплоносителя для съема избыточной мощности. Дальнейшее движение фронта тепла отслеживалось с помощью контрольных термопар ТП_{кк}. Установление естественной циркуляции занимало достаточно продолжительное время, порядка нескольких десятков секунд, после чего стабилизировалось как энерговыделение на элементах стенда, так и контролируемые температуры.

На рис. 2 приведены примеры изменения температур перед входом в имитатор ТВС (ТП₁) и после него (ТП₂), температурный напор при нагреве теплоносителя в имитаторе ТВС; также показаны временные профили температур теплоносителя перед входом в теплообменник (ТП₈) и после выхода из теплообменника (ТП₁₁). Данные приведены для минимальной (рис. 2а) и максимальной (рис. 2б) мощности энерговыделения в имитаторе ТВС. Как видно из графиков, нагрев свинцово-висмутового теплоносителя в имитаторе ТВС составлял 13,1 °С при мощности энерговыделения в имитаторе ТВС, равной 1 кВт. Расход теплоносителя по контуру стенда для этого режима равен 0,054 л/с. Для этого и всех последующих режимов были рассчитаны значения чисел Рейнольдса и Ричардсона:

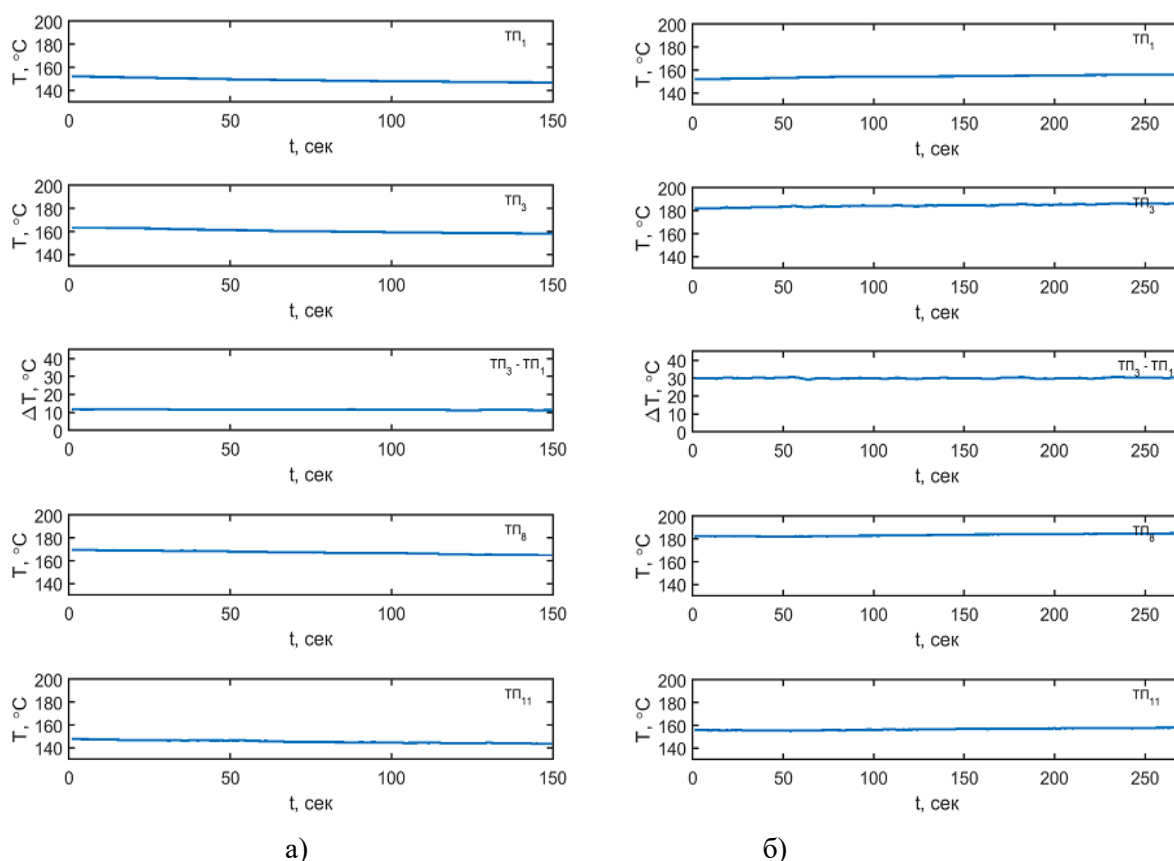
$$Re = \frac{uD_r}{\nu},$$

где u – средняя скорость течения, ν – кинематическая вязкость жидкости;

$$Ri = \frac{\Delta\rho gL}{\rho u^2},$$

где ρ – плотность жидкости, L – высота температурного столба.

Теплофизические свойства свинцово-висмутового теплоносителя определялись по таблицам [7], величина температурного перепада определялась по показаниям термопар. Для эксперимента, результаты которого приведены на рис. 2, значения чисел Рейнольдса и Ричардсона равны 2180 и 15,95 соответственно.



**Рис. 2. Распределение температуры теплоносителя в элементах стенда:
при мощности энерговыделения:
а) 1 кВт, б) 4 кВт**

**Fig. 2. Distribution of coolant temperature in the test bench elements at power output:
а) 1 kW, б) 4 kW**

Увеличение подводимой к имитатору ТВС электрической мощности до 1,5 кВт приводит к увеличению разницы температуры между входом и выходом в модель – имитатор ТВС на 3,6 °С по сравнению с предыдущим случаем. При более высоких подводимых мощностях равных 3 и 4 кВт разница температур на входе в имитатор ТВС и выходе из него достигает 25,6 и 28 °С. Расход теплоносителя по циркуляционному контуру возрастает до 0,072 и 0,079 л/с, соответственно. Значения числа Рейнольдса при уровне подводимой мощности 3 кВт равно 2627, при 4 кВт – 2946, число Ричардсона составляет величину около 17,3.

Данные измерений сведены в табл. 2, где для каждого проведенного эксперимента указаны подводимая к имитатору ТВС электрическая мощность, температуры на входе в ТВС и выходе из ТВС, температурный напор, расход теплоносителя, плотность и вязкость теплоносителя, числа Рейнольдса для течения в ТВС, трубопроводе и теплообменнике. На рис. 3 приведена зависимость нагрева теплоносителя при прохождении через модель-имитатор ТВС от уровня подводимой электрической мощности. Четырехкратное повышение подводимой мощности приводит к повышению температурного напора для режима естественной циркуляции ΔT примерно в 2 раза. На рис. 4 приведен график изменения расхода теплоносителя от уровня мощности энерговыделения.

Верификационные расчеты были проведены на основе программы «Прецизионный масштабируемый вихререзающий CFD-модуль на базе DNS-приближения, ориентированный на петафлопсные (10^{15}) вычислительные ЭВМ. Версия 3.0» (код CONV-3D) [8].

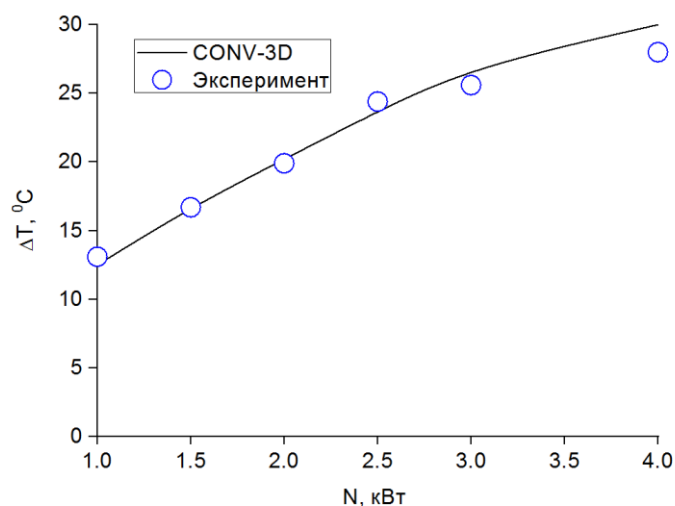


Рис. 3. Зависимость разницы температур на входе и выходе из имитатора ТВС от энерговыделения
Fig. 3. Dependence of the temperature difference at the inlet and outlet of the fuel assembly simulator on the power output

Таблица 2.
Результаты экспериментов при вариации энерговыделения

Table 2.
Results of experiments with varying power output

Тест №	1	2	3	4	5	6
Энерговыделение ТВС, кВт	1	1,5	2	2,7	3	4
Температура на входе в зону энерговыделения, °С	147,4	143,5	152,1	152,6	151	152,3
Температура на выходе из зоны энерговыделения, °С	160,5	160,2	172	177	176,6	183,4
Температурный напор, °С, эксперимент	13,1	16,7	19,9	24,4	25,6	28,0
Температурный напор, °С, расчет	12,5	16,7	20,2	23,7	26,9	30
Плотность ТЖМТ на холодной петле, кг/м ³	10521	10526	10515	10515	10517	10515
Плотность ТЖМТ на горячей петле, кг/м ³	10504	10505	10489	10483	10483	10475
Расход теплоносителя, л/с, эксперимент	0,054	0,058	0,063	0,070	0,072	0,079
Расход теплоносителя, л/с, расчет	0,055	0,063	0,070	0,075	0,080	0,084
Среднесмешанная температура, К	427,1	425,0	435,2	438,0	437,0	441,0
Плотность, кг/м ³	10513	10515	10502	10499	10500	10495
Вязкость, Па*с	0,0029	0,0029	0,0028	0,0028	0,0028	0,0027
Re ТВС	2180	2329	2638	2957	3041	3411
Re трубопровод	7101	7585	8592	9630	9906	11110

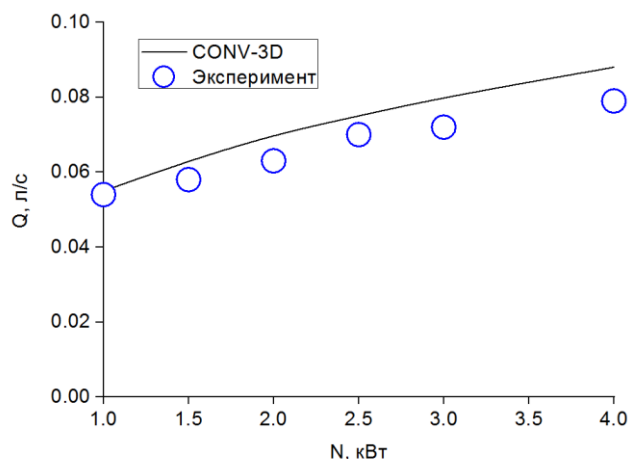


Рис. 4. Зависимость расхода ТЖМТ от энерговыделения

Fig. 4. Dependence of heavy liquid metal coolant consumption on power output

Расчеты были выполнены на сетке размера: 513x513x33 узлов; для расчетов был взят трехмерный гидравлический контур (рис. 1). Геометрия была построена с помощью программы *GeometryEditor*. Были проанализированы результаты измерений, выполненных с разными значениями мощности нагревателя в диапазоне от 1 до 3 кВт. В табл. 2 суммированы результаты расчетов в сравнении с экспериментом при разных значениях подводимой мощности. Результаты расчета были получены с точностью до достижения теплового баланса $\sim 1\%$. При сравнении данных эксперимента и расчета (рис. 3, 4 и табл. 2) наблюдается хорошее качественное и количественное их совпадение по температурному напору, измеренному ТП₁ и ТП₃. Отклонение расчетных данных от эксперимента не превышает 5 %.

Заключение

Установлено, что режим естественной циркуляции свинцово-висмутового теплоносителя формируется из состояния покоя теплоносителя, заполняющего циркуляционный контур без предварительной вынужденной циркуляции и только за счет подвода избыточного тепла к имитатору ТВС. Установление режима занимает время порядка 200 с, после чего параметры течения стабилизируются и не меняются в течение сколь угодно длительного времени. Показано хорошее совпадение между результатами эксперимента и расчета по достигаемому температурному напору и расходу теплоносителя при различной мощности энерговыделения в имитаторе ТВС.

CFD модуль CONV-3D на базе DNS приближения может быть использован для расчетов естественно-конвективного течения свинцово-висмутового теплоносителя в гидравлическом контуре при разных значениях вкладываемой мощности. Полученные с помощью CFD кода данные позволяют указать направления оптимизации параметров реакторных установок промышленно-энергетического комплекса и дополнить матрицу верификации разрабатываемых CFD-кодов.

Библиографический список

1. **Moscardini, M.** Numerical Analysis of the CIRCE-HERO PLOFA Scenarios / M. Moscardini, F. Galleni, A. Pucciarelli et al. // Applied Sciences. October, 2020.
2. **Tarantino, M.** et al. Natural and gas enhanced circulation tests in the NACIE heavy liquid metal loop // Proc. 18th Intern. Conf. on Nucl. Engine. ICONE18. May 17-21, 2010. Xi'an, China, p. ICONE18 – 29969.

3. **Grishchenko, D.** TALL-3D open and blind benchmark on natural circulation instability / D. Grishchenko, A. Papukchiev, C. Liud et al. // Nucl. Engin. Design. 358, 2020.
4. **Naphadea, P.** Experimental and CFD Study on Natural circulation Phenomenon in Lead Bismuth Eutectic Loop / P. Naphadea, A. Borgohainb, R. ThundilKaruppa Raja, N.K. Maheshwari // Procedia Engineering 64 (2013) 936-945.
5. **Grishchenko, D.** The TALL-3D facility design and commissioning tests for validation of coupled STH and CFD codes» / D. Grishchenko, M. Jeltsov, K. Kööp, A. Karbojian, W. Villanueva, P. Kudinov // Nuclear Engineering and Design. Vol. 290, 15 August, 2015. P. 144-153. 10.1016/j.nucengdes.2014.11.045
6. **Девкин, А.С.** Зарубежные теплогидравлические коды улучшенной оценки. Опыт разработки, создание и применение / А.С. Девкин, О.И. Мелихов, А.М. Москалев и др. – М.: ОЦПК при Минатоме РФ, 2000. – 176 с.
7. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т.3 Теплогидравлические процессы при переходных и нестандартных режимах. Тяжелые аварии. Защитная оболочка. Коды, их возможности, неопределенности / под общ. ред. П.Л. Кириллова. – М.: ИздАт, 2014. – 688 с.
8. **Чуданов, В.В.** Расчет параметров свободно-конвективного течения свинцово-висмутевого сплава в полости с поперечным градиентом температуры с помощью кода CONV-3D / В.В. Чуданов, А.Е. Аксенова, В.А. Первичко // Атомная энергия. 2022. Т. 132. № 4. С. 240-242.

*Дата поступления
в редакцию: 05.10.2023*

*Дата принятия
к публикации: 11.11.2023*

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 621.9

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_82

К ВОПРОСУ О НАХОЖДЕНИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ НАГРУЖЕНИЙ АМФИБИЙНЫХ МАШИН ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

И. Ван

ORCID: 0009-0006-6659-5993 e-mail: scott_bah@hotmail.com

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

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

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

Проведен поиск экстремальных режимов нагружения кузовов скоростных амфибийных машин из эксплуатационных условий при движении по воде с целью использования их в расчетах для достижения достоверных результатов при обеспечении необходимой точности и в конечном итоге – оптимизации кузова для снижения его массы. В программном комплексе *Star CCM+* разработана динамическая модель для расчета нагрузочных режимов по воде, включающих вход в воду, движение по спокойной воде на низкой и высокой скоростях, движение против волны на предельной скорости и движение поперек волны при качке. Критическое состояние в рабочем режиме определяется по соответствующим стандартам безопасности. Расчет НДС при выбранных внешних нагрузках осуществляется на базе метода конечных элементов (МКЭ). Для расчета напряженно-деформационного состояния (НДС) кузова амфибийной машины была разработана конечно-элементная модель (КЭМ) в программе *Ansys*. Выявлено, что передняя часть кузова подвержена экстремальным нагрузкам при нахождении во впадине волны при движении против волны на максимальной скорости (50 км/ч). Днище кузова испытывает экстремальные нагрузки, проявляющиеся при прямолинейном движении по спокойной воде на максимальной скорости (50 км/ч). Для боковой части кузова экстремальным режимом является движение поперек волн при качке (скорость, близкая к 0 км/ч).

Ключевые слова: зубчатый дифференциальный механизм, дифференциал, замыкающая часть, кинематические возможности механизма, метод обращенного движения, условие соосности, главное и дополнительные условия синтеза, передаточное отношение механизма.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ван И. К вопросу о нахождении экстремальных режимов нагружений амфибийных машин при эксплуатации в водной среде / И. Ван, В.Н. Зузов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 82-96. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_82

RESEARCH ON EXTREME LOAD MODE OF AMPHIBIOUS VEHICLE DURING OPERATION ON WATER

Y. Wang

ORCID: 0009-0006-6659-5993 e-mail: scott_bah@hotmail.com

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

V.N. Zuzov

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

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Abstract. An extensive research of extreme loading modes of the bodies of high-speed amphibious vehicles from operating conditions when moving on water has been conducted. The obtained results should be used in calculations to achieve reliable results while ensuring the necessary accuracy and, ultimately, optimizing the body to reduce its weight. The dynamic model was constructed using Star CCM+ software to simulate load conditions in water, including entry into the water, movement in calm water at low and high speeds, movement against the wave at maximum speed and movement across the wave during rolling. This research aimed to investigate the impact of extreme operational conditions on water, therefore the criticality of these conditions was evaluated in accordance with pertinent safety standards prior to calculating external loads. Finite element model (FEM) of amphibious vehicle body was created in *Ansys* software to further analyze the response of the body structure under selected external loads. It was revealed that the front part of the body is subject to extreme loads when located in the trough of a wave when moving against the wave at maximum speed (50 km/h). The underbody experiences extreme loads that occur when driving straight through calm water at maximum speed (50 km/h). An extreme mode for the side body is movement across the waves when rolling (speed close to 0 km/h).

Key words: gear differential mechanism, differential, closing part, kinematic capabilities of the mechanism, reverse motion method, coaxiality condition, main and additional synthesis conditions, gear ratio.

FOR CITATION: Wang Y. Research on extreme load mode of amphibious vehicle during operation on water. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 82-96. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_82

Введение

Одной из главных задач при проектировании амфибийных машин является снижение массы кузова при обеспечении требуемых прочности и жесткости. Эксплуатационные режимы могут быть разделены на два типа: движение на суше и движение по воде. Режимы движения на суше, за исключением опасных режимов (удар или опрокидывание) включают: вывешивание колеса, движение по дорогам с синусоидальным и другими заданными профилями, движение по дороге со случайным профилем и др. [1]. Режимы движения по воде (без учета опасных ситуаций – наезд на скалы или затопления) включают: вход в воду, прямолинейное движение и поворот по спокойной воде и движение против волны и поперек волны. При исследовании и оптимизации конструктивных параметров кузова амфибийных машин необходимо анализировать НДС кузова при всех эксплуатационных режимах, однако это сложный и трудоемкий процесс. Во-первых, для расчета внешних нагрузок из всех эксплуатационных режимов необходимо найти критические состояния амфибийных машин (по НДС, параметрам кузова и с учетом соответствующих стандартов). Внешние нагрузки в критических состояниях могут быть рассмотрены как предельные для данного режима. Во-вторых, в каждом эксплуатационном режиме возникают различные внешние нагрузки, и их влияние на НДС кузова является комплексным. Несмотря на сходство положения кузова в различных режимах, необходимо проанализировать величину и распределение внешних нагрузок по кузову при каждом режиме отдельно.

Расчет НДС при выбранных внешних нагрузках осуществляется на базе *метода конечных элементов* (МКЭ). Проведенные нами исследования включали следующие этапы: 1) оценка возможных предельных состояний из эксплуатационных режимов; 2) расчет величин внешних нагрузок для этих состояний; 3) расчет НДС конструкции кузова в целом и в отдельных его элементах (локальных зонах) при соответствующих эксплуатационных режимах и нахождение из них экстремальных для проведения в дальнейшем оптимизации конструкции с целью снижения массы.

Целью работы является нахождение расчетных научно-обоснованных экстремальных режимов нагружения кузовов скоростных амфибийных машин из возможных эксплуатационных при движении по воде на основе моделирования применительно к оптимальному проектированию кузовов таких машин.

Разработка моделей кузова

В качестве объекта исследования выбрана скоростная амфибийная машина *Humdinga*. Для изучения нагрузочных режимов при эксплуатации необходимо построить три модели: кинематическую модель для расчета внешних нагрузок при движении на суше, конечно-элементную модель (КЭМ) для расчета внешних нагрузок при движении по воде и КЭМ для расчетов НДС кузова.

1. Кинематическая модель

По доступным данным, амфибийная машина *Humdinga* имеет длину кузова 7,012 м, ширину 2,304 м, и массу 3200 кг (рис. 1). Центр массы находится в точке (0 м, -0,8 м, -3,73 м) в системе координат кузова. Моменты инерции относительно осей x, y, z равны (11459 кг · м², 11619 кг · м², 2319 кг · м²). Система подвески амфибийной машины *Humdinga* представляет собой гидравлическую складную независимую систему с использованием запатентованной технологии *Gibbs HAS*, которая относится к независимой подвеске на двойных поперечных рычагах.

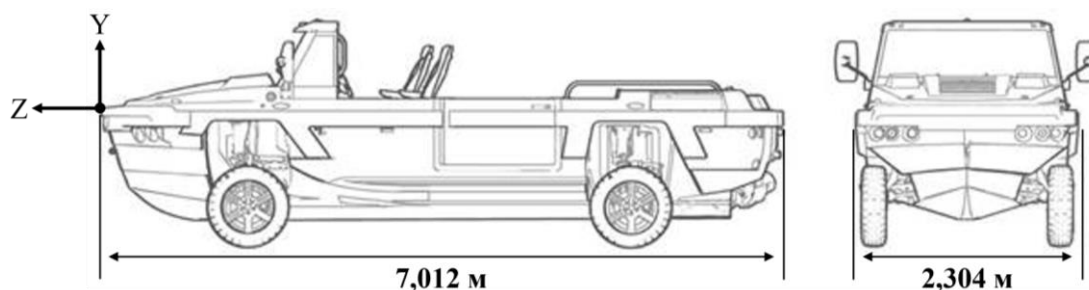


Рис. 1 Общий вид скоростной амфибийной машины *Humdinga*

Fig. 1. General view of high-speed amphibious vehicle *Humdinga*

На основании указанных параметров кузова в программе *Adams* была создана упрощенная кинематическая модель амфибийной машины *Humdinga* (рис. 2). Эта упрощенная модель состоит из кузова амфибии, системы поддрессоривания, двигателя и колес. Соединение кузова с системой поддрессоривания осуществляется с помощью шарниров. Кузов и двигатель соединены четырьмя втулками. Поскольку данная статья посвящена определению предельных нагрузок при движении по воде, то эта модель приведена для представления общего подхода к определению нагрузок на кузов амфибийной машины.

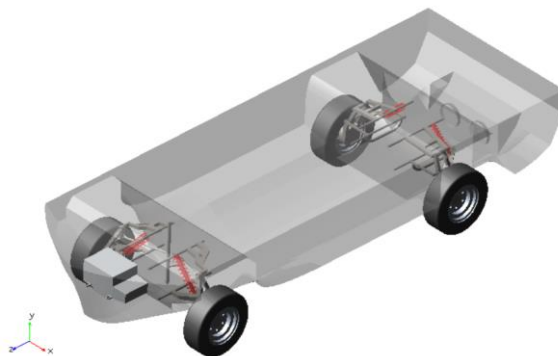


Рис. 2. Упрощенная кинематическая модель амфибийной машины *Humdinga*

Fig. 2. Simplified kinematic model of the *Humdinga* amphibious vehicle

2. Конечно-элементная модель для расчета внешних нагрузок

При движении по воде внешняя нагрузка в основном включает давление воды и опорную силу, приложенную к колесам при входе в воду. Для расчета внешних нагрузок в этих режимах создана КЭМ в программе Star CCM+. Для режима движения по воде КЭМ состоит из трехмерных конечных элементов (КЭ) (всего 243716), включая область возле кузова (всего 215801) и окружающую водную среду (всего 27915) (рис. 3). В окружающей водной среде используется КЭ с длиной стороны 100-400 мм, а в области возле кузова используется КЭ с длиной стороны 30-150 мм. Размеры КЭ подбирались на основе анализа результатов предварительных расчетов с учетом формы геометрической модели. С помощью перекрывающихся секток КЭ двух областей объединяются, а параметры передаются на стыке. Модель VOF (volume of fluid) используется для моделирования водной поверхности, а модель DFBI (dynamic fluid body interaction) используется для определения массы, положения центра масс и момента инерции амфибийной машины *Humdinga*. Задавая скорость и направление потока и ограничивая степени свободы корпуса, можно получить внешнюю нагрузку и положение кузова при движении по воде.

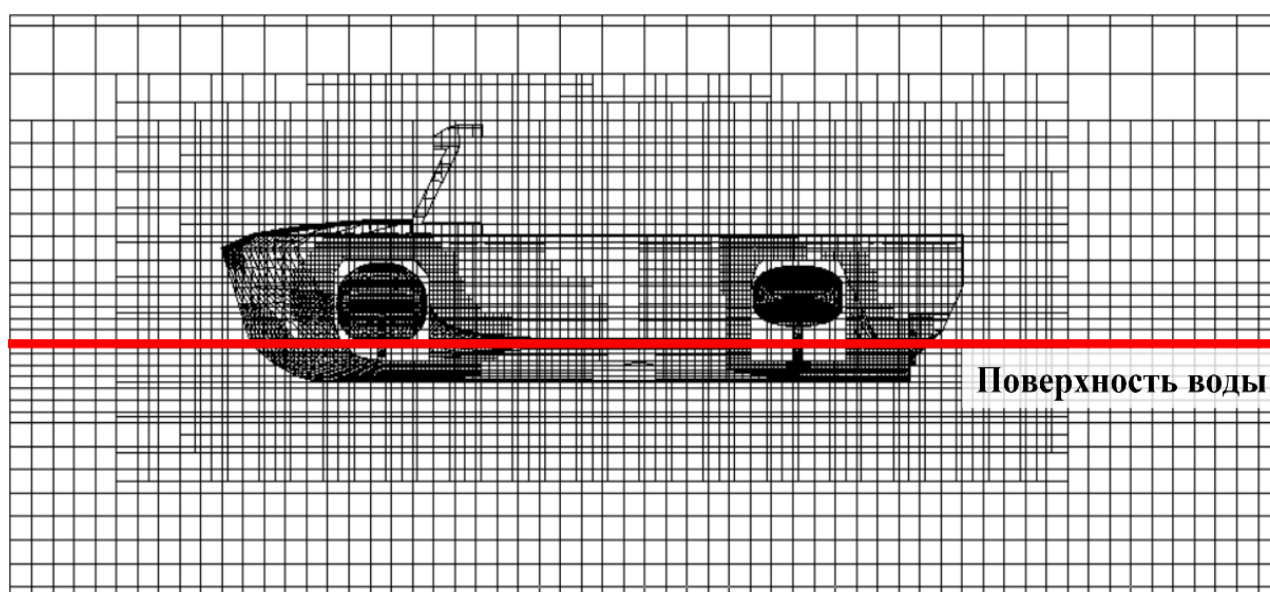


Рис. 3. КЭМ амфибийной машины *Humdinga* и окружающей среды при движении по воде

Fig. 3. Finite element model (FEM) of the *Humdinga* amphibious vehicle and the environment when moving through water

Для режима при входе в воду КЭМ состоит из трехмерных КЭ (всего 324197), включая область возле кузова (всего 160671) и окружающую водную среду (всего 163526) (рис. 4). В окружающей водной среде используется КЭ с длиной стороны 62,5-1000 мм, а в области возле кузова используется КЭ с длиной стороны 50-200 мм. Для обеспечения точности результатов размеры КЭ области у поверхности воды и у склона меньше чем в остальных. Кроме того, КЭМ также содержит 5 слоев сеток пограничного слоя толщиной 20 мм. В модель DFBI добавлен контакт между колесом и склоном для имитации опорных сил (на колесах) в процессе входа в воду. Задав начальную скорость амфибии и ограничив степени свободы кузова, можно получить распределение внешней нагрузки амфибийной машины при входе в воду.

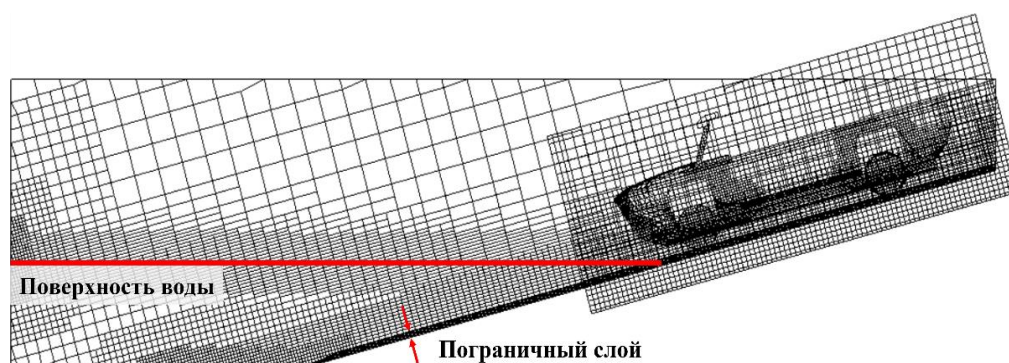


Рис. 4. КЭМ амфибийной машины *Humdinga* и окружающей среды при входе в воду

Fig. 4. FEM of the *Humdinga* amphibious vehicle and the environment when entering the water

3. Конечно-элементная модель для расчета НДС кузова

Анализ предварительных сравнительных расчетов для кузова в целом и отдельных его зон на начальной стадии проектирования (включая многовариантные) допустимо рассчитывать НДС локальных конструкций кузова. Это позволяет сократить машинное время при обеспечении необходимой точности результатов, что особенно важно для многовариантных расчетов (оптимизации) выбранных внешних нагрузок. Исходя из характера действия нагрузок в кузове, рассматривались три зоны: передняя, боковые и днище, с учетом расположения каркасных элементов (рис. 5). В программе статического анализа *Ansys* панели кузова моделируются двумерными конечными элементами (*Shell181*) с размерами сторон 20 мм. Рама на предварительных этапах моделируются одномерными конечными элементами (*Beam188*) длиной 10 мм и в дальнейшем двумерными конечными элементами. При этом 1D- и 2D-конечные элементы соединены контактом *Bonded*.

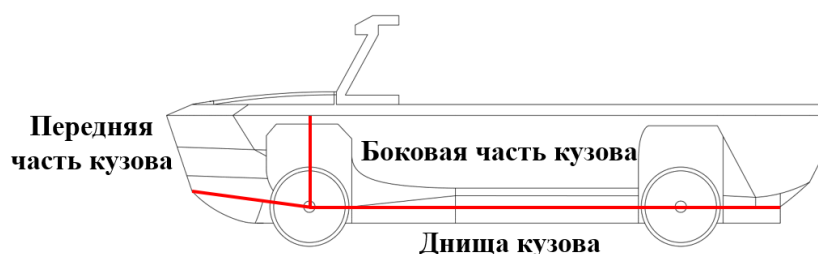


Рис. 5. Локальные зоны конструкция кузова амфибийной машины *Humdinga*

Fig. 5. Local zone body structure of the *Humdinga* amphibious vehicle

Постановка задачи

Условия эксплуатации амфибийных машин включают движение по суше и воде, вход и выход из воды. Дороги на суше делятся на дороги с твердой поверхностью и бездорожье [2]. В данной работе поставлена задача определения экстремальных нагрузочных режимов по воде и входе в воду.

Расчет нагрузочных режимов по воде и входе в воду

1. *При входе в воду.* Для нахождения экстремальных режимов для передней части кузова необходимо определить внешние нагрузки при входе в воду. Перед расчетом внешней нагрузки необходимо провести анализ критического состояния входа в воду, определив максимальный безопасный угол входа и соответствующую предельную скорость. Процесс входа в воду начинается с того момента, когда кузов касается водной поверхности, и заканчивается,

когда опорная сила передних колес становится равной нулю. В целях обеспечения безопасности водителя и эксплуатации амфибии вода не должна заливать капот при входе в воду (быть выше линии, проходящей через точку А (рис. 6)).

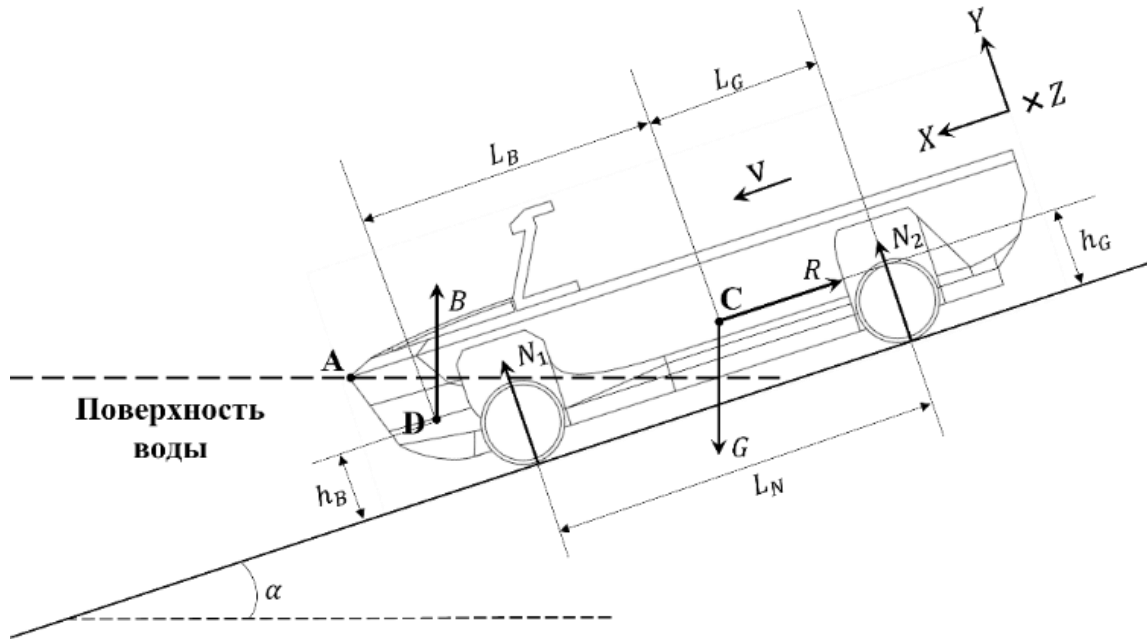


Рис. 6. Внешние нагрузки при входе амфибии в воду

Fig. 6. External loads when an amphibian enters the water

По условиям успешного входа в воду в критическом состоянии максимальный безопасный угол входа составляет около 18° [3]. На практике амфибийные машины обычно входят в воду по склону с небольшой скоростью. Следовательно, фактический максимальный безопасный угол входа в воду будет немного меньше, чем результат расчета математической модели. По результатам предварительных исследований в качестве максимально безопасного угла входа в воду амфибийной машины *Humdinga* определен угол 15° . Расчет предельной скорости амфибийной машины *Humdinga* при угле входа в воду $\alpha = 15^\circ$ осуществляется на базе МКЭ. Параметры для расчетов: угол входа в воду $\alpha=15^\circ$, начальная скорость задавалась как 10 км/ч, 12 км/ч и 14 км/ч соответственно. Траектория точки А передней части кузова показана на рис. 7. По результатам расчета траектория точки А касается поверхности воды только при начальной скорости $v_0 = 10$ км/ч, т.е. капот не будет затоплен водой. Поэтому предельная скорость при угле входа в воду 15° составляет не более 10 км/ч.

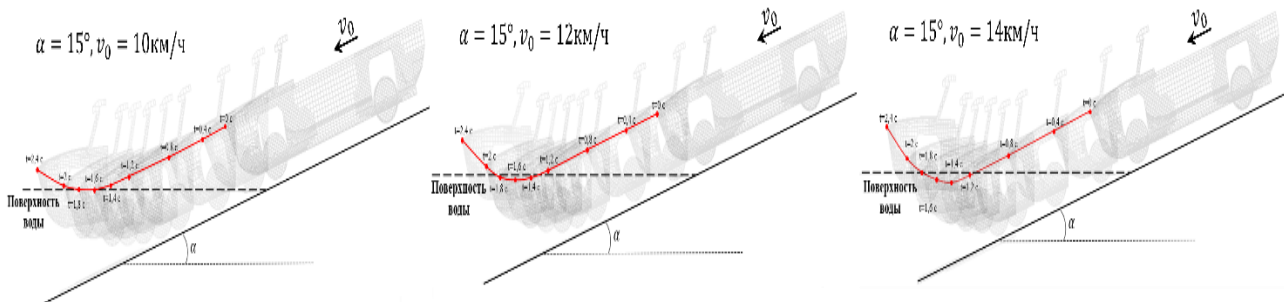


Рис. 7. Траектория точки А при разных скоростях входа в воду

Fig. 7. Trajectory of point A at different speeds of entry into the water

В качестве критического состояния в этом эксплуатационном режиме выбран момент, когда ускорение кузова достигает минимума, т.е. $t = 1,23$ с. По результатам в программе *Star CCM+* в процессе входа в воду внешней нагрузкой является давление, действующее на корпус передней части кузова. Максимальная нагрузка возникает в передней части кузова, и пик максимального давления составляет 9475 Па. Изменения ускорения кузова и максимального давления представлены на рис. 8, положение кузова и распределение внешних нагрузок в критическом состоянии – на рис. 9.

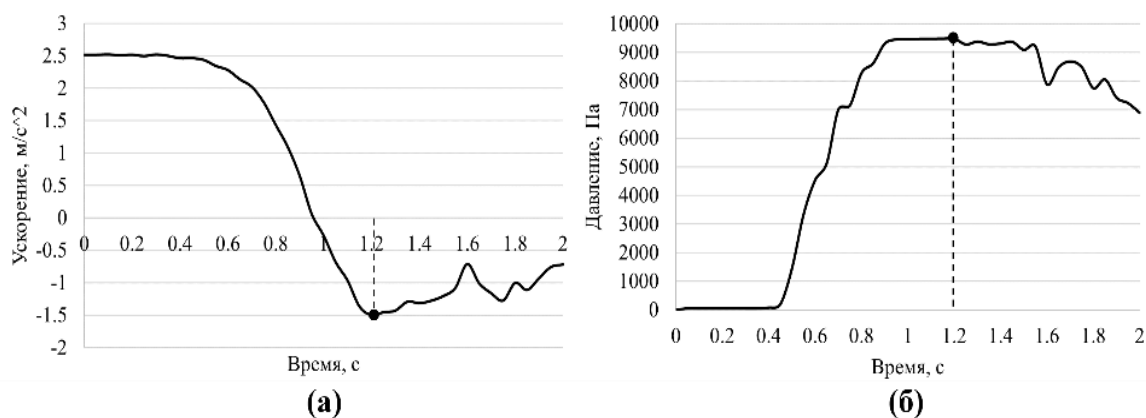


Рис. 8. Изменения ускорения кузова (а) и максимального давления на переднюю часть кузова (б) при входе в воду

Fig. 8. Curves of body acceleration (a) and maximum front body pressure (b) when entering the water

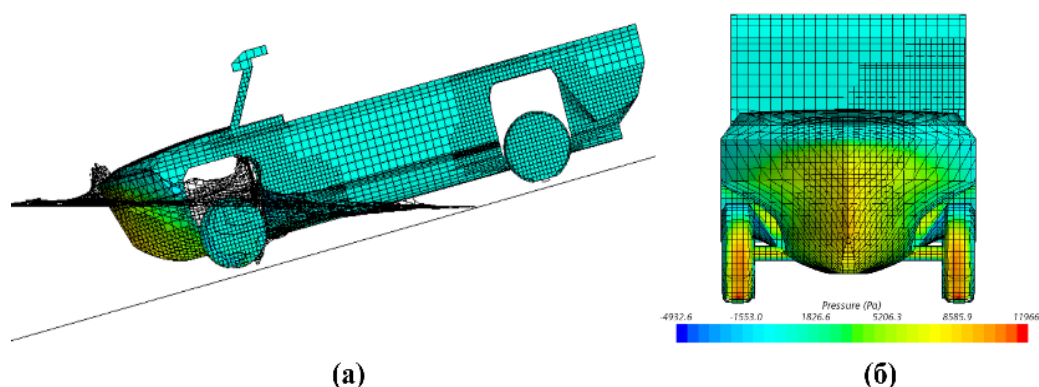


Рис. 9. Положение кузова (а) и распределение давления (б) в критическом состоянии при входе в воду

Fig. 9. Body attitude (a) and pressure distribution (b) in critical state when entering the water

2. При прямолинейном движении по спокойной воде. Для нахождения экстремальных воздействий на днище кузова необходимо рассчитать внешние нагрузки при прямолинейном движении по воде на низкой и высокой скоростях. По официальной информации у скоростной амфибийной машины *Humdinga* максимальная скорость движения по водной поверхности составляет не менее 48 км/ч [4]. В данной статье в качестве минимальной скорости движения выбрана равная 3 км/ч, а скорость 50 км/ч – как максимальная. По результатам моделирования в программе *Star CCM+* при скорости 3 км/ч угол наклона кузова амфибии почти равен 0° . Внешней нагрузкой является давление, прикладываемое к всему днищу. Величина давления в основном связана с глубиной погружения в воду и мало связана со скоростью движения. Максимальное расчетное давление, действующее на днище кузова, составляет 4794 Па. Положение кузова и распределение давления показаны на рис. 10.

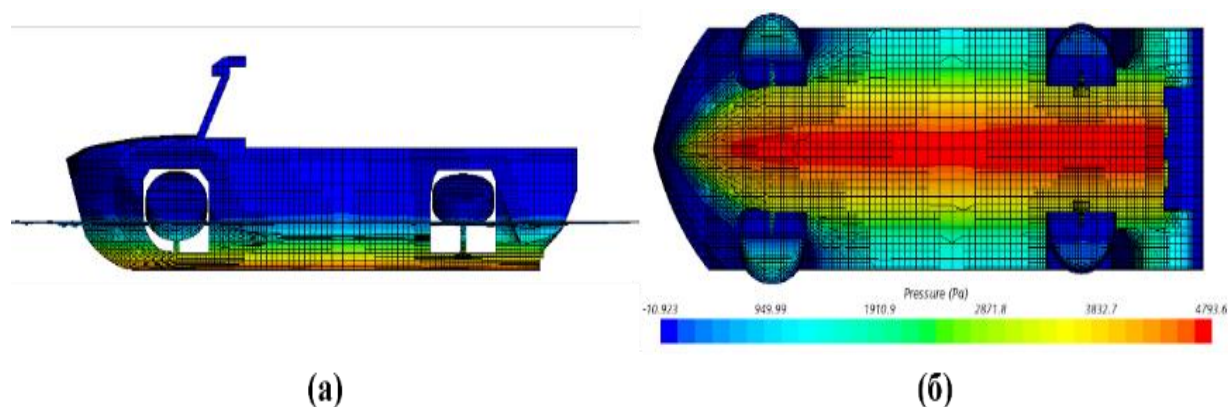


Рис. 10. Положение кузова (а) и распределение давления (б) при прямолинейном движении по воде со скоростью 3 км/ч

Fig. 10. Body attitude (a) and pressure distribution (b) during rectilinear movement through water at a speed of 3 km/h

При скорости 50 км/ч угол наклона кузова амфибии составляет около $5,5^\circ$. Внешние нагрузки в основном действуют на среднюю и заднюю части днища кузова, а также на подкрылки задних колес. Максимальное давление на днище кузова – 7885 Па, а на подкрылки задних колес – 80521 Па. Положение кузова и распределение внешних нагрузок показаны на рис. 11.

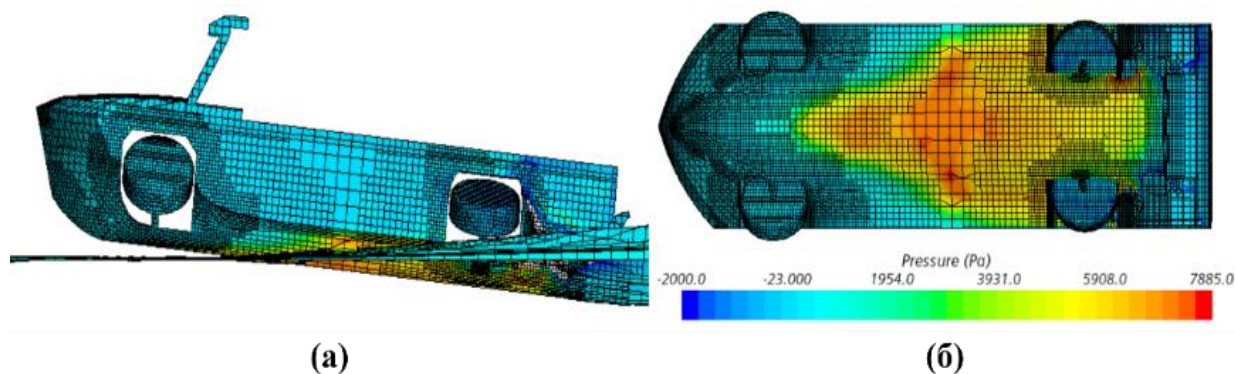


Рис. 11. Положение кузова (а) и распределение давления (б) при прямолинейном движении по воде со скоростью 50 км/ч

Fig. 11. Body attitude (a) and pressure distribution (b) during rectilinear movement through water at a speed of 50 km/h

3. При повороте при спокойной воде. Для нахождения экстремального режима боковой части кузова необходимо рассчитать внешние нагрузки при повороте в воде на низкой и высокой скоростях. Как и в случае с начальными условиями, при прямолинейном движении выбрана скорость 3 км/ч при повороте (на низкой скорости) и 50 км/ч при повороте на высокой скорости. При повороте в воде со скоростью 3 км/ч траектория движения, изменения угла крена и угла тангажа показаны на рис. 12. По результатам моделирования в программе Star CCM+ при повороте со скоростью 3 км/ч углы крена и наклона практически близки к 0° . Внешние нагрузки в этом режиме аналогичны внешним нагрузкам при движении по воде со скоростью 3 км/ч. Нагрузки слишком малы, чтобы их можно было использовать для изучения НДС боковой части кузова амфибийных машин.

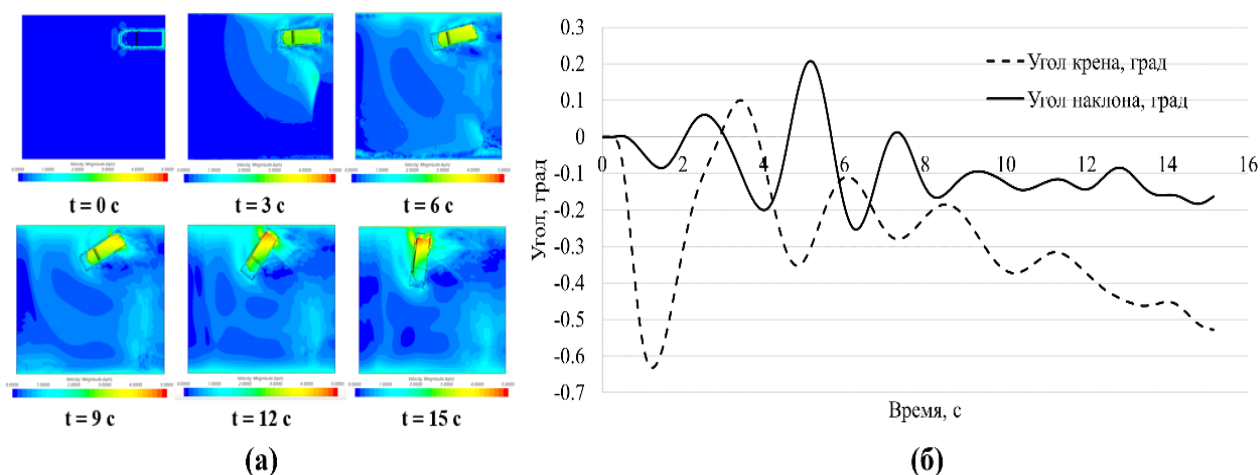


Рис. 12. Траектория движения (а), кривые изменений угла крена и угла тангажа (б) при повороте при движении по воде со скоростью 3 км/ч

Fig. 12. Trajectory (a), roll angle and pitch angle curves (b) when turning in the water at a speed of 3 km/h

При повороте на высокой скорости должна быть обеспечена безопасность водителя и пассажиров. Перед расчетом внешней нагрузки необходимо сначала определить максимальный безопасный угол поворота. По стандарту [5] при повороте по спокойной воде с высокой скоростью угол крена не должно быть больше 8° . По результатам предварительного исследования для амфибийной машины *Humdinga* определено, что угол поворота α составляет 4° при угле крена около 8° . В этом режиме внешние нагрузки в основном действуют на корпус задней части борта кузова и правой части днища кузова. Максимальная нагрузка возникает вблизи подкрылков задних колес и составляет около 32836 Па. Положение кузова и распределение внешних нагрузок показаны на рис. 13.

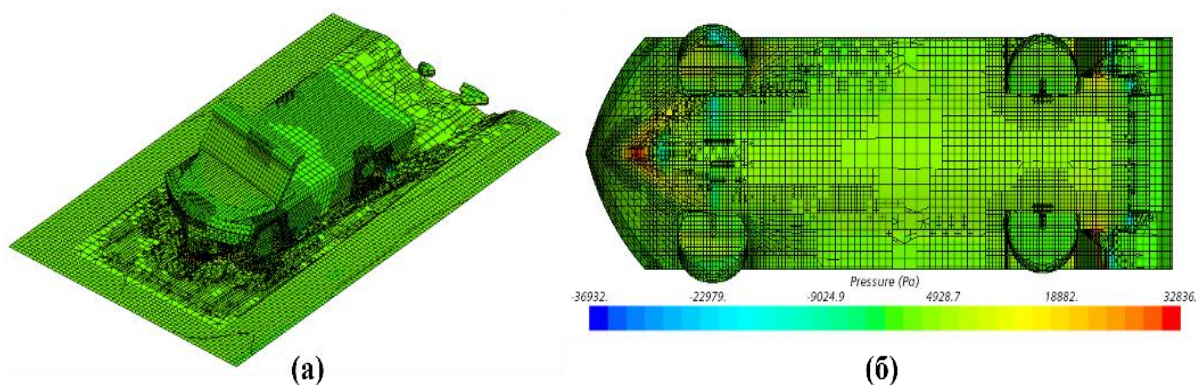


Рис. 13. Положение кузова (а) и распределение давления (б) при повороте со скоростью 50 км/ч

Fig. 13. Body attitude (a) and pressure distribution (b) when turning at a speed of 50 km/h

4. При движении против волны. Движение амфибийных машин по воде с волнами включает: движение по волне, движение против волны и движение поперек волны. М.Ю. Филиппов провел углубленный анализ опасной ситуации амфибийных машин при движении по воде с волнами с точки зрения устойчивости кузова [6], и некоторые выводы сводятся к следующему:

- 1) при движении против волны опасность потери устойчивости вследствие снижения от воздействия волнения минимальна (тем не менее, в этом случае следует помнить о высокой ударной нагрузке от встречных волн на корпус);
- 2) при движении поперек волны для оценки поперечной устойчивости амфибийных машин следует использовать основной критерий устойчивости, предлагаемый Речным Регистром России [7].

В данной работе основное внимание уделяется анализу влияния внешних нагрузок на НДС конструкции кузова при движении по воде с волнами: против волны и поперек волны. При движении против волны величина внешнего воздействия в основном связана с относительной скоростью амфибии и параметрами волны, такими как длина и высота волны. Известно [8], что с увеличением отношения длины волны к длине кузова пиковое значение внешней нагрузки сначала увеличивается, а затем уменьшается. Максимальное значение появляется при отношении длины волны к длине кузова 1,25. На основе зависимости между параметрами глубоководной волны [9, 10] при длине волны $L_B = 8,765$ м, скорости волны $C_B = 13,3$ км/ч, высоте волны $H = 0,86$ м, периоде волны $T_{\text{волна}} = 2,37$ с значение внешней нагрузки наибольшее. В качестве предельного состояния на этом режиме выбран момент нахождения амфибийных машин во впадине волны, т.е. при $t = 8,79$ с (для указанных выше параметров волны). Для расчетов в программе Star CCM+ в этом состоянии внешней нагрузкой является давление, действующее на корпус передней части кузова и задней части днища кузова. Максимальная нагрузка возникает в передней части кузова, и пик максимального давления составляет около 88327 Па. Изменения ускорения кузова и максимального давления представлены на рис. 14. Положение кузова и распределение внешних нагрузок показаны на рис. 15.

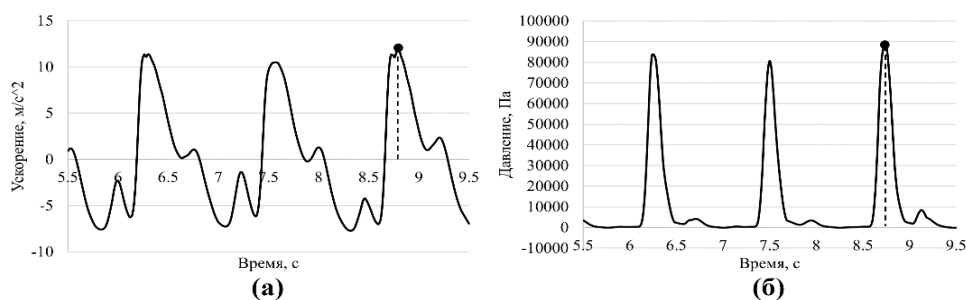


Рис. 14. Изменения ускорения кузова (а) и максимального давления на переднюю часть кузова (б) при движении против волны

Fig. 14. Curves of body acceleration (a) and maximum front body pressure (b) when moving against the wave

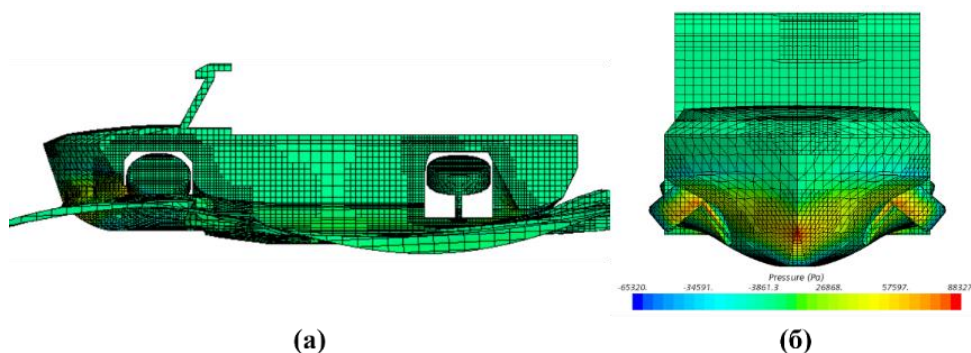


Рис. 15. Положение кузова (а) и распределение давления (б) в критическом состоянии при движении против волны

Fig. 15. Body attitude (a) and pressure distribution (b) in critical state when moving against the wave

5. При движении поперек волны. Для нахождения экстремального режима боковой части кузова необходимо рассчитать внешние нагрузки при движении поперек волны. В условиях движения амфибийных машин поперек волн возникает периодическое перекачивание кузова, а также возникают периодические ударные нагрузки на боковые части кузова вследствие воздействия волн. По стандарту [5] при движении пассажирских судов на спокойной воде суммарный угол крена не должен превышать 10° при совместном действии кренящего момента из-за неравномерного распределения пассажиров и груза и кренящего момента бокового ветра. В расчете принята падающая волна, длина волны равна длине ватерлинии, а в нашей работе длина волны примерно равна ширине кузова [11]. На основе зависимости между параметрами глубоководной волны [9, 10], в нашей работе приняты длина волны $L_B = 2,304$ м, скорость волны $C_B = 6,8$ км/ч, высота волны $H = 0,318$ м, период волны $T_{\text{волна}} = 1,21$ с.

В качестве критического состояния в этом режиме выбираем момент максимального ускорения кузова, т.е. $t = 2,9$ с. По результатам расчета в программе Star CCM+ в критическом состоянии внешней нагрузкой является давление, действующее на корпус нижней части борта кузова и правой части днища кузова. Максимальная нагрузка возникает вблизи ватерлинии кузова, и пик максимального давления составляет около 5382 Па. Изменения ускорения кузова и максимального давления представлены на рис. 16, положение кузова и распределение внешних нагрузок – на рис. 17.

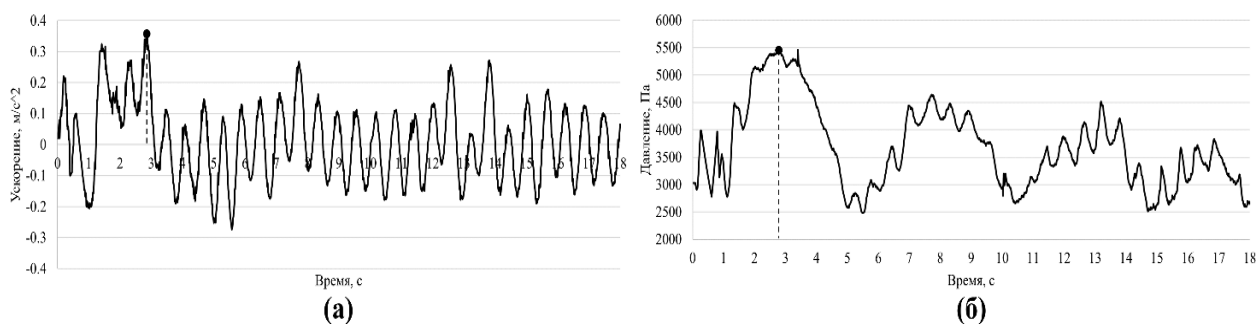


Рис. 16. Изменения ускорения кузова (а) и максимального давления на боковую часть кузова (б) при движении поперек волны

Fig. 16. Curves of body acceleration (a) and maximum pressure on the side of the body (b) when moving across the wave

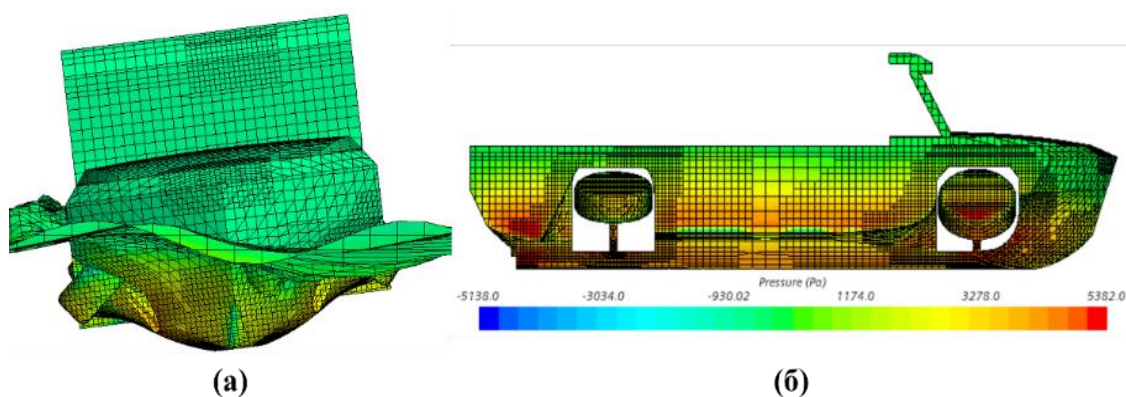


Рис. 17. Положение кузова (а) и распределение давления (б) в критическом состоянии при движении поперек волны

Fig. 17. Body attitude (a) and pressure distribution (b) in critical state when moving across the wave

Нахождение экстремальных режимов в локальных зонах конструкции кузова

Для отдельных зон кузова, в соответствии с предложенным в предыдущем разделе разделения конструкции кузова на отдельные зоны и характером действия давления на разных режимах, был выбран «свой» экстремальный режим.

1. *Днище кузова.* По предварительной оценке днище кузова воспринимает самые тяжелые внешние нагрузки при прямолинейном движении по воде и при вывешивании колес при движении по суше (диагональном), которое можно разложить на изгиб и кручение кузова [1] (приведено для сравнения). НДС днища кузова при этих четырех эксплуатационных режимах приведены в табл. 1, а картины деформированных состояний – на рис. 18.

Таблица 1.
Основные параметры НДС днища кузова

Table 1.
Main parameters of the underbody structure response

Нагрузочный режим	Максимальное перемещение, мм	Среднее значение перемещений, мм	Среднее напряжение, МПа
Давление (движение по воде со скоростью 50 км/ч)	7,906	2,102	11,34
Давление (движение по воде со скоростью 3 км/ч)	5,048	1,352	7,12
Кручение (при вывешивании колес)	19,42	4,045	26,18
Изгиб (при вывешивании колес)	2,638	0,6373	4,06

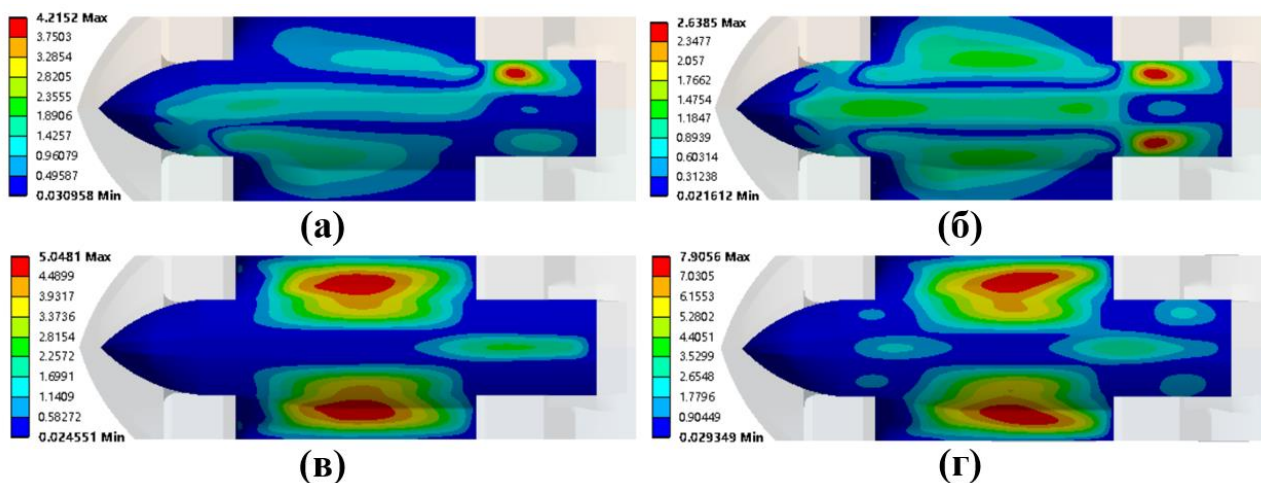


Рис. 18. Картины деформированных состояний днища кузова:

(а) при вывешивании колеса (кручение), (б) при вывешивании колеса (изгиб),
(в) при прямолинейном движении по воде (3 км/ч), (г) при прямолинейном движении по воде (50 км/ч)

Fig. 18. Deformation of the underbody:

(a) when wheel suspend (torsion) (b) when wheel suspend (bending) (c) during rectilinear movement through water (3 km/h) (d) during rectilinear movement through water (50 km/h)

Из анализа результатов расчетов делаем вывод, что экстремальными режимами для днища кузова являются режим при прямолинейном движении по воде со скоростью 50 км/ч и режим при вывешивании колеса (кручение):

- 1) при прямолинейном движении по воде со скоростью 50 км/ч максимальное перемещение равно 7,906 мм (находится в районе подвески задних колес); среднее значение перемещений – 2,102 мм, а среднее напряжение – 11,34 МПа;
- 2) при вывешивании колес (диагонально) при движении по суше максимальное перемещение равно 19,42 мм (имеет место с обеих сторон днища кузова); среднее значение перемещений – 4,045 мм, а среднее напряжение – 26,18 МПа.

2. *Передняя часть кузова.* Предварительные исследования показали, что передняя часть кузова воспринимает самые тяжелые внешние нагрузки при входе в воду и при движении против волны. Поэтому экстремальное состояние в передней части кузова выбирается из этих двух режимов. Основные параметры НДС передней части кузова представлены в табл. 2, а картины деформированных состояний – на рис. 19.

Таблица 2.
Основные параметры НДС передней части кузова
Table 2.
Main parameters of the front body structure response

Нагрузочный режим	Максимальное перемещение, мм	Среднее значение перемещений, мм	Среднее напряжение, МПа
Давление (вход в воду)	0,665	0,212	3,745
Давление (движение против волны)	3,704	1,069	18,39

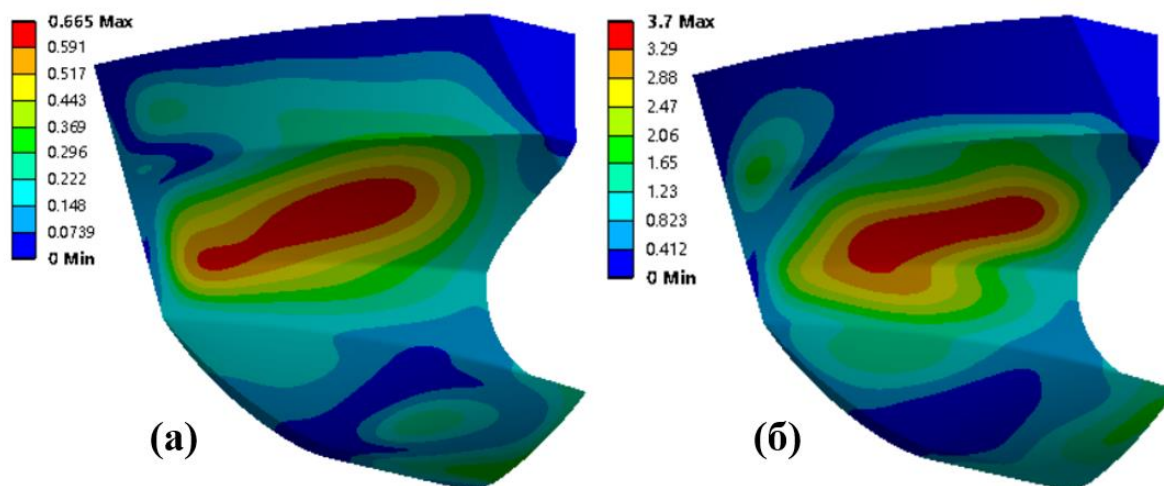


Рис. 19. Картины деформированных состояний в передней части кузова:
(а) при входе в воду, (б) при движении против волны

Fig. 19. Deformation of the front body:
(a) when entering the water (b) when moving against the wave

Анализ результатов расчетов позволил сделать вывод, что экстремальным режимом передней части кузова являются режим при движении против волны:

- 1) при движении против волны максимальное перемещение равно 3,704 мм, среднее значение перемещений – 1,069 мм, а среднее напряжение – 18,39 МПа;
- 2) при входе в воду и при движении против волны наибольшая деформация возникает в центре передней части кузова, ее величина существенно ниже, чем при предыдущем режиме. В обоих режимах зона максимальной деформации в основном одинаковая.

3. *Боковая часть кузова.* Боковая часть кузова воспринимает самые тяжелые внешние

нагрузки при повороте на воде и при движении поперек волны. Поэтому экстремальное состояние боковой части кузова выбирается из этих двух режимов. Основные параметры НДС боковой части кузова представлены в табл. 3, а картины деформированных состояний – на рис. 20.

Таблица 3.

Основные параметры НДС боковой части кузова

Table 3.

Main parameters of the side body structure response

Нагрузочный режим	Максимальное перемещение, мм	Среднее значение перемещений, мм	Среднее напряжение, МПа
Давление (поворот по воде со скоростью 50 км/ч)	6,954	0,751	5,682
Давление (движение поперек волны)	17,25	5,436	22,84

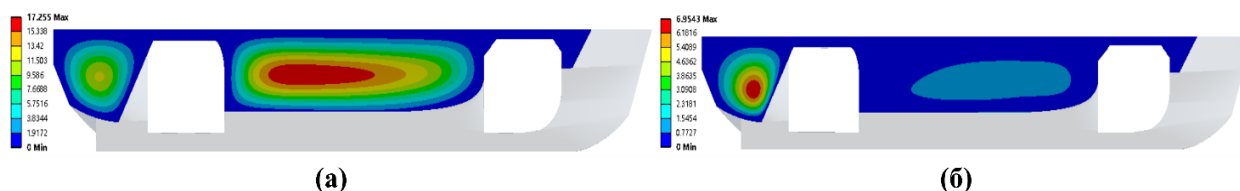


Рис. 20. Картины деформированных состояний боковой части кузова: (а) при движении поперек волны, (б) при повороте на воде (50 км/ч)

Fig. 20. Deformation of the side body:

(a) when moving across the wave (b) when turning in the water (50 km/h)

Из анализа результатов следует, что экстремальным режимом в боковой части кузова является режим при движении поперек волны, при этом в кузове:

- 1) максимальное перемещение равно 17,25 мм, среднее значение перемещений – 5,436 мм, а среднее напряжение – 22,84 МПа;
- 2) максимальная деформация имеет место в средней части борта. При повороте по воде со скоростью 50 км/ч максимальная деформация возникает в задней части борта.

Заключение

При расчете НДС кузова скоростной амфибийной машины при эксплуатации в водной среде необходимо учитывать движение по спокойной воде с максимальной скоростью, движение против волны и поперек волны (при движении по суше – вывешивание колеса). При этом:

- при прямолинейном движении по воде со скоростью 50 км/ч максимальное перемещение в кузове равно 7,906 мм (имеет место в зоне подвески задних колес);
- при вывешивании колеса (диагональном) при движении по суше максимальное перемещение в кузове равно 19,42 мм (по обеим сторонам днища кузова);
- при движении против волны максимальное перемещение равно 3,704 мм (в центре передней части кузова);
- при движении поперек волны максимальное перемещение равно 17,25 мм (в средней части борта).

Представленные выводы основаны на приведенном анализе одиннадцати эксплуатационных режимов. Однако для ситуаций, не охватываемых этими режимами, рекомендуется проводить дополнительные исследования на основе специфических целей и задач.

Библиографический список

1. **Афанасьев, Б.А.** Проектирование полноприводных колесных машин учебник для вузов. Т. 1 / Б.А. Афанасьев, Г.И. Гладов, Л.Ф. Жеглов [и др.]. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 496 с.
2. **Гильманов, В.С.** Виды дорожного покрытия автомобильных дорог // Экономика и социум. 2020. № 11 (78). С. 578-584.
3. **Wu, K.** Research on water entry and exit characteristics of amphibious vehicles / K. Wu, D. Yang, Y. Zhao // Agricultural Equipment and Vehicle Engineering. 2008. № 12. Pp. 20-22.
4. **Sheppard, D.** Amphibious Innovation: Engineering the Aquada // E. nz Magazine: The Magazine of Technical Enterprise, 2005. Vol. 6. №4. Pp. 23-25.
5. Технического регламента обязательного освидетельствования судов внутреннего плавания (2019 г.) [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.msa.gov.cn/page/article.do?articleId=2ED63311-23DE-4EA6-BF75-343220C726C9>
6. **Филиппов, М. Ю.** Остойчивость амфибийных машин на волнении : диссертация ... кандидата технических наук : 05.05.03. – Москва, 2004. – 133 с.
7. Правила классификации и постройки морских судов часть IV остойчивость [Электронный ресурс] // Режим доступа: https://rfclass.ru/assets/Uploads/pkps_ms_4.pdf
8. **Jiu, Y.** Research on the sailing characteristics of high-speed amphibious vehicles headed directly into the waves: диссертация – Beijing, 2016. – 64 p.
9. **Sorensen, R.M.** Basic wave mechanics: for coastal and ocean engineers. John Wiley & Sons, 1993. – 304 p.
10. **Peng, Y.** Basis of Ship Seakeeping. National Defense Industry Press, 1989. – 189 p.
11. **Petacco, N.** IMO second generation intact stability criteria: General overview and focus on operational measures / N. Petacco, P. Gualeni // Journal of Marine Science and Engineering, 2020. Vol. 8. № 7. Pp. 494.

*Дата поступления
в редакцию: 03.07.2023*

*Дата принятия
к публикации: 10.10.2023*

УДК 629.113

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_97

**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЗАКОНА
ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОЙ КОЛЕСНОЙ МАШИНЫ
ПРИ ЦИКЛИЧНЫХ ГРУЗОПЕРЕВОЗКАХ**

С.В. Назаренко

ORCID: 0009-0003-1382-5589 e-mail: Sergey.Nazarenko@kamaz.ru

ПАО «КАМАЗ»

Набережные Челны, Россия

Б.Б. Косицын

ORCID: 0009-0003-3004-1073 e-mail: kositsyn_b@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Москва, Россия

Б.В. Падалкин

ORCID: 0009-0009-2048-3701 e-mail: padalkin@bmstu.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Москва, Россия

А.А. Стадухин

ORCID: 0009-0009-2048-3701 e-mail: ant.m9@ya.ru

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Москва, Россия

Исследована сфера применения основанного на генетическом алгоритме метода определения оптимального закона движения беспилотной колесной машины по заданному маршруту. Использование в составе трансмиссии двух тяговых электродвигателей в совокупности с редукторами, имеющими разное передаточное отношение, позволяет использовать электродвигатели со значительно меньшей суммарной мощностью, чем в случае попытки обеспечить диапазон трансмиссии машины одним электродвигателем. Показано, что это позволяет обеспечить меньшие массу, габаритные размеры и стоимость электропривода. Кроме того, при наличии двух тяговых электроприводов (электромашин в совокупности с редукторами, имеющими различные передаточные отношения), можно перераспределять тягу между ними таким образом, чтобы суммарные потери энергии были минимальны. Для повышения энергоэффективности движения беспилотной колесной машины предлагается использовать установленный при помощи разработанного метода закон управления моментным и быстроходным приводом, т.е. оптимизировать не только скорость на маршруте, но и коэффициент распределения тяги между двигателями.

Ключевые слова: беспилотная машина, колесная машина, энергоэффективность, генетический алгоритм, закон движения, оптимизация, циклические грузоперевозки.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Назаренко, С.В. Применение генетического алгоритма для определения оптимального закона движения беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках / С.В. Назаренко, Б.В. Косицын, Б.В. Падалкин, А.А. Стадухин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 97-110.

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_97

**APPLICATION OF GENETIC ALGORITHM TO DETERMINE THE
OPTIMAL LAW OF MOTION OF UNMANNED WHEELED VEHICLE
IN CYCLIC CARGO TRANSPORTATION**

S.V. Nazarenko

ORCID: **0009-0003-1382-5589** e-mail: **Sergey.Nazarenko@kamaz.ru**

ПАО «КАМАЗ»

Naberezhnye Chelny, Russia

B.B. Kositsyn

ORCID: **0009-0003-3004-1073** e-mail: **kositsyn_b@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

B.V. Padalkin

ORCID: **0009-0009-2048-3701** e-mail: **padalkin@bmstu.ru**

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

A.A. Stadukhin

ORCID: **0009-0009-2048-3701** e-mail: **ant.m9@ya.ru**

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Abstract. The article is devoted to the application of the method based on a genetic algorithm for determining the optimal law of motion of an unmanned wheeled vehicle along a given route. The use of two traction electric motors as part of the transmission in combination with gearboxes having different gear ratios allows the use of electric motors with significantly lower total power than in the case of an attempt to provide the transmission range of the machine with one electric motor. The article shows that this makes it possible to provide less weight, overall dimensions and cost of the electric drive. In addition, in the presence of two traction electric drives (electric machines in combination with gearboxes having different gear ratios), it is possible to redistribute traction between them in such a way that the total energy losses are minimal. It is proposed to use the law of control of torque and high-speed drive obtained using the developed method to increase the energy efficiency of the movement of an unmanned wheeled vehicle, that is, to optimize not only the speed on the route, but also the coefficient of traction distribution between the motors

Key words: unmanned vehicle, wheeled vehicle, energy efficiency, genetic algorithm, law of motion, optimization, cyclic cargo transportation.

FOR CITATION: S.V. Nazarenko, B.V. Kositsyn, B.V. Padalkin, A.A. Stadukhin. Application of genetic algorithm to determine the optimal law of motion of unmanned wheeled vehicle in cyclic cargo transportation. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 97-110. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_97

Введение

В статье [1] предложено использовать генетический алгоритм для получения закона энергоэффективного движения беспилотной колесной машины (БКМ) при циклических грузоперевозках, обеспечивающий возможность управлять электроприводом БКМ, состоящим из двух одинаковых электромашин, соединенных с трансмиссией через редукторы с разным фиксированным передаточным отношением (рис. 1, справа).

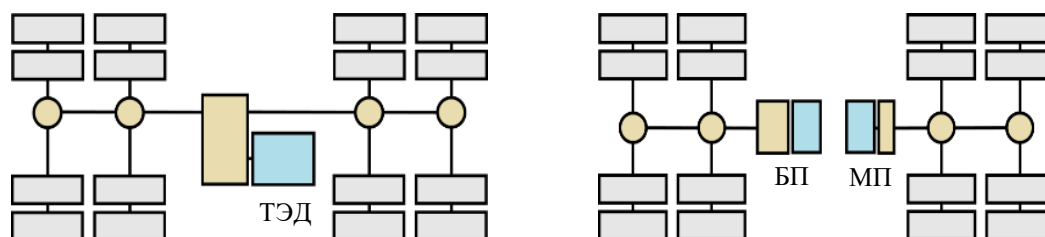


Рис. 1. Принципиальные схемы трансмиссий исследуемых машин

Fig. 1. Schematic diagrams of transmissions of the vehicles under study

Электродвигатель с большим передаточным отношением называется моментным приводом (МП), с меньшим – быстроходным приводом (БП). Такое устройство трансмиссии позволяет, с одной стороны, обеспечивать требуемую максимальную скорость движения и требуемую максимальную силу тяги, с другой – не требует применения ступенчатой трансмиссии (и переключения передачи в движении). Необходимо также отметить, что при движении БКМ электродвигатели БП и МП будут нагружены различным образом, что позволит за счет рационального распределения развиваемой ими мощности достичь лучшей энергоэффективности для трансмиссии в целом. Для оценки эффективности предложенного подхода в данной работе также исследуется БКМ с одним тяговым электродвигателем (ТЭД), обеспечивающим весь требуемый диапазон машины (рис. 1, слева). Генетические алгоритмы широко используются наряду с другими методами для решения сложных задач оптимизации, потенциально имеющих много локальных минимумов, в частности – задачи поиска пути [2], определения оптимального скоростного режима [3-4], перемещения груза от поставщиков к потребителям с учетом распределительных центров, ограничения времени снабжения задействованного парка транспортных машин, затрат на дорогу и т.д. [5, 6].

Для использования генетического алгоритма требуется определить наборы варьируемых параметров (называемых особями), соответствующие операции с ними (функции создания, мутации и рекомбинации) и целевую функцию (функцию приспособленности) [1]. Краткая характеристика предлагаемого метода с использованием генетического алгоритма состоит в следующем: в качестве целевой функции оптимизации выбрана суммарная мощность потерь тяговых электродвигателей БКМ (потери в электродвигателях определялись с использованием методики [7]), варьируемыми параметрами являлись скорость движения V_k и коэффициент распределения тяги между двигателями h_k на каждом участке, функции генетического алгоритма были модифицированы таким образом, чтобы обеспечить заданное время на маршруте, не превышение максимально допустимой скорости на участке, а также максимальных ускорений (в том числе исходя из тяговых возможностей БКМ). При учете ограничений использовалась математическая модель криволинейного движения машины в естественных координатах [8, 9].

Методика исследования и исходные данные

Основные параметры исследуемой колесной машины представлены в табл. 1. Параметры ТЭД и передаточные числа трансмиссии выбраны таким образом, чтобы обеспечить одинаковую максимальную скорость и максимальную силу тяги для двух вариантов БКМ (вариант 1 с одним ТЭД и вариант 2 с двумя ТЭД – МП и БП, рис. 1). На рис. 2 представлены динамические характеристики рассматриваемых БКМ.

Таблица 1.

Параметры исследуемых беспилотных колесных машин

Table 1.

Parameters of the studied unmanned wheeled vehicles

Параметр	Вариант I	Вариант II
Снаряженная масса машины, $m_{\text{снар}}$, кг	24000	
Полная масса машины, $m_{\text{полн}}$, кг	44000	
Максимальная скорость машины, v_{max} , км/ч	60	
Радиус качения колеса без скольжения, r_0 , м	0,461	
Площадь лобовой проекции, $F_{\text{лоб}}$, м ²	10,2	
Коэффициент аэродинамического сопротивления, c_x	0,7	
КПД механической части трансмиссии	0,97	
Мощность, необходимая для достижения максимальной скорости, $N_{\text{треб}}$, кВт	169	

Окончание табл. 1.

Параметры исследуемых беспилотных колесных машин

Table 1 (continued).

Parameters of the studied unmanned wheeled vehicles

Параметр	Вариант I	Вариант II
Максимальная частота вращения вала электродвигателя, $n_{ЭДmax}$, об/мин ($\omega_{ЭДmax}$, 1/с)	3500 (366,5)	
Диапазон электродвигателя, $d_{ЭД} = \frac{M_{ЭДmax} \cdot \omega_{ЭДmax}}{N_{ЭД,d}}$	5	
Максимальный момент электродвигателя, $M_{ЭДmax}$, Нм	8091	2308 x 2
Мощность электродвигателя с учетом диапазона, $N_{ЭД,d}$, кВт	593	169 x 2
Передаточное отношение для обеспечения максимальной скорости (быстроходного привода) $i_{тр,в}$	10,45	10,45
Передаточное отношение моментного привода $i_{тр,н}$	–	26,18

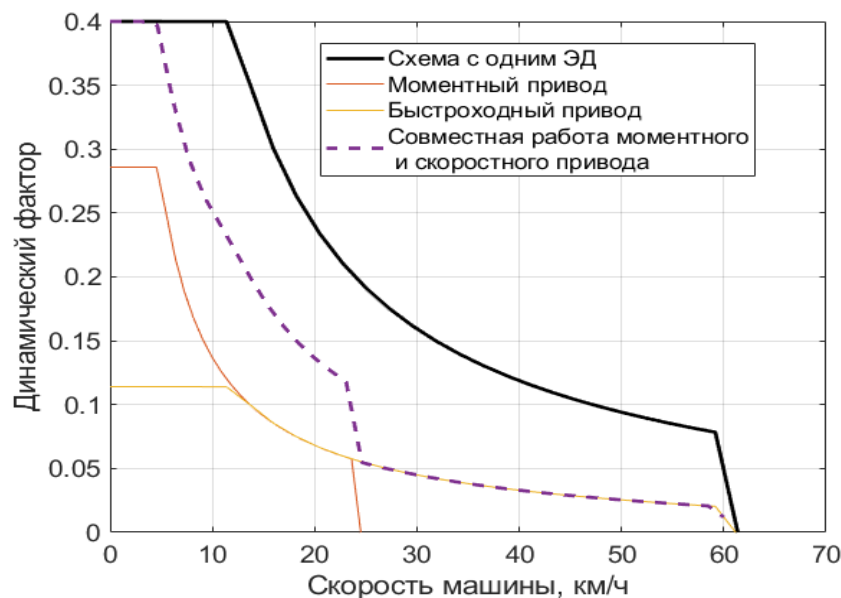


Рис. 2. Динамические характеристики для схемы с одним тяговым двигателем (вариант I) и для схемы с двумя тяговыми двигателями (вариант II, в том числе, при движении только на моментном или быстроходном приводе)

Fig. 2. Dynamic characteristics for a scheme with one traction motor (option I) and with two traction motors (option II, including when driving only on a torque or high-speed drive)

Анализ представленных данных позволяет заключить, что применение в составе привода БКМ двух тяговых электродвигателей позволяет использовать привод с меньшей общей мощностью и, соответственно, массой и габаритными размерами, по сравнению с исполнением привода с одним электродвигателем (338 кВт при варианте II, 593 кВт при варианте I). При этом предполагается, что избыточную энерговооруженность варианта I беспилотной машины не удастся использовать для увеличения средней скорости, так как по условиям тягового расчета требуемая максимальная мощность $N_{треб} = 169$ кВт. Кроме того при циклических грузоперевозках время движения по маршруту должно быть задано. В диапазоне скоро-

стей движения 0-25 км/ч БКМ варианта II может использовать два своих тяговых электродвигателя в разной степени. На рис. 3 показана синтезированная по методике [7] характеристика эффективности двигателя, выбранного для варианта беспилотной КМ варианта II. Изолиниями обозначены зоны с различным КПД. Видно, что эффективность работы электродвигателя зависит как от частоты вращения ротора, так и от развиваемого крутящего момента. В качестве примера на рис. 3 звездочками обозначены режимы работы электродвигателя при движении КМ со скоростью 10 км/ч при коэффициенте сопротивления 0,1 при обеспечении тяги только моментным приводом или только быстроходным приводом. Видно, что в первом случае КПД электромашины более 0,92, а во втором – менее 0,85. Из этого следует, что при наличии двух электромашин в совокупности с редукторами, имеющими различные передаточные отношения, для повышения энергоэффективности движения необходимо перераспределять тягу между ними таким образом, чтобы суммарные потери энергии были минимальны.

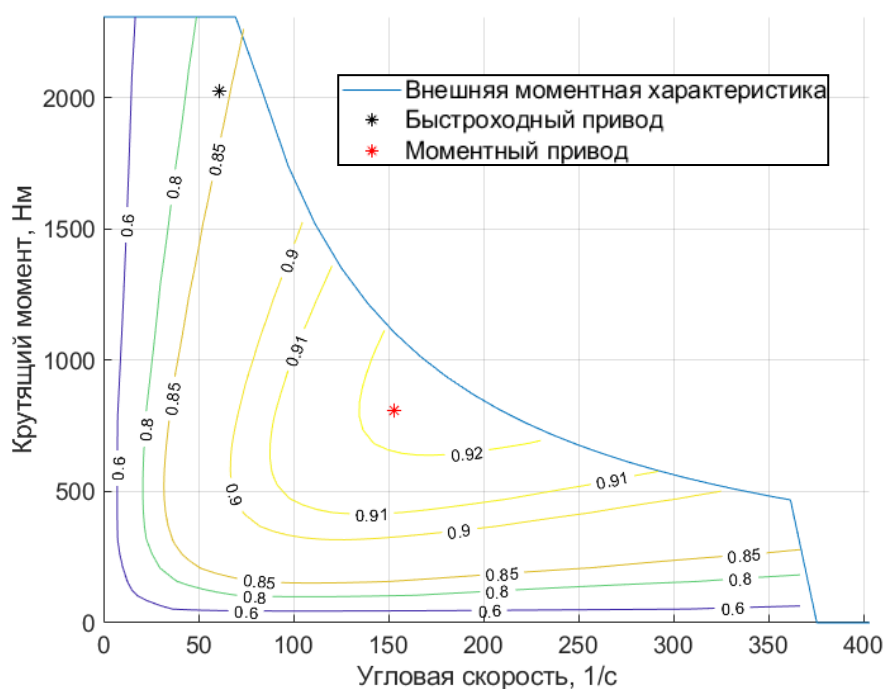


Рис. 3. Моментная скоростная характеристика электродвигателя с обозначением областей КПД

Fig. 3. Torque speed characteristic of an electric motor with designation of efficiency areas

Пример технологического маршрута машины

В целях проверки работоспособности предлагаемого метода определения закона оптимального управления тяговыми электродвигателями БКМ необходимо задаться типичным для циклических грузоперевозок маршрутом движения. В настоящем исследовании предложен маршрут, имеющий особенности, характерные для реальной эксплуатации БКМ – повороты, подъемы, спуски и ограничения скорости на участках (рис. 4). Подразумевается, что маршрут соответствует работе беспилотной КМ в изолированном технологическом пространстве (автоматизированный производственный цех или грузовой терминал) и не предполагает случайных и неожиданных препятствий.

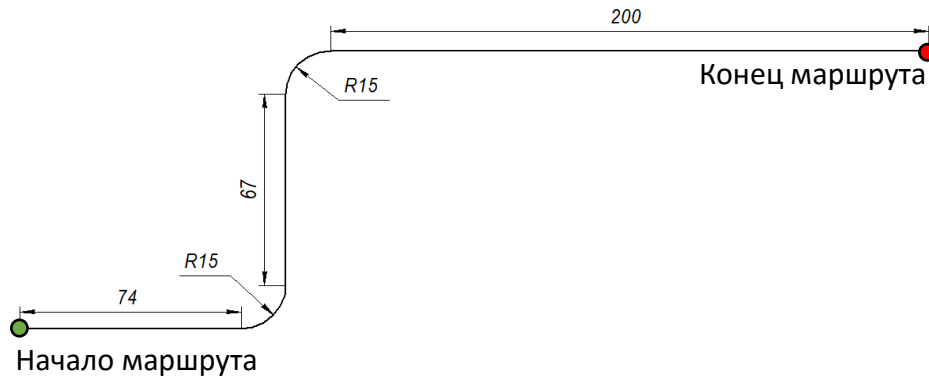


Рис. 4. Схема типового маршрута движения беспилотной колесной машины

Fig. 4. Scheme of a typical route for an unmanned wheeled vehicle

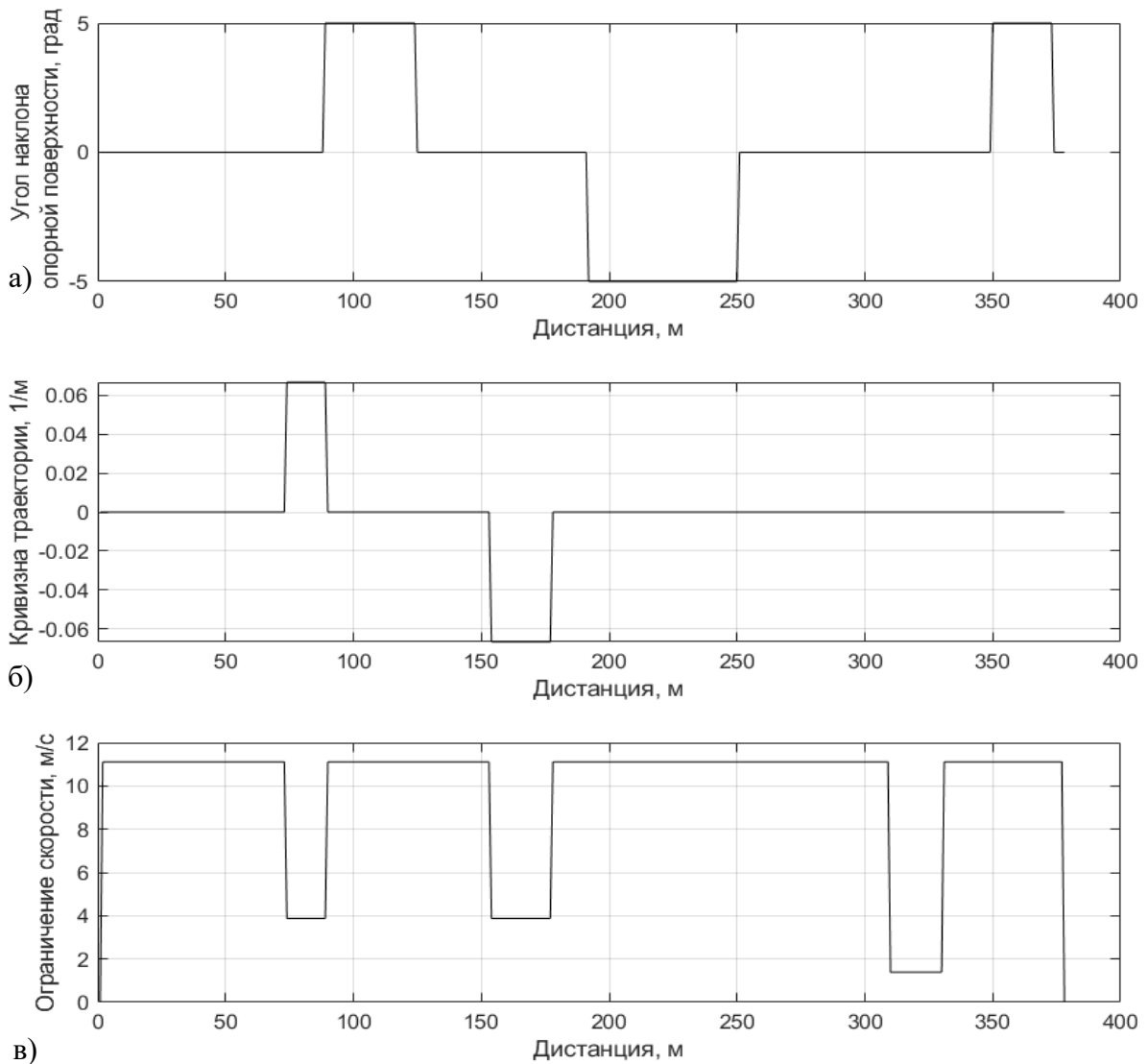


Рис. 5. Зависимость условия движения от пройденной дистанции для типового маршрута беспилотной колесной машины:

а) угол наклона опорной поверхности; б) кривизна траектории; в) ограничение максимальной скорости)

Fig. 5. Dependence of movement conditions on the distance traveled for a typical route of an unmanned wheeled vehicle:

a) angle of inclination of the supporting surface; b) trajectory curvature; c) maximum speed limit

Общая длина такого маршрута составляет 378 м. Для работы с алгоритмом оптимизации его предлагается разбить на участки длиной 1 м. Имеющиеся повороты, подъемы, спуски и ограничения максимальной скорости отражены на рис. 5. Первые два участка ограничения максимальной скорости заданы, исходя из условия безопасного прохождения поворотов, а третий имитирует прохождение технологического участка, где требуется снизить скорость. При циклических грузоперевозках движение маршруту осуществляется в двух направлениях: в прямом направлении БКМ движется с полной массой, а обратно – со снаряженной массой (т.е. без груза). Для обоих вариантов БКМ было предусмотрено несколько режимов движения – от медленного (прохождение маршрута в одну сторону за 300 с) до быстрого (за 100 с). Прохождение данной трассы существенно быстрее, чем за 100 с затруднительно в связи с требованиями безопасности прохождения поворотов. Прохождение маршрута медленнее, чем за 300 с позволяет беспилотной машине двигаться с неизменной скоростью и не представляет существенного интереса для оптимизации.

Определение скорости БКМ на маршруте

При определении оптимального закона изменения скорости БКМ на маршруте оптимизация проводилась для 200 поколений, по 100 представителей в каждом (параметры выбраны на основе исследования [1]). Максимальное ограничение на ускорение и на замедление было установлено 1 м/с^2 . Коэффициент сопротивления прямолинейному движению назначен $f_{\text{тр}} = 0,02$. На рис. 6 показаны значения целевой функции для лучшего и худшего представителя каждого поколения. Для примера рассмотрен процесс определения закона оптимального управления в случае быстрого (100 с) движения по маршруту беспилотной КМ варианта I в прямом направлении (с полной загрузкой).

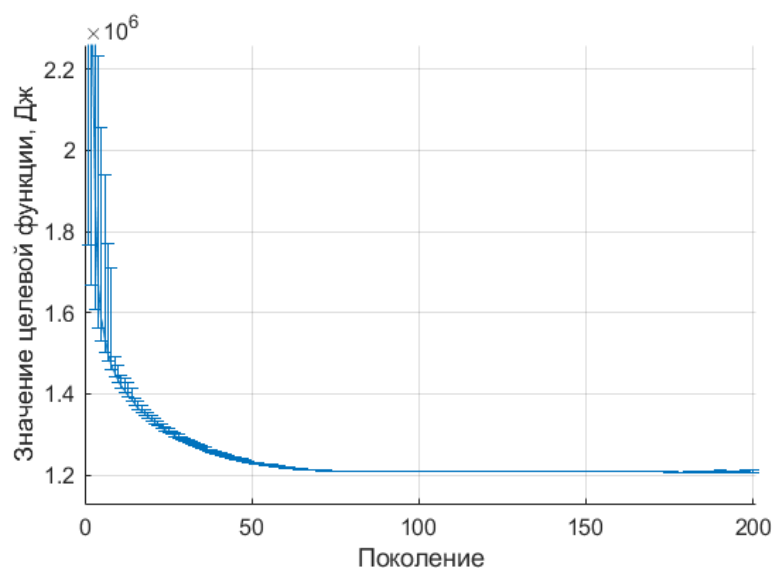


Рис. 6. Наибольшее (худшее), среднее и наименьшее (лучшее) значение целевой функции для каждого поколения при оптимизации прохождения по маршруту машины с одним тяговым двигателем (верхняя часть графика не показана)

Fig. 6. The largest (worst), average and smallest (best) value of the objective function for each generation when optimizing the route of a vehicle with one traction motor (the upper part of the graph is not shown)

Первое поколение было получено с помощью специальной функции создания и, несмотря на то, что его представители укладываются в заданные ограничения по времени движения и предельным ускорениям, движение здесь не является оптимальным по затраченной энергии. В данном случае лучший представитель первого поколения имеет значение целевой

функции $3,81 \cdot 10^6$ Дж. Как видно из рис. 7, скорость на участках для этого случая представляет собой несколько измененный и «отмасштабированный» закон ограничения скорости на участках (рис. 5, в).

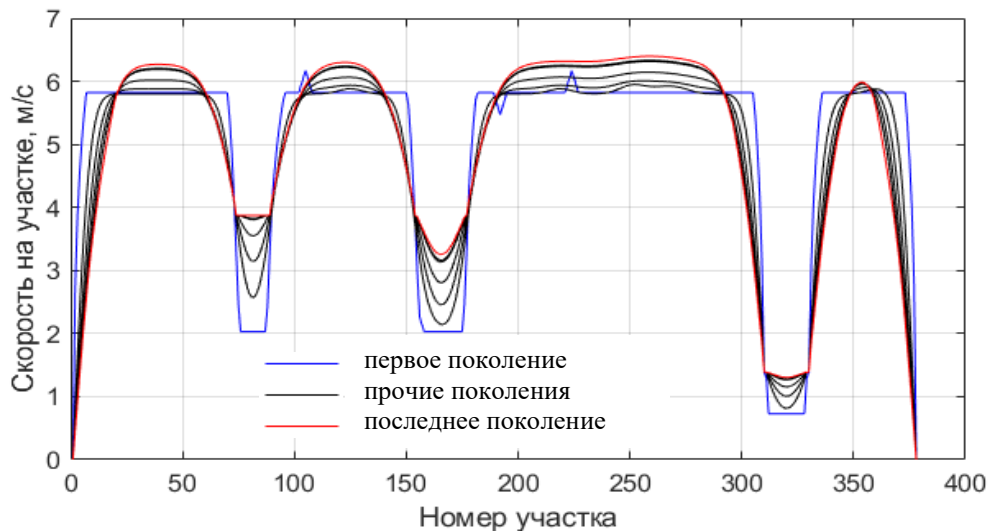


Рис. 7. Лучшие представители каждого десятого поколения при оптимизации прохождения по маршруту машины с одним тяговым двигателем

Fig. 7. The best representatives of every tenth generation when optimizing the route of a vehicle with one traction motor

В процессе оптимизации было получено решение с меньшими потерями энергии в электродвигателе ($1,29 \cdot 10^6$ Дж). Видно, что данное решение отличается меньшими действующими ускорениями и несколько большей максимальной скоростью. На рис. 8 показано, что решение удовлетворяет заданным ограничениям по скорости и ускорению, причем ускорение на некоторых участках достигает предельных значений.

Режим работы тягового электродвигателя беспилотной КМ варианта I при движении по маршруту в прямом направлении можно оценить по рис. 9. Как видно на данном маршруте тяговые возможности двигателя полностью не используются, несмотря на малое заданное время прохождения маршрута.

Разработанная методика выбора закона управления тяговыми электродвигателями была применена для исследования БКМ варианта II в аналогичных условиях движения (заезд в прямом направлении, полная масса КМ, время преодоления маршрута 100 с). Проводилось два отдельных этапа оптимизации: сначала определялась скорость на участках V_k (при этом коэффициент h_k для каждого участка принимался 0,5), затем определялись значения h_k (использовались скорости на участках V_k , полученные на первом этапе). При определении h_k число поколений было выбрано 1000, число особей – 200 (рис. 10).

Программное обеспечение, разработанное для данных исследований, позволяет произвести одновременную (в один этап) оптимизацию по скорости V_k и по коэффициенту h_k . В табл. 2 приведены результаты вычислений для случая одновременного варьирования V_k и h_k на участках в сравнении с раздельным варьированием. Как можно заметить, даже длительные расчеты при совместном варьировании параметров не гарантируют получение лучшего результата. Это связано с малой чувствительности целевой функции к изменению параметров h_k по сравнению с V_k и ограниченным количеством циклов оптимизации.

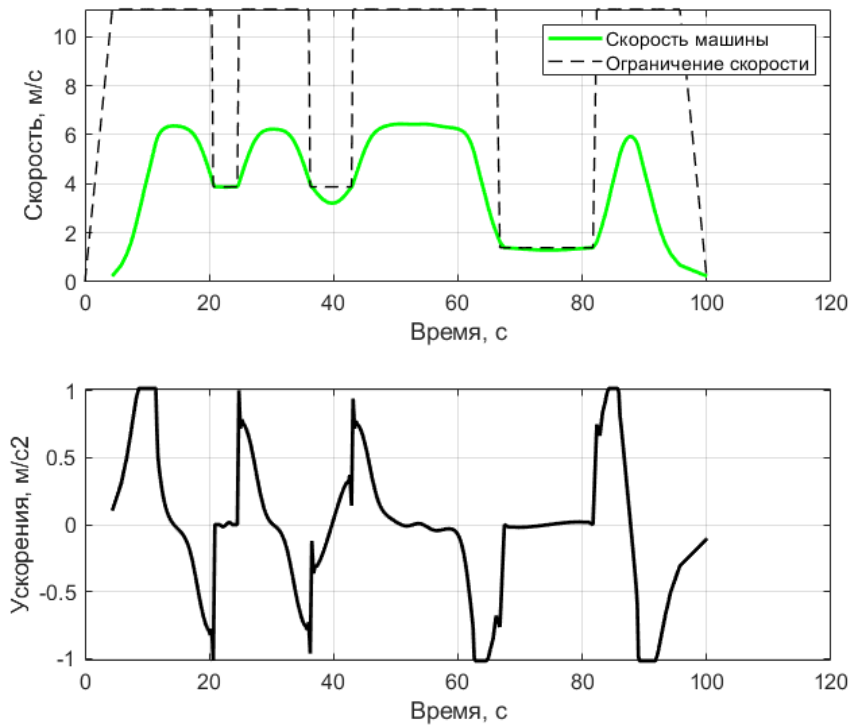


Рис. 8. Ускорения и скорости, реализуемые при движении беспилотной колесной машины по маршруту

Fig. 8. Accelerations and speeds realized when an unmanned wheeled vehicle moves along a route

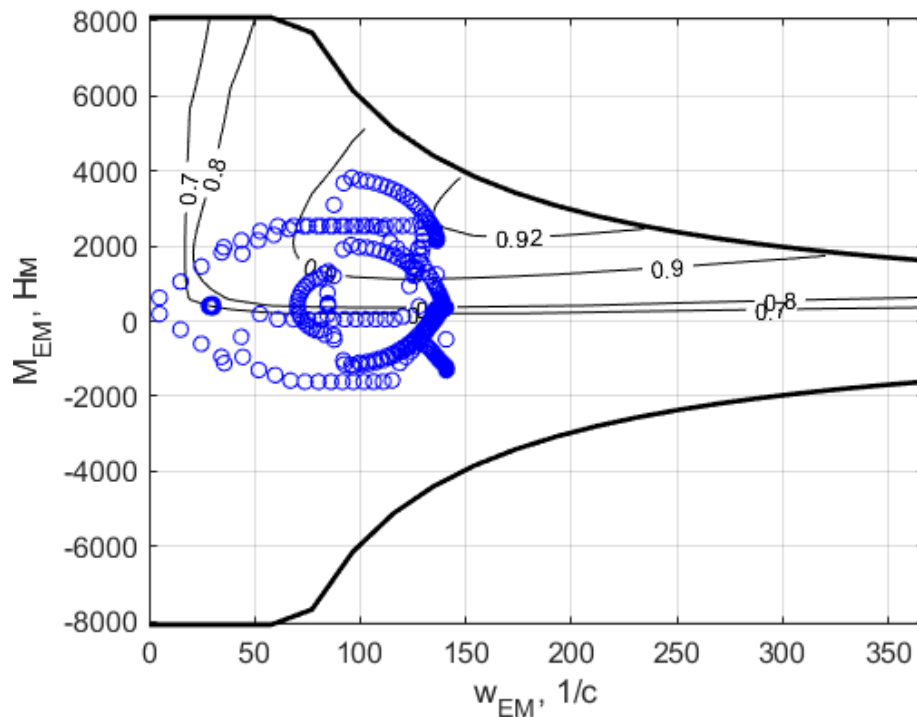


Рис. 9. Внешняя скоростная характеристика тягового электродвигателя и его режимы использования при движении по трассе колесной машины варианта I

Fig. 9. External speed characteristics of the traction electric motor and its operating modes when a wheeled vehicle driving on the track, option I

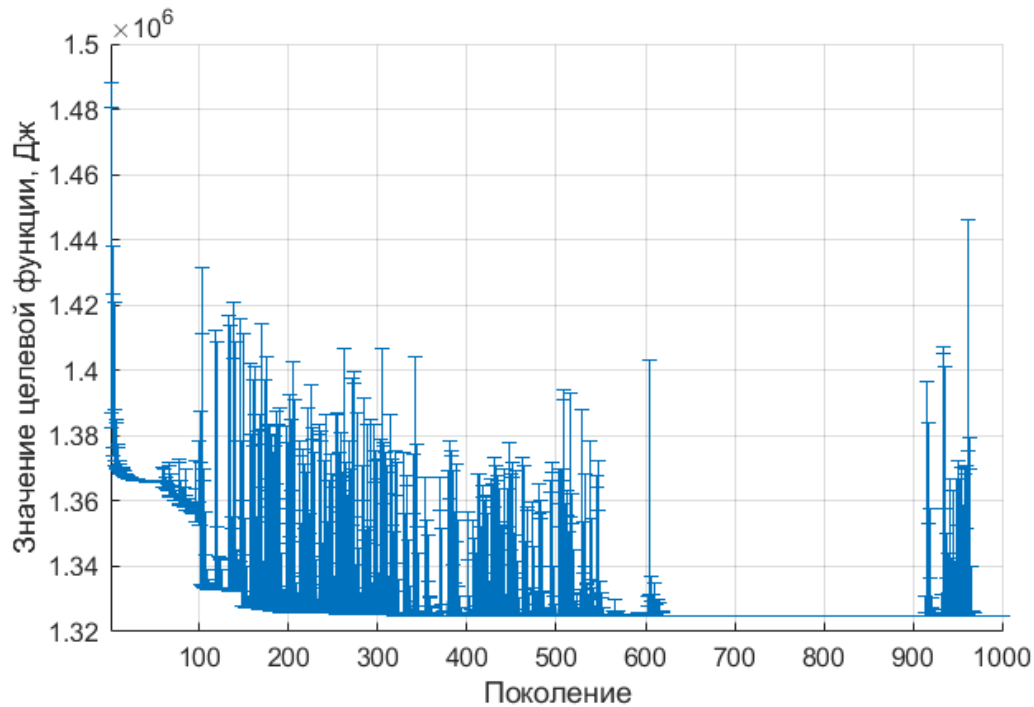


Рис. 10. Наибольшее (худшее), среднее и наименьшее (лучшее) значение целевой функции для каждого поколения при оптимизации по коэффициенту h_k при движении по маршруту машины с двумя тяговыми электродвигателями (КМ варианта II)

Fig. 10. The largest (worst), average and smallest (best) value of the objective function for each generation when optimized by the coefficient h_k when driving along the route of a vehicle with two traction electric motors (wheeled vehicle option II)

Таблица 2.

Затраты энергии на движение и энергия потерь в тяговых электродвигателях. Результаты оптимизации при раздельном и совместном варьировании параметров скорости на участках и степеней использования двигателей на участке

Table 2.

Energy consumption for movement and energy losses in traction motors. Optimization results with separate and joint variation of speed parameters in sections and degrees of engine use in sections

Тип расчета	Затраты энергии на движение, Дж / Потери энергии ТЭД, Дж
Раздельное варьирование 200 поколений, 100 особей, затем 1000 поколений, 100 особей	4965622 / 1331346
Совместное варьирование 200 поколений, 100 особей	5036834 / 1406883
Совместное варьирование 500 поколений, 100 особей	5010865 / 1380139
Совместное варьирование 1000 поколений, 100 особей	5017059 / 1385482

Таким образом, в данном исследовании использовать одновременное варьирование параметров V_k и h_k нецелесообразно. На рис. 11 представлены полученные для КМ варианта II скорости на участках. Можно заметить затрудненный набор скорости машиной, особенно на участках 90-120, где на трассе имеется подъем. Причина в том, что тяговые электродвига-

тели в этом заезде значительную часть времени работают на внешней характеристике, тем не менее, заданное время движения по маршруту обеспечено.

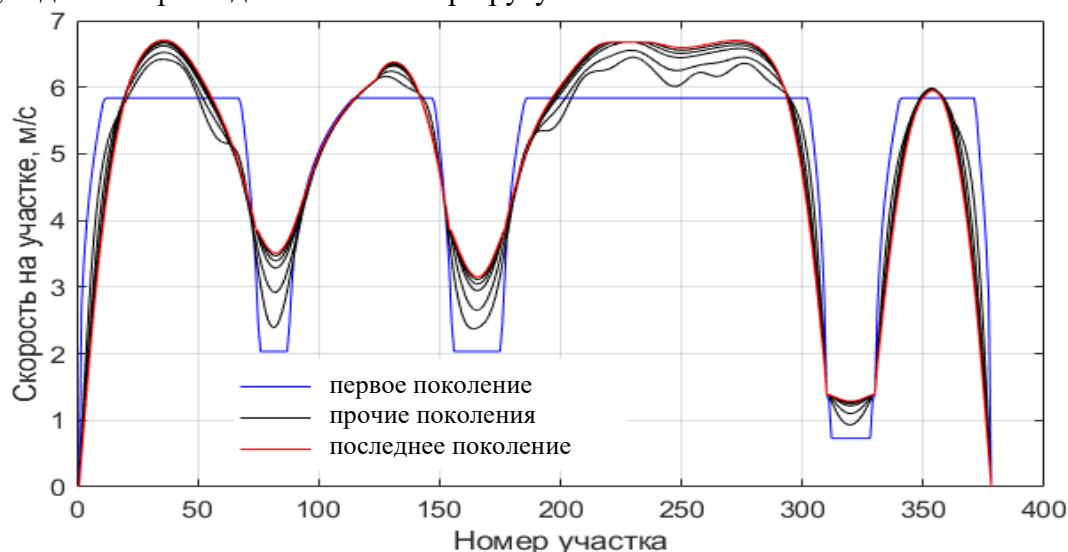


Рис. 11. Лучшие представители каждого десятого поколения при оптимизации прохождения по маршруту машины с двумя тяговыми двигателями (варианта II)

Fig. 11. The best representatives of every tenth generation when optimizing the route of a vehicle with two traction motors (option II)

Оптимизация коэффициента распределения тяги между МП и БП в целом показывает стремление коэффициента h_k к значению 0,85 (т.е. приоритетное использование МП) с ожидаемым увеличением использования БП (уменьшением h_k) при больших скоростях движения (рис. 12).

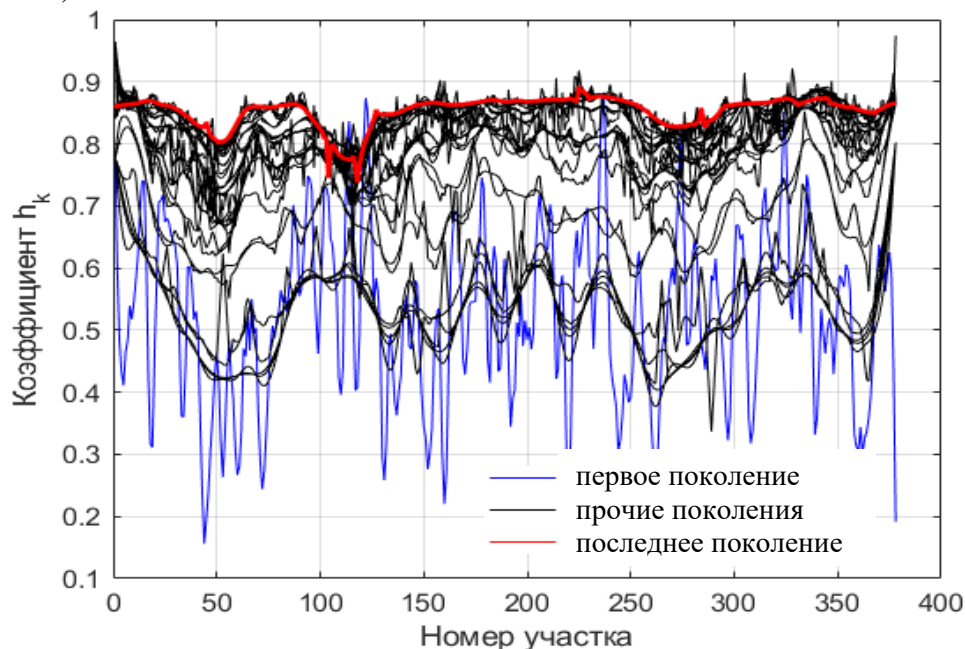


Рис. 12. Лучшие представители каждого десятого поколения оптимизации коэффициента распределения тяги между МП и БП при прохождении по маршруту машины с двумя тяговыми двигателями (варианта II)

Fig. 12. The best representatives of every tenth generation of optimization of the coefficient of traction distribution between the torque drive and the high-speed drive when driving along the route of a machine with two traction motors (variant II)

По рис. 13 можно отметить, что электродвигатели в данном заезде больше работают в зоне с меньшим значением КПД по сравнению с рис. 9.

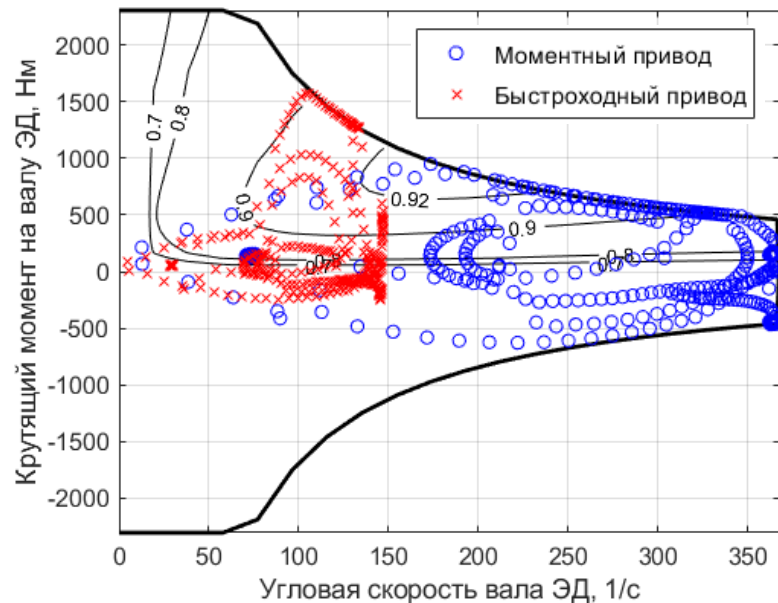


Рис. 13. Внешняя скоростная характеристика тягового электродвигателя и его режимы работы при движении по трассе машины с двумя тяговыми двигателями (варианта II)

Fig. 13. External speed characteristics of the traction electric motor and its operating modes when a wheeled vehicle with two traction motors driving on the track (option II)

В результате первого этапа (оптимизация скорости на маршруте) получено, что суммарные потери в электродвигателях составили $1,39 \cdot 10^6$ Дж. После второго этапа оптимизации (коэффициента распределения тяги между МП и БП) $1,32 \cdot 10^6$ Дж. Потери в данном случае были несколько больше, чем в случае беспилотной машины варианта I ($1,29 \cdot 10^6$ Дж). Это связано с высокой загруженностью тяговых электродвигателей и, соответственно, с необходимостью их эксплуатации в неэффективном режиме для обеспечения заданной средней скорости. Однако необходимо учитывать преимущество машины варианта II, которое состоит в использовании электродвигателей меньшего размера и массы. В случае увеличения требуемого времени прохождения маршрута появляется возможность повышения энергоэффективности движения КМ за счет оптимизации коэффициента h_k , а также благодаря использованию электродвигателей меньшей мощности. В табл. 3 представлены обобщенные результаты определения законов оптимального управления для обоих вариантов БКМ и разного времени прохождения маршрута в прямом направлении.

Таблица 3.

Энергия потерь в тяговых электродвигателях при движении по маршруту в прямом направлении с полной загрузкой колесной машины

Table 3.

Energy losses in traction motors when moving along a route in the forward direction with a fully loaded wheeled vehicle

Энергия потерь в электромашинах, МДж	Время на маршруте, с				
	100	150	200	250	300
Вариант I	1,29	1,18	1,34	1,55	1,74
Вариант II, оптимизация V_k	1,39	1,14	1,18	1,28	1,39
Вариант II, оптимизация V_k и h_k	1,32	1,05	1,06	1,13	1,23
Преимущество Вар II перед Вар I, %	-2,3	11	20,9	27,1	29,3

Проведено исследование заездов БКМ в обратном направлении без груза (табл. 4).

Таблица 4.
Энергия потерь в тяговых электродвигателях при движении по маршруту в обратном направлении без груза

Table 4.
Energy losses in traction motors when moving along the route in the opposite direction without load

Энергия потерь в электромашинах, МДж	Время на маршруте, с				
	100	150	200	250	300
Вариант I	0,94	0,950	1,08	1,25	1,43
Вариант II, оптимизация V_k	1,11	0,914	0,915	0,981	1,06
Вариант II, оптимизация V_k и h_k	1,08	0,882	0,877	0,934	1,00
Преимущество Вар II перед Вар I, %	-14,9	7,2	18,8	25,3	30,1

Представленные результаты позволяют заключить, что по мере снижения нагрузки на тяговые электромашины (большее время на маршруте – меньше средняя скорость), энергия потерь БКМ с двумя электродвигателями (вариант II) становятся меньше, чем у БКМ с одним электродвигателем (вариант I). Также при снижении скорости растет эффект от дополнительной оптимизации по коэффициенту h_k , определяющему вклад крутящего момента электродвигателей быстроходного и моментного привода. При этом в обоих вариантах БКМ по мере роста времени на маршруте общие потери в электродвигателях вначале падают, а затем начинают повышаться. Это связано с тем, что принятая характеристика эффективности электродвигателей обладает наибольшим значением КПД в районе центра характеристики (в номинальном режиме работы).

В ходе исследования движения КМ по выбранному маршруту также установлено:

- по потерям энергии КМ варианта II (с двумя ТЭД) имеет преимущество в тех случаях, когда не требуется длительная работа тяговых электродвигателей на внешней характеристике и есть возможность «управлять» их тягой, т.е. при длительном/среднем заданном времени прохождения маршрута (до 25-30 % при сравнении вариантов I и II с учетом оптимизации по h_k);
- в случае высокой загруженности электродвигателей, при малом заданном времени на маршруте, более эффективной является КМ варианта I (от 2 до 15 % при сравнении вариантов I и II с учетом оптимизации по h_k);
- во всех проведенных заездах наблюдается заметный эффект от применения оптимизации по степени загрузки электродвигателей моментного и быстроходного привода (от 3 до 12 % при сравнении варианта II без оптимизации по h_k и варианта II с оптимизацией по h_k), что подтверждает эффективность разработанного метода.

Заключение

В работе использовался разработанный авторами ранее метод определения оптимального закона движения беспилотной колесной машины (БКМ) по заданному маршруту, основанный на применении генетического алгоритма. Применение в составе трансмиссии двух ТЭД в совокупности с редукторами, имеющими разное передаточное отношение (БКМ вариант II), позволяет использовать электродвигатели со значительно меньшей суммарной мощностью (до 43 %), чем в случае попытки обеспечить диапазон трансмиссии машины одним электродвигателем (БКМ вариант I). Это позволяет обеспечить меньшие массу, габаритные размеры и стоимость электропривода БКМ варианта II. При этом для повышения энергоэф-

фактивности следует использовать получаемый при помощи разработанного метода закон управления моментным и быстроходным приводом, т.е. оптимизировать не только скорость движения на маршруте, но и коэффициент распределения тяги между двигателями h_k . Наилучшие результаты (т.е. наименьшие потери энергии) удастся получить в тех случаях, когда не требуется длительная работа тяговых электродвигателей на внешней характеристике и есть возможность «управлять» их тягой.

Библиографический список

1. **Назаренко, С.В.** Метод определения закона энергоэффективного движения беспилотной колесной машины при циклических грузоперевозках / С.В. Назаренко, Б.В. Косицын, Б.В. Падалкин, А.А. Стадучин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2023. № 3. С. 116-130.
2. **Hellström, T.** Path planning for off-road vehicles with a simulator-in-the-loop. Electronic resource URL: 2023. https://www.researchgate.net/publication/268426994_Path_planning_for_off-road_vehicles_with_a_simulator-in-the-loop (дата обращения: 06.06.2023).
3. **Chang, C.S., Sim, S.S.** Optimising train movements through coast control using genetic algorithms// IEE Proceedings-Electric Power Applications. 1997. №144. P. 65-73.
4. An optimal automatic train operation (ATO) control using genetic algorithms (GA) / Seong Ho [et al.] // Proceedings of IEEE. IEEE Region 10 Conference. 160 TENCON 99 «Multimedia Technology for Asia-Pacific Information Infrastructure» (Cat. No.99CH37030). 1999. №1. P. 360-362.
5. **Dzupire N.** A Multi-Stage Supply Chain Network Optimization Using Genetic Algorithms / N. Ch. Dzupire, Y. Nkansah-Gyekye // Mathematical Theory and Modeling. 2014. Vol. 4, № 8.
6. **Kuo, R.J.** A hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimisation for solving bi-level linear programming problem – A case study on supply chain model / R.J. Kuo, Y.S. Han, //Applied Mathematical Modelling, 35(8), 2011. Pp. 3905-3917.
7. **Падалкин, Б.В.** Метод оценки эффективности применения электромеханических трансмиссий транспортных средств на этапе проектирования / Б.В. Падалкин, В.В. Иваненков, Б.Б. Косицын, А.А. Стадучин, К.С. Балковский // Известия МГТУ «МАМИ». 2020. Вып. № 2 (44). С. 58-67.
8. **Карташов, А.Б.** Метод определения энергоэффективного закона движения карьерного автосамосвала / А.Б. Карташов, Б.Б. Косицын, Г.О. Котиев, Д.М. Дубинкин, С.В. Назаренко // Горное оборудование и электромеханика, 2020. № 3 (148). С. 11-24. DOI: 10.26730/1816-4528-2020-3-11-24
9. **Косицын, Б.Б.** Научные методы повышения подвижности боевых колесных машин путем совершенствования тормозных свойств: Дисс. ... докт. техн. наук. – М.: МГТУ, 2021. – 280 с.

*Дата поступления
в редакцию: 19.07.2023*

*Дата принятия
к публикации: 10.10.2023*

УДК 629.002.5

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_111

МЕТОД ОЦЕНКИ УРОВНЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН НА ОСНОВАНИИ АНАЛИЗА ВРЕМЕНИ ПРОСТОЕВ В РЕМОНТАХ

С.В. Репин

ORCID: 0000-0002-4224-5554 e-mail: repinserge@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
Санкт-Петербург, Россия**А.В. Зазыкин**

ORCID: 0000-0002-6096-9011 e-mail: a.v.zazykin@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
Санкт-Петербург, Россия**Н.А. Масленников**

ORCID: 0000-0001-8123-9918 e-mail: masl-nikita@yandex.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
Санкт-Петербург, Россия

Обоснована необходимость разработки методик, позволяющих рассчитать время пребывания *транспортно-технологической машины* (ТТМ) в работоспособном состоянии по имеющейся у предприятий эксплуатационной информации; выявлена зависимость эффективности применения строительных ТТМ от уровня работоспособности. Предложен метод оценки уровня работоспособности строительных ТТМ, включающий: анализ снижения годовой наработки машин вследствие проведения неплановых ремонтов, количество которых увеличивается с возрастом машины; корректировку количества годовых плановых мероприятий *технических обслуживаний и ремонтов* (ТОиР) вследствие сокращения годовой наработки; расчет показателей надежности на основании информации по простоям в ремонтах.

Метод реализуется в общедоступной математической среде *MS Excel*, прост в использовании и может применяться на предприятиях по эксплуатации строительных транспортно-технологических машин.

Ключевые слова: строительные транспортно-технологические машины, работоспособность, надежность, ремонт, эксплуатация.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Репин, С.В. Метод оценки уровня работоспособности строительных транспортно-технологических машин на основании анализа времени простоев в ремонтах / С.В. Репин, А.В. Зазыкин, Н.А. Масленников // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 111-120.
DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_111

METHOD FOR ASSESSING THE LEVEL OF PERFORMANCE OF TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL CONSTRUCTION MACHINES BASED ON ANALYSIS OF DOWNTIME IN REPAIRS

S.V. Repin

ORCID: 0000-0002-4224-5554 e-mail: repinserge@mail.ru

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
St. Petersburg, Russia

A.V. Zazykin

ORCID: 0000-0002-6096-9011 e-mail: a.v.zazykin@mail.ru
St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
St. Petersburg, Russia

N.A. Maslennikov

ORCID: 0000-0001-8123-9918 e-mail: masl-nikita@yandex.ru
St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
St. Petersburg, Russia

Abstract. The article shows that the effectiveness of the use of transport-technological construction machines is determined by the level of equipment performance. Despite the large amount of research in this area, there are no methods that allow calculating the time the transport-technological machine remains in working condition according to the operational information available to enterprises. The article also proposes a method for assessing the level of performance of transport-technological construction machines, including: analysis of the decrease in the annual operating time of machines due to unscheduled repairs, the number of which increases with the age of the machine; adjustment of the number of annual scheduled maintenance and repair activities due to a reduction in annual operating time; calculation of reliability indicators based on information on downtime in repairs.

The method is implemented in *MS Excel*, is easy to use and can be used at enterprises operating transport-technological construction machines.

Key words: transport and technological construction machines, performance, reliability, repair, operation.

FOR CITATION: S.V. Repin, A.V. Zazykin, N.A. Maslennikov. Method for assessing the level of performance of transport and technological construction machines based on analysis of downtime in repairs. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 111-120. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_111

Введение

Эффективность применения машин определяется уровнем их работоспособности. Согласно ГОСТ 27.002-2015, работоспособность может быть определена как «состояние объекта, в котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям, установленным в документации на этот объект» [1]. Работоспособность любого технического объекта обеспечивается средствами эксплуатации, а именно – проведением *технических обслуживаний и ремонтов* (ТОиР) [2]. Соответствующая нормативная документация предусматривает плановое проведение мероприятий, позволяет рассчитать соответствующее время пребывания и, следовательно, продолжительность нахождения машины в работоспособном состоянии, т.е. рассчитать фонд рабочего времени машины для планирования ее использования. Однако работоспособность машин может быть в любой момент времени потеряна вследствие внезапного отказа [1, 2], и для восстановления требуется проведение непланового ремонта (НР). При этом чем больше срок эксплуатации, тем больше времени машина простаивает в НР. Существующие исследования в области надежности техники выявили основные закономерности изменения уровня работоспособности машин в функции возраста [3-16], но отсутствуют методики, позволяющие рассчитать время пребывания машины в работоспособном состоянии по имеющейся у предприятий эксплуатационной информации.

Представленный в настоящей статье метод позволяет решить данную задачу.

Методика

В качестве основных режимов проведения мероприятий ТОиР рассматриваются: периодичность проведения плановых обслуживаний и ремонтов и неплановых ремонтов, обозначаемых как наработка на отказ на i -тое мероприятие $T_{от_i}$; время восстановления работоспособности в i -том мероприятии $T_{в_i}$. В качестве базовых показателей надежности рассмат-

риваются: интенсивности отказов и восстановлений в мероприятиях ТОиР; вероятность пребывания машины в работоспособном состоянии; коэффициенты технического использования и готовности. Уровень работоспособности оценивается вероятностью нахождения машины в работоспособном состоянии в зависимости от ее возраста. Согласно действующему нормативному документу [17], предусматриваются следующие плановые мероприятия ТОиР: технические обслуживания ТО-1, ТО-2 и ТО-3; сезонное обслуживание СО; ремонты текущий (Т) и капитальный (К). В то же время период простоев в НР «возрастных» машин может превышать соответствующий для плановых ремонтных работ, поэтому простои в НР существенно влияют на уровень работоспособности.

Методика предусматривает: анализ снижения годовой наработки машин вследствие проведения НР, количество которых увеличивается с возрастом машины; корректировку количества годовых плановых мероприятий ТОиР вследствие сокращения годовой наработки; расчет показателей надежности на основании информации по простоям в ремонтах.

Методика сбора и обработки данных эксплуатации транспортно-технологических машин

Исследование снижения наработки ТТМ было проведено на примере десяти экскаваторов в зависимости от их возраста (рис. 1 и 2). В ячейках С5...М5 (рис. 1) приведена наработка нового экскаватора, которая представляет собой годовой фонд рабочего времени машины, рассчитываемый согласно МДС 12-13.2003 [18].

№	А	В	С	Д	Е	F	G	Н	И	J	K	L	M	N	О	Р
		Срок службы, год	Суммарная наработка за срок службы, час	Наработка за 1 в год, час	Наработка за 2 в год, час	Наработка за 3 в год, час	Наработка за 4 в год, час	Наработка за 5 в год, час	Наработка за 6 в год, час	Наработка за 7 в год, час	Наработка за 8 в год, час	Наработка за 9 в год, час	Наработка за 10 в год, час	Средний разброс значений, час	Средний разброс значений, %	Средняя в год, час
3																
5	2	0	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	0	0	2300
6	3	2	3630	1935	1904	2025	2012	1985	1913	1833	1875	2145	1743	79	4	1937
7	4	4	6537	1563	1710	1833	1812	1833	1904	1634	1756	1873	1523	131	8	1744
8	5	6	8950	1243	1350	1595	1632	1712	1854	1575	1612	1702	1310	202	13	1559
10	7	11	12650	818	920	1245	1046	1318	1448	1349	1350	1151	1056	198	17	1170

Рис. 1. Результаты анализа снижения годовой наработки десяти гидравлических экскаваторов второй размерной группы на строительных предприятиях г. Санкт-Петербурга

Fig. 1. Results of the analysis of the reduction in annual operating time of ten hydraulic excavators of the second size group at construction enterprises in St. Petersburg

Снижение наработки обусловлено простоями в НР и подчиняется экспоненциальному закону (рис. 2). Разность между наработкой нового экскаватора и средней наработкой для текущего возраста принимается на простои в НР. Количество плановых мероприятий ТОиР, проводимых через интервалы наработки, рекомендуемые МДС 12.8-2007 [17], будет сокращаться с возрастом машины. Согласно исследованиям [19], продолжительность пребывания машины в НР увеличивается с ее возрастом t согласно формуле:

$$T_{НР}(t) = T(0) \cdot [1 - \exp(-\beta \cdot t)], \tag{1}$$

где $T(0)$ – годовой фонд рабочего времени машины, час (или – годовая наработка машины в случае отсутствия внезапных отказов, соответствующая машине с нулевым возрастом; это допущение, принятое для описания предлагаемого метода расчета уровня работоспособности); β – показатель старения машины по наработке, год⁻¹ (согласно расчету на рис. 2, $\beta =$

0,089). Выражение $\exp(-\beta \cdot t)$ представляет собой коэффициент готовности в функции возраста машины [19].

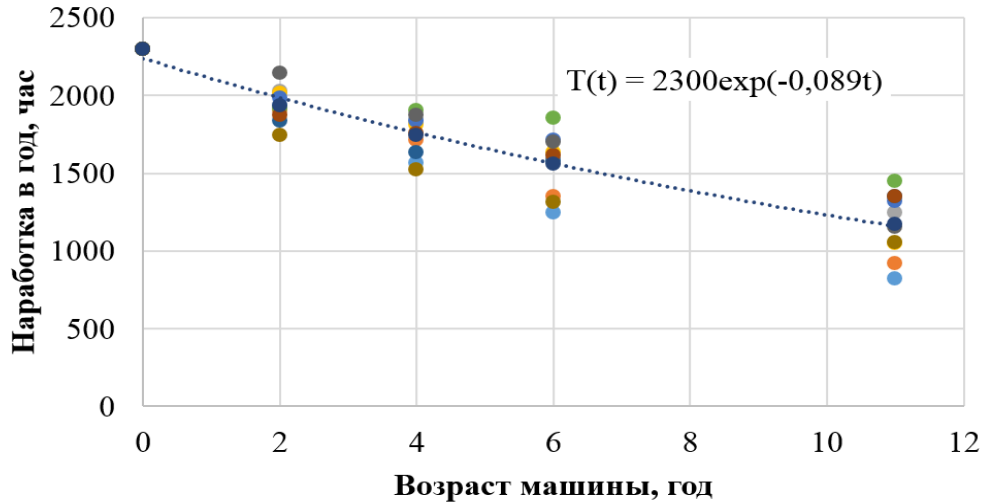


Рис. 2. Закон изменения годовой наработки гидравлических экскаваторов второй размерной группы в зависимости от возраста
Fig. 2. The law of change in the annual operating time of hydraulic excavators of the second size group depending on age

	A	C	D	E	F	G	H	I	J	L
2	Годовой фонд рабочего времени, ч	2300	Расчетное время простоев в плановых ТОиР, ч		170	Общий годовой фонд рабочего времени, ч			2470	
3	Время пребывания в работоспособном состоянии, ч	2105	Год эксплуатации		1	Коэффициент старения, год ⁻¹			0,089	
4			Периодичность выполнения	Интенсивность отказов, ч ⁻¹	Трудоемкость выполнения одного ТОиР, ч	Продолжительность выполнения	Интенсивность восстановлений, ч ⁻¹	Количество в год, ч	Простои в год, ч	Простои в год, % от общего времени простоев
6	Вид машин	Вид ТОиР	ТОиР, ч	ч ⁻¹	ТОиР, ч	ч	ч ⁻¹	ч	ч	ч
7	Экскаваторы одноковшовые с гидравлическим приводом: на базе пневмоколесного трактора, 2-й размерной группы, с ковшом вместимостью 0,25—0,4 м ³	ТО-1	50	0,02	3	1,5	0,67	38	57	15,54
8		ТО-2	250	0,004	6	3	0,33	4	13	3,55
9		СО	1000	0,001	20	8	0,13	2	16	4,39
10		T (в том числе: ТО-3)	1000	0,001	400	40	0,03	2	84	23,08
11		К	6000	0,00017	570	80	0,01	0	0	0,00
12		НР	92	0,01093	16	23	0,04	2	195	53,45
13						ИТОГО		48	365	100,00

Рис. 3. Расчет в Excel продолжительностей простоев в мероприятиях ТОиР на первом году эксплуатации (ячейка F1)
Fig. 3. Calculation of downtime durations in maintenance and repair activities in the first year of operation in Excel (cell F1)

Теоретические исследования

Вследствие снижения годовой наработки машин в зависимости от возраста уменьшается количество плановых мероприятий ТОиР, а количество неплановых – растет. Поэтому необходимо произвести корректировку количества ТОиР в год с учетом возраста машин. На рис. 3 представлены результаты расчета в Excel скорректированных продолжительностей простоев в мероприятиях ТОиР с учетом рекомендаций МДС 12.8-2007 [17]. Годовой фонд рабочего времени $T(0)$ машины рассчитывается согласно МДС 12-13.2003 [18] (ячейка С2).

Данные по периодичности и трудоемкости НР получены на основании анализа имеющейся у предприятий эксплуатационной информации [19]. Одним из главных выходных параметров данного расчета является время нахождения машины в состоянии работоспособности в функции ее возраста (ячейка С3), рассчитанное по формуле на рис. 2.

В представленном на рис. 3 расчете к плановым мероприятиям ТОиР (ячейки С7...С11), предусмотренным МДС 12.8-2007 [17], добавлен НР (ячейка С12), расчетные параметры которого показаны в ячейках D12...L12). В ячейке J3 приведен коэффициент старения машины по наработке (показатель экспоненты на рис. 2). Именно от его величины зависит время пребывания в НР. Увеличивая год эксплуатации в ячейке F1, будет уменьшаться количество плановых мероприятий ТОиР и расти число НР. На основании данных по простоям можно рассчитать показатели надежности по годам эксплуатации (рис. 4-7).

№	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
5	Коэффициент технического использования, К _{ти}	Коэффициент готовности, К _г	Коэффициент планируемого применения, К _{пп}	Простои в год Т _{рп} , ч	Показатель	Средняя интенсивность отказов, ч ⁻¹	Средняя интенсивность восстановлений, ч ⁻¹	Наработка на отказ Tot, ч	Время восстановления Т _в , ч	Количество ТОиР в год, N
6										
7				170	Т _{рп}	0,02617	0,03	38	40	46
8				195	Т _{рн}	0,01093	0,04	92	23	2
9										
10										
11										
12										
13	0,85	0,92	0,93							

Рис. 4. Расчет простоев в ремонтах и показателей надежности для первого года эксплуатации: Т_{рп}, Т_{рн} – простои в плановых и неплановых мероприятиях ТОиР соответственно

Fig. 4. Calculation of downtime during repairs and reliability indicators for the first year of operation: T_{rp}, T_{rn} are the downtime during planned and unscheduled maintenance and repair activities, respectively

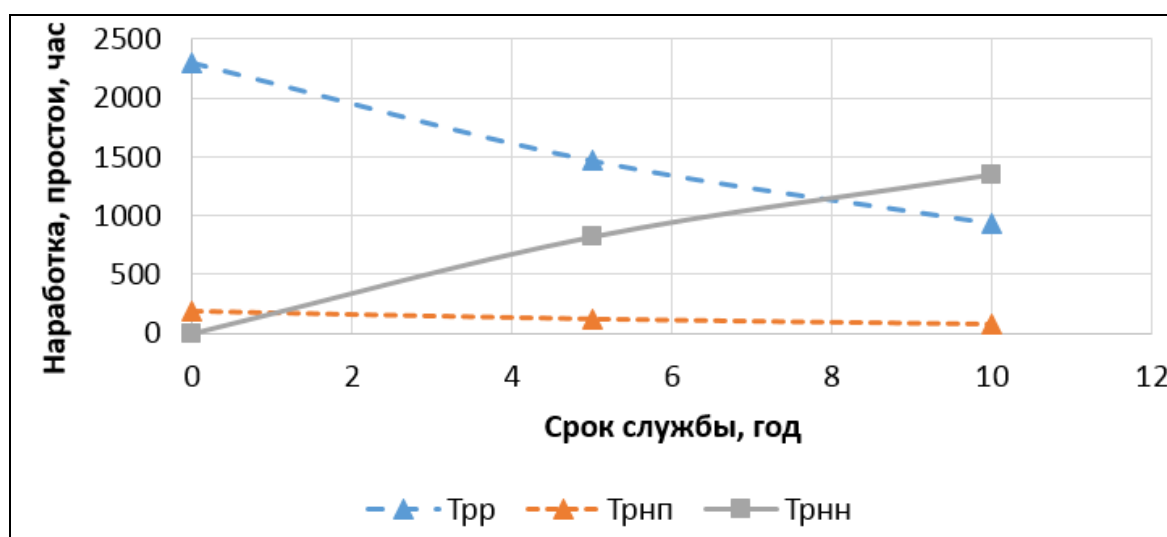


Рис. 5. Результаты расчета наработки Т_{рп} и простоев в ТОиР

Fig. 5. Results of calculating operating time according to standard regulations for work and downtime during maintenance and repairs

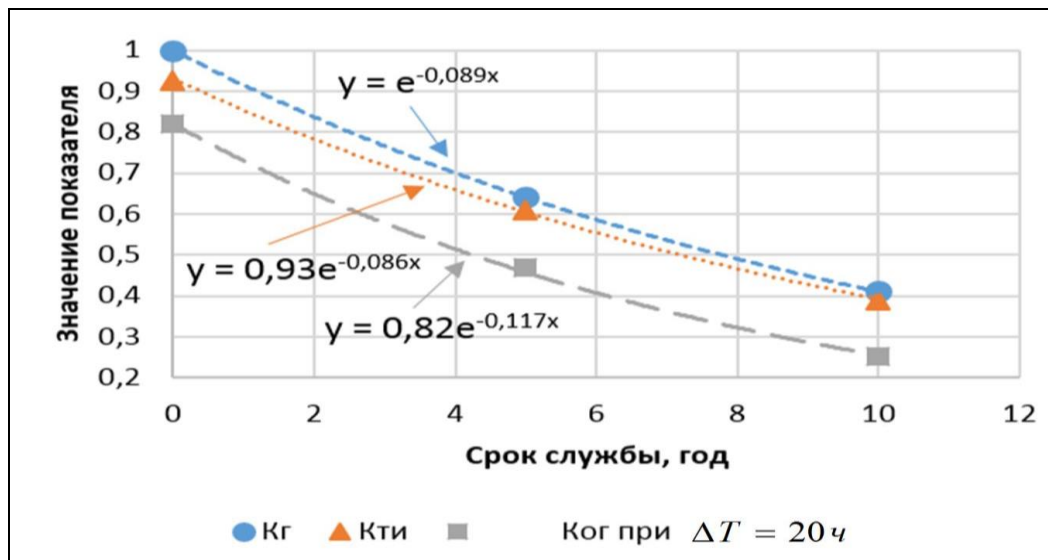


Рис. 6. Результаты расчета комплексных показателей надежности

Fig. 6. Results of calculation of complex reliability indicators

Коэффициент оперативной готовности $K_{ог}$ (рис. 6) рассчитывается по формуле:

$$K_{ог}(t) = K_r(t) \cdot P(t, \Delta T), \quad (2)$$

где $P(t, \Delta T)$ – вероятность безотказной работы машины возраста t в течение непрерывного промежутка времени работы ΔT .

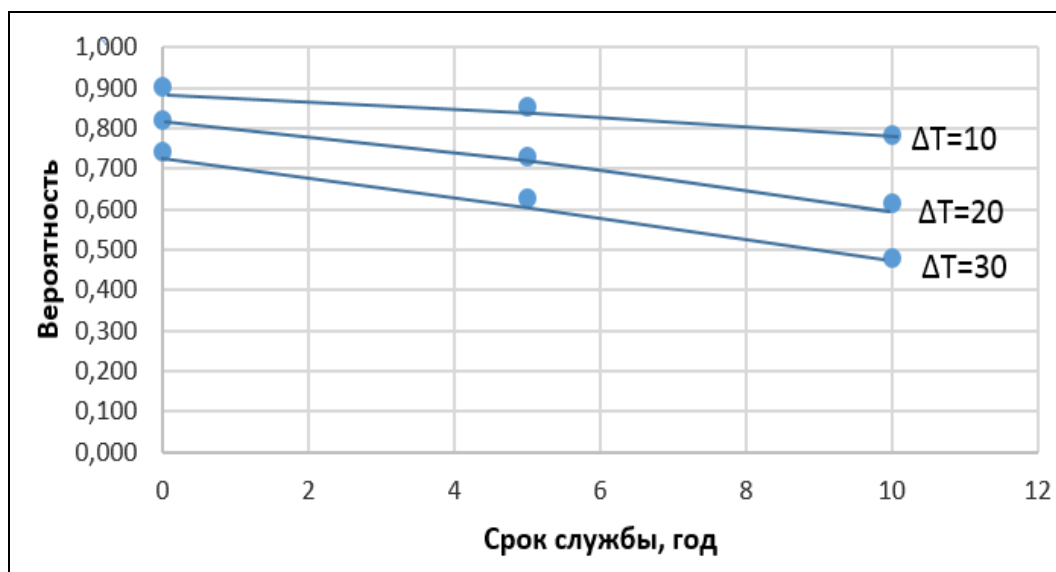


Рис. 7. Результаты расчета вероятности внезапных отказов при различном времени ΔT непрерывной работы на объекте

Fig. 7. Results of calculating the probability of sudden failures at different times ΔT of continuous operation at the facility

Приведенный метод расчета дает возможность получить значение большинства показателей надежности, описывающих техническое состояние машины, но является весьма трудоемким, поскольку требуется расчет по нескольким годам, перенос значений в таблицы, построение графиков и линий тренда. Ниже предлагается более простой вариант расчета вероятности пребывания машины в работоспособном состоянии, основанный на теории массового обслуживания (ТМО).

Рассмотрим диаграмму перехода технических состояний машины [20] (рис. 8). Индексы при S обозначают i -ые состояния: 0 – работоспособное; 1 – находится на ТО-1 (техническое обслуживание № 1); 2 – находится на ТО-2; 3 – находится на СО – сезонное техническое обслуживание; 4 – находится на ТО-3 и текущем ремонте (Т) (проводятся вместе согласно МДС 12.8-2007 [17]); 5 – находится на капитальном ремонте (К); 6 – находится в НР; 7 – находится на списании; 8 – находится в простое по организационным причинам; 9 – находится в очереди на обслуживание. Количество состояний не ограничено, может быть проведена более подробная градация.

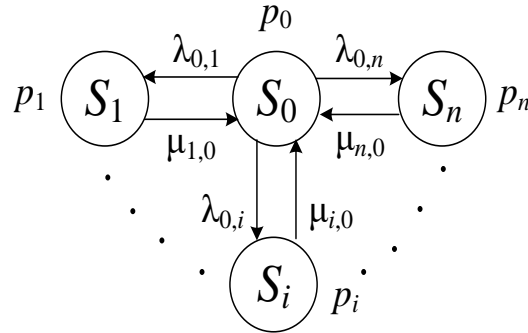


Рис. 8. Диаграмма состояний машины:

S – состояния; λ, μ – интенсивности отказов и восстановлений соответственно; p – вероятности; n – количество рассматриваемых состояний

Fig. 8. Machine state diagram:

S – states; λ, μ – failure and recovery rates, respectively; p – probabilities; n – number of states considered

Интенсивности переходов (отказов и восстановлений) прямо пропорциональны обратным величинам времени пребывания в соответствующем состоянии ($T_{от}$ – наработка на отказ, $T_{в}$ – время восстановления для i -го состояния):

$$\lambda_{0,i} = (T_{от_i})^{-1}; \mu_{i,0} = (T_{в_i})^{-1}, \tag{3}$$

Описанное изменение состояний машины представляет собой марковский случайный процесс с дискретными состояниями системы массового обслуживания (СМО) и непрерывным временем [20]. Для математического описания изменения состояний СМО используют уравнения Колмогорова [20], которые для описываемого случая имеют вид:

$$\begin{cases} p_0 \lambda_{0,1} = p_1 \mu_{1,0}; \\ \dots\dots\dots \\ p_0 \lambda_{0,i} = p_i \mu_{i,0}; \\ \dots\dots\dots \\ p_0 \lambda_{0,n} = p_n \mu_{n,0}; \\ p_0 \cdot p_1 \cdot \dots \cdot p_i \cdot \dots \cdot p_n = 1. \end{cases}$$

Решая систему уравнений, получим:

$$p_0 = \left(1 + \frac{\lambda_{0,1}}{\mu_{1,0}} + \dots + \frac{\lambda_{0,i}}{\mu_{i,0}} + \dots + \frac{\lambda_{0,n}}{\mu_{n,1}} \right)^{-1}; p_i = \frac{\lambda_{0,1}}{\mu_{i,0}} \cdot p_0. \tag{4}$$

Коэффициент готовности K_T определяется как вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается [8] (т.е. в

периоды плановых ТОиР). Поэтому K_T может быть рассчитан как вероятность пребывания машины в состояниях: работоспособном p_0 и в плановых технических обслуживаниях и ремонтах:

$$K_T = p_0 + \sum_1^5 p_i. \quad (5)$$

Коэффициент технического использования $K_{ти}$ рассматривается как отношение математического ожидания суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом за тот же период [8]. Поэтому вероятность состояния нахождения машины в работоспособном состоянии p_0 можно рассматривать как $K_{ти}$.

	A	B	C	D	E	F
15		Расчет вероятностей состояний				
16		Машина работоспособна: $p_0 = 0,78534$				
17						
18						
19	Вид машин	Вид ТОиР	Номера состояний, i	Вероятности состояний		
20	Экскаваторы одноковшовые с гидравлическим приводом: на базе пневмоколесного трактора, 2-й размерной группы, с ковшом вместимостью 0,25—0,4 м ³	ТО-1	1	0,024		
21		ТО-2	2	0,009		
22		СО	3	0,006		
23		Т (в том числе: ТО-3)	4	0,031		
24		К	5	0,010		
25		НР	6	0,181		
26		Вероятность пребывания машины в неработоспособном состоянии		0,262		
27		Коэффициент готовности $K_T = p_0 + p_1 + \dots + p_5$		0,866		
28		Коэффициент технического использования $K_{ти} =$		0,785		

Рис. 9. Расчет показателей надежности по вероятностям состояний машин на первом году эксплуатации

Fig. 9. Calculation of reliability indicators based on the probabilities of machine states in the first year of operation

На рис. 9 представлены результаты расчета в *Excel* показателей надежности по вероятностям состояний машин в процессе эксплуатации на первом году эксплуатации. Количество состояний выбрано равным шести, что отвечает задаче исследования. Рис. 10 содержит графическое изображение решения уравнения (2) для различных сроков эксплуатации. Необходимо отметить, что оба варианта расчета дают одинаковые результаты расчета уровня работоспособности машин, так как рассматривают одни и те же состояния с одинаковыми интенсивностями перехода. В первом варианте для расчета p_0 используется та же формула (4), что и во втором, только не выраженная в явном аналитическом виде.

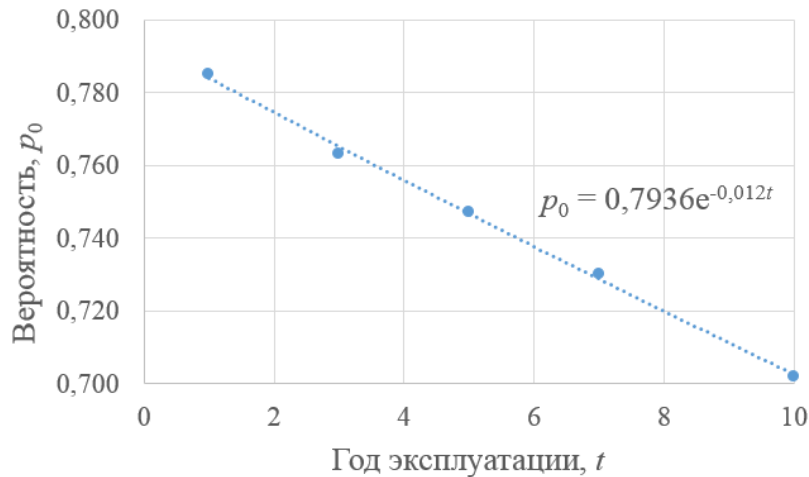


Рис. 10. Результаты расчета вероятности пребывания машины в работоспособном состоянии в зависимости от ее возраста

Fig. 10. Results of calculating the probability of a machine being in working condition depending on its age

Выводы

1. Разработанный метод оценки уровня работоспособности строительных транспортно-технологических машин позволяет рассчитать значение большинства показателей надежности, описывающих техническое состояние машины, в том числе, время нахождения в работоспособном состоянии в зависимости от ее возраста по имеющейся у предприятий эксплуатационной информации.
2. Метод предусматривает: анализ снижения годовой наработки машин вследствие проведения неплановых ремонтов, количество которых увеличивается с возрастом машины; корректировку количества годовых плановых мероприятий ТОиР вследствие сокращения годовой наработки; расчет показателей надежности на основании информации по простоям в ремонтах.
3. Метод реализуется в общедоступной математической среде *MS Excel*, прост в использовании и может применяться на предприятиях по эксплуатации транспортно-технологических машин строительства.
4. Метод может быть применен и для любых других технических объектов с использованием соответствующих нормативных документов по ТОиР.

Статья написана при финансовой поддержке выполнения научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками управлением научной работы СПбГАСУ в 2023 г.

Библиографический список

1. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2016. – 22 с.
2. State Standard of Russia (2009). ГОСТ Р 27.001-2009 Надежность в технике (ССНТ). Система управления надежностью. – М.: Стандартинформ, 2010. – 9 с.
3. **Каракулев, А.В.** Организация технического обслуживания и ремонта машин в условиях Севера А.В. Каракулев, Г.Н. Кирилов. – Л.: Стройиздат, 1978. – 168 с.
4. **Моудрэй Д.** Техническое обслуживание, ориентированное на надежность. Книга RCM II / Д. Моудрэй – СПб: Надежная Книга, 2018. – 448 с.
5. **Jesus R.** Reliability Centered Maintenance / – Reengineered: Practical Optimization of the RCM Process with RCM-R. CRC Press / Jesus R. Sifonte, James V. Reyes-Picknell. 2017. – 349 p.

6. **Чечуев, В.Е.** Методика оптимизации парка машин крупной дорожно-строительной организации. Дисс на соиск уч степ канд техн наук по спец 05.05.04 – СПб: СПбГАСУ. 2022. – 168 с.
7. **Shao-Fei Jiang.** Structural Reliability Assessment by Integrating Sensitivity Analysis and Support Vector Machine / Shao-Fei Jiang, Da-Bao Fu, Si-Yao Wu // *Mathematical Problems in Engineering*. Volume 2014 (2014). Article ID 586191, 6 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/586191>.
8. **Repin, S.** Optimizing the service life of plant machinery and vehicles using information system for management of engineering status / S. Repin, S. Evtjukov, J. Rajczyk // *Architecture and Engineering*. 2016. 1(2). <http://aej.spb-gasu.ru/index.php/AE/article/view/30>.
9. **Repin, S.** Substantiation of the Replacement Interval of Construction Machines by the Target Reliability Level / S. Repin, A. Zazykin, N. Krotova // *Architecture and Engineering*. 2017. V. 2. № 1. Pp. 51-60.
10. **Иорш, В.И.** Управление ремонтами, ориентированное на надежность / В.И. Иорш, И.Э. Крюков, И.Н. Антоненко // *Промышленность и безопасность*. 2011. № 7. С. 50-53.
11. **Ефремов, Л.В.** Проблемы управления надежностью–ориентированной технической эксплуатацией машин / Л.В. Ефремов. – СПб.: Art-Хpress, 2015. – 206 с.
12. **Ицкович, А.А.** Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию / А.А. Ицкович, Н.Н. Смирнов. – М.: Транспорт, 1980. – 232 с.
13. **Малкин, В.С.** Техническая эксплуатация автомобилей: Теоретические и практические аспекты: учебное пособие, В.С. Малкин. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 288 с.
14. **Bujaczek*1, R.** Agricultural machines maintenance and repair services in Western Pomerania / R. Bujaczek*1, K. Sławiński1, A. Grieger // *Technical Sciences*. 2013 № 16 (1). Pp. 13-18.
15. **Антоненко, И.Н.** Об одной надежностной задаче и ее решении в информационной системе / И.Н. Антоненко, М.И. Беляков // *Автоматизация в промышленности*. 2015. № 8. С.18-21.
16. **Matvienko, G.** Modeling and fracture criteria in current problems of strength, survivability and machine safety // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2014. V. 43. Issue 3. Pp. 242-249.
17. МДС 12-8.2007. Рекомендации по организации технического обслуживания и ремонта строительных машин. МДС 12-8.2007 / ЦНИИОМТП. – М.: ФГУП ЦПП, 2007. – 70 с.
18. МДС 12-13.2003. Механизация строительства. Годовые режимы работы строительных машин. МДС 12-13.2003/ ЦНИИОМТП. – М.: ФГУП ЦПП, 2003. – 28 с.
19. **Репин, С.В.** Надежность и эффективность эксплуатации транспортно-технологических машин / С.В. Репин, С.А. Евтюков, А.В. Зазыкин, К.В. Рулис – СПб.: «Петрополис», 2017. – 404 с.
20. **Саати, Т.Л.** Элементы теории массового обслуживания / Т.Л. Саати. – М.: Советское радио. – 1971. – 520 с.

*Дата поступления
в редакцию: 03.08.2023*

*Дата принятия
к публикации: 11.11.2023*

УДК 629.33

DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_121

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК НА МЕХАНИЗМ ПОДЪЕМА И ОПРОКИДЫВАНИЯ КОВША ФРОНТАЛЬНОГО ПОГРУЗЧИКА НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

И.В. ЧичекинORCID: 0000-0001-7632-7657 e-mail: chichekin_iv@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия**Ф.А. Нырк**ORCID: 0000-0003-3431-8116 e-mail: nfa18m127@student.bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия**О.И. Чудаков**ORCID: 0000-0001-8788-7123 e-mail: chudakov@bmstu.ruМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Россия**В.С. Григорьев**ORCID: 0000-0003-3437-9541 e-mail: wsgrig@chuvsu.ruЧувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова
Чебоксары, Россия

Описана математическая модель динамики фронтального погрузчика для получения нагрузок, действующих на механизм подъема и опрокидывания ковша. Разработанная динамическая модель универсальна и позволяет определять нагрузки на все звенья фронтального погрузчика, а также оценивать его эксплуатационные свойства. Приведен список типовых нагрузочных режимов, для определения максимальных нагрузок, которые могут возникнуть при эксплуатации. Представлены примеры результатов расчетов для разных нагрузочных режимов, а также использования полученных нагрузок при проведении прочностных расчетов и топологической оптимизации. Разработка математической модели фронтального погрузчика для определения нагрузок в шарнирах и силовых связях, для последующих прочностных расчетов и анализа долговечности, является актуальной задачей на ранних стадиях проектирования. Математическая модель разработана в системе расчета динамики связанных тел (*Multi Body Dynamics – MBD*).

Ключевые слова: фронтальный погрузчик, динамика связанных тел, виртуальный прототип, прочностной расчет, нагрузки, нагрузочные режимы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чичекин, И.В. Определение нагрузок на механизм подъема и опрокидывания ковша фронтального погрузчика на ранних стадиях проектирования с использованием динамической модели / И.В. Чичекин, Ф.А. Нырк, О.И. Чудаков, В.С. Григорьев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 4. С. 121-130. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_121

DETERMINATION OF LOADS ON LIFTING AND TIPPING MECHANISM OF WHEEL LOADER BUCKET AT THE EARLY STAGES OF DESIGN USING A DYNAMIC MODEL

I.V. Chichekin

ORCID: 0000-0001-7632-7657 e-mail: chichekin_iv@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

F.A. Nyrkov

ORCID: 0000-0003-3431-8116 e-mail: nfa18m127@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

O.I. Chudakov

ORCID: 0000-0001-8788-7123 e-mail: chudakov@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

V.S. Grigoryev

ORCID: 0000-0003-3437-9541 e-mail: wsgrig@chuvsu.ru

I.N. Ulianov Chuvash State University

Cheboksary, Russia

Abstract. The paper describes a mathematical model of the dynamics of a wheel loader to obtain loads acting on the mechanism of lifting and tipping the bucket. The developed dynamic model is universal and allows to determine the loads on all parts of the front loader, as well as to evaluate its operational properties. A list of typical load conditions is given to determine the maximum loads that may occur during operation. Examples of calculation results for different load conditions are presented, as well as the use of the obtained loads during strength calculations and topological optimization. The development of a mathematical model of a wheel loader for determining loads in hinges and power connections is an urgent task at the early stages of design for subsequent strength calculations and durability analysis. The mathematical model is developed in the system of calculation of Multi Body Dynamics (MBD).

Key words: wheel loader, multi body dynamics, virtual prototype, strength analysis, loads, load modes

FOR CITATION: I.V. Chichekin, F.A. Nyrkov, O.I. Chudakov, V.S. Grigoryev. Determination of loads on lifting and tipping mechanism of wheel loader bucket at the early stages of design using a dynamic model. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 4. Pp. 121-130. DOI: 10.46960/1816-210X_2023_4_121

Введение

Погрузка и выгрузка сыпучих грузов и полезных ископаемых в открытых карьерах, на производственных и строительных площадках производится с использованием фронтальных погрузчиков (ФП). Кроме того, ФП применяются при уборке улиц от снега в зимний период, для работы на лесозаготовке и т.п. [1-7]. Загрузка ковша, подъем и выгрузка – самые часто выполняемые операции ФП. Время выполнения одного такого цикла может не превышать 1 минуты [6], соответственно, даже в одну рабочую смену совершается не менее 480 циклов. При проектировании механизма подъема и опрокидывания ковша важно обеспечить требуемую кинематику звеньев, определить нагрузки, действующие во всех шарнирах и гидроцилиндрах. Используя аналитические способы расчета [8], можно выполнить расчеты простых нагрузочных режимов (НР), при необходимости расчета пространственного нагружения эти расчеты становятся очень трудоемкими. Для решения этих задач применяется компьютерное моделирование. В настоящее время для проектирования несущих систем, элементов ходовой части, рулевого управления и т.п., для получения нагрузок в шарнирах и силовых связях, соединяющих звенья в динамических моделях, на ранней стадии проектирования используют

имитационные модели динамики транспортных средств, разработанные в приложениях расчета динамики твердых тел [2, 9, 10]. Используемый подход позволяет автоматизировать получение нагрузки на все элементы транспортного средства в любой момент моделирования при любых положениях звеньев и любых направлениях векторов сил и моментов. Полученные нагрузки могут быть легко импортированы в приложения по проведению прочностных расчетов методом конечных элементов. Также по результатам моделирования можно оценить энергозатраты в заданном НР.

Цель работы – определение нагрузок, действующих в шарнирах и силовых связях на звенья механизма подъема и опрокидывания ковша при работе в выбранных НР. Для ее достижения разработана и представлена имитационная модель динамики ФП, а также выбраны типовые НР. Проведены расчеты в среде моделирования динамики твердых тел. Представлены примеры результатов расчета для некоторых НР. Показаны примеры использования полученных нагрузок.

Описание динамической модели фронтального погрузчика

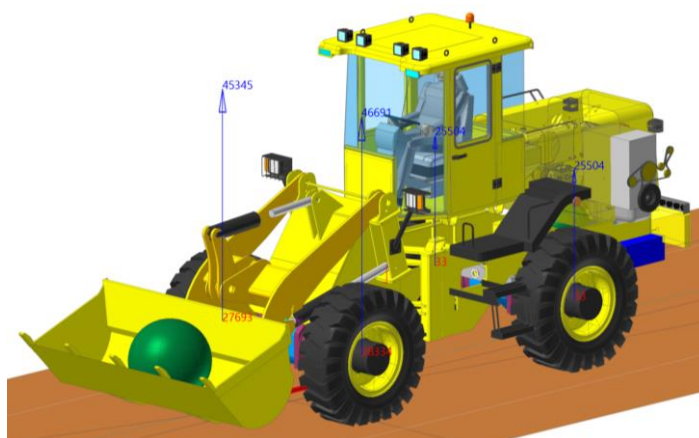


Рис. 1. Общий вид модели ФП в статическом положении при полной массе на горизонтальной ОП

Fig. 1. General view of the front loader model in a static position with full weight on a horizontal supporting surface

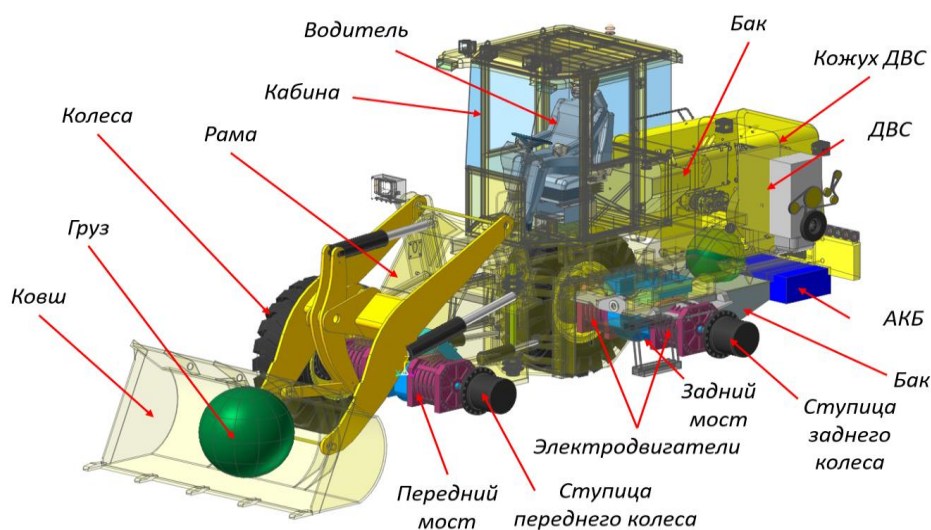


Рис. 2. Компоненты математической модели ФП

Fig. 2. Components of a mathematical model of a front loader

Общий вид динамической модели ФП, разработанной в системе расчета динамики тел, представлен на рис. 1. Модель ФП (рис. 2) включает в себя баки, ведущие мосты, ДВС, генератор, гидроцилиндры рулевого управления, груз (массой 3500 кг), ковш, задний мост, кабину, колеса, механизм подъема и опрокидывания ковша, несущую систему (две полурамы), опорную поверхность (ОП), тяговые электродвигатели (ТЭД) привода ведущих колес.

Допущения, использованные при построении модели:

- все звенья динамической системы абсолютно жесткие;
- трение в шарнирах отсутствует;
- груз смоделирован абсолютно жестким единым телом, жестко связанным с ковшом;
- деформация колес учтена в модели взаимодействия колеса с ОП, реакции на колесо от ОП приложены в центре колеса, перенесенные реакции из пятна контакта в центр колеса компенсируются крутящими моментами.

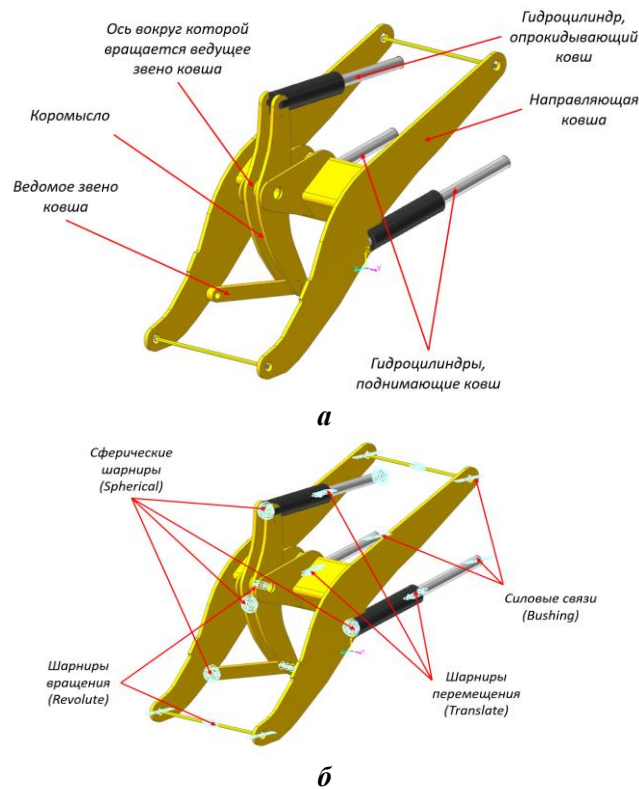


Рис. 3. Общий вид модели (а) и расположение шарниров и силовых связей в динамической модели (б) механизма подъема и опрокидывания ФП

Fig. 3. General view of the model (a) and the location of hinges and force connections in the dynamic model (b) of the mechanism for lifting and tipping a front loader

Имитационные модели, созданные в приложениях по расчету динамики твердых тел, позволяют определять нагрузки в шарнирах для последующих прочностных расчетов [11], а также нагрузки для расчета долговечности деталей [12]. Кроме того, разработанная модель позволяет оценивать эксплуатационные свойства – тягово-динамические, тормозные, топливную экономичность, оценить работу элементов и систем ФП – рулевого управления, кинематики заднего моста и т.п. Общий вид модели механизма подъема ковша со схемой размещения шарниров и силовых связей в модели ФП показан на рис. 3. Звенья механизма связаны между собой: шарнирами вращения; шаровыми шарнирами; шарнирами поступательного движения, силовыми связями типа упругая втулка из стандартной библиотеки приложения по расчету динамики связанных тел.

ОП задана поверхностью, параметры которой считываются из внешнего файла. При моделировании используется стандартная модель взаимодействия шины с ОП из библиотеки приложения по расчету динамики твердых тел [13-15]. Принята следующая нумерация зве-

ньев, шарниров и силовых соединений – элементы, относящиеся к колесным движителям, имеют индексы «11» (передний левый), «12» (передний правый), «21» (задний левый) и «22» (задний правый). Шины размерностью 17.5-25, номинальной грузоподъемностью 50000 Н. Масса одного колеса в сборе составляет 200 кг. Моделирование НР производилось на различных ОП. Общий вид основных моделей ОП, использованных при моделировании, представлен на рис. 4. Коэффициент сцепления колес с ОП задавался равным 0.6, коэффициент сопротивления качению равен 0,02.

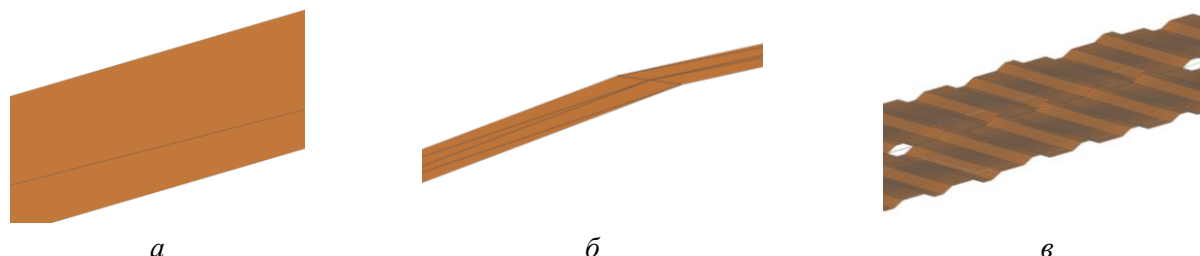


Рис. 4. Общий вид моделей ОП:

a – прямая плоская трасса; б – спуск 5 °; в – трапециевидные неровности высотой 500 мм

Fig. 4. General view of the supporting surface models:

a – straight flat route; b – descent 5 °; c – trapezoidal irregularities 500 mm high

Модель ТЭД задана в отдельном подключаемом dll-файле. В качестве исходных данных в модели двигателя используются скоростные и силовые (мощностные) параметры, а также поле КПД.

Описание расчетных случаев

В работах [1-9] представлены условия эксплуатации и параметры отдельных нагрузочных режимов. По результатам анализа составлен список расчетных случаев, для определения сил и моментов действующих в шарнирах и силовых связях механизма подъема и опрокидывания ковша (табл. 1).

Таблица 1.

Список НР для определения нагрузок в шарнирах механизма подъема и опрокидывания ковша

Table 1.

List of load modes for determining the loads in the hinges of the bucket lifting and tipping mechanism

№	Название
1.	ФП на горизонтальной ОП с грузом
2.	Определение вырывного усилия при прямом положении ФП
3.	Подъем груза 3500 кг со смещением ЦМ груза
4.	Экстренное торможение на спуске с ковшом в транспортном положении
5.	Движение ФП на косогоре
6.	Криволинейное движение с заданным радиусом и заданной скоростью
7.	Преодоление бульдозерного сопротивления на горизонтальной ОП
8.	Прямолинейное движение по случайному профилю с постоянной скоростью с возможностью отрыва колес от ОП
9.	Удар в труднопреодолимое препятствие краем ковша
10.	Внедрение краем ковша в массу материала с вывешиванием погрузчика ковшовыми гидроцилиндрами относительно передних колес
11.	Заглубление краем ковша при движении вперед и вывешивание погрузчика на режущей кромке и задних колесах
12.	Складывание на месте ФП с боковым упором ковша и вывешиванием передней оси

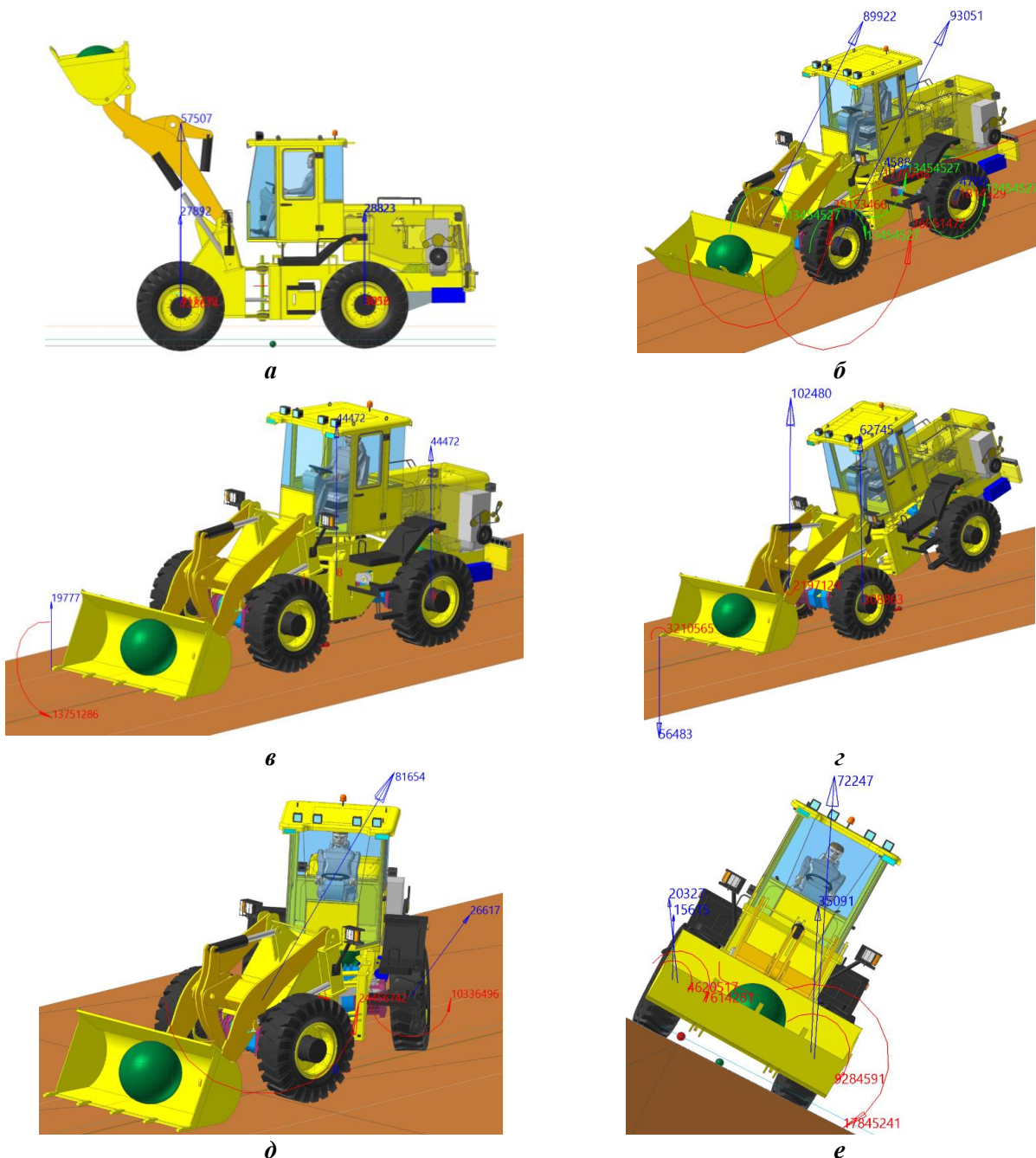


Рис. 5. Иллюстрации примеров моделирования нагрузочных режимов
а – подъем груза массой 3500 кг со смещением ЦМ груза; б – экстренное торможение на спуске с ковшом в транспортном положении; в – заглубление краем ковша при движении вперед с вывешиванием погрузчика на режущей кромке и задних колесах; г – внедрение краем ковша в массу материала с вывешиванием погрузчика ковшовыми гидроцилиндрами относительно передних колес; д – складывание на месте ФП с боковым упором ковша и вывешиванием передней оси; е – движение ФП на косогоре

Fig. 5. Illustrations of examples of load mode modeling
а – lifting a load weighing 3500 kg with a displacement of the center of mass of the load; б – emergency braking on a descent with the bucket in the transport position; в – deepening with the edge of the bucket when moving forward with the loader hanging on the cutting edge and rear wheels; г – insertion of the edge of the bucket into the mass of material with the loader suspended by bucket hydraulic cylinders relative to the front wheels; д – folding the front loader in place with the side support of the bucket and hanging the front axle; е – movement of a front loader on a slope

Описание результатов моделирования

В результате расчетов во всех нагрузочных режимах (НР) получены усилия в шарнирах и силовых связях ФП. Примеры иллюстраций по некоторым нагрузочным режимам приведены на рис. 5. В результате моделирования программный комплекс по расчету динамики связанных тел позволяет получить изменения перемещений, скоростей, ускорений, как линейных, так и угловых, нагрузок во время моделирования. Например, для нагрузочного режима «экстренное торможение на спуске с ковшем в транспортном положении» (рис. 5, б) на рис. 6 представлено изменение компонентов реакций в сферическом шарнире, связывающем коромысло и гидроцилиндр опрокидывания ковша. По графикам можно определить изменения продольных и вертикальных реакций, определить наиболее опасный режим.

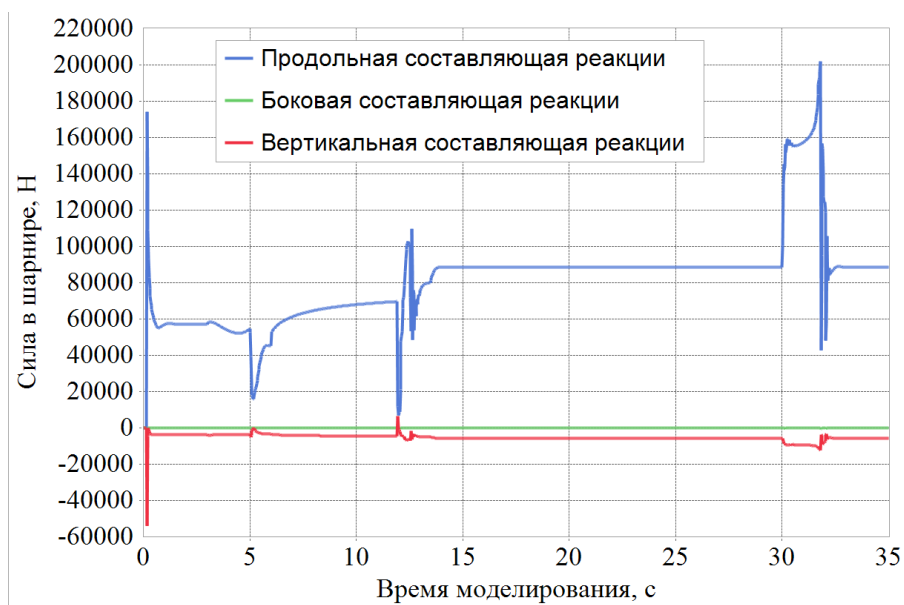


Рис. 6. Изменение компонентов реакций в сферическом шарнире, связывающем коромысло и гидроцилиндр опрокидывания ковша в НР «экстренное торможение на спуске с ковшем в транспортном положении»

Fig. 6. Changes in reaction components in the spherical joint connecting the rocker arm and the hydraulic cylinder for tipping the bucket in the load mode «emergency braking on a descent with the bucket in the transport position»

Пример определения нагрузок в шарнирах и силовых связях, действующих на звенья механизма подъема и опрокидывания ковша

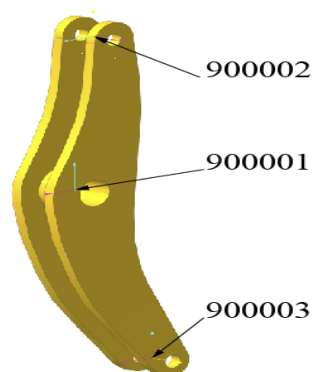


Рис. 7. Положение узлов коромысла механизма опрокидывания ковша

Fig. 7. Position of the rocker arms of the bucket tipping mechanism

В результате моделирования получены временные реализации нагрузок для всех звеньев ФП. В качестве примера приводится сводная таблица с максимальными нагрузками, действующими на коромысло механизма опрокидывания ковша (табл. 2) для всех НР. Для некоторых НР нагрузки определялись в разное время моделирования или при различных положениях звеньев ФП. На рис. 7 показано положение узлов коромысла механизма опрокидывания ковша, в которых получены нагрузки.

Таблица 2.

Пример нагрузок в шарнирах механизма подъема и опрокидывания ковша ФП

Table 2.

An example of loads in the hinges of the lifting and tipping mechanism of a front loader bucket

№ НР	№ узла	Сила в шарнире, Н			Момент в шарнире, Н*мм		
		FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
1	900001	-139669	-2	-29875	559	0	353
	900002	73466	1	24464	0	0	0
	900003	65704	0	6592	12	0	-118
2	900001	-99797	-3	8437	442	0	69
	900002	56484	1	-3178	0	0	0
	900003	44583	0	-5420	-23	0	-183
3	900001	-40155	-43	3285	6779	0	4917
	900002	23105	15	-1256	0	0	0
	900003	18317	0	-2223	-315	0	-2602
4	900001	-354489	-10	-79378	-99	0	4528
	900002	186252	-10	62756	0	0	0
	900003	166659	0	17321	-7462	0	21512
5	900001	-126334	-885	-27056	129944	0	108537
	900002	66449	302	22137	0	0	0
	900003	59432	0	5965	5547	0	-54085
6	900001	-140622	-378	-30099	55505	0	46514
	900002	73986	132	24645	0	0	0
	900003	66140	0	6632	3230	0	-25618
7	900001	-25712	-2	1623	555	0	223
	900002	13958	1	-1415	0	0	0
	900003	11752	0	1073	12	0	-112
8	900001	-156042	490	-33490	-81935	0	-61795
	900002	82028	-269	27369	0	0	0
	900003	73451	0	7369	-32703	0	119552
9	900001	-846637	2710	-16704	1843651	0	-1308238
	900002	459943	-12485	-24160	0	0	0
	900003	382511	0	40331	3747051	0	10687019
10	900001	-376281	57	-13308	-7790	0	-7002
	900002	202864	-19	1182	0	0	0
	900003	173550	0	13399	-274	0	3505
11	900001	108185	-3	3230	674	0	320
	900002	-58088	1	3414	0	0	0
	900003	-50069	0	-5364	17	0	-164
12	900001	120726	10	3356	-2326	0	-4113
	900002	-64842	-12	3890	0	0	0
	900003	-55844	0	-5967	-2442	0	2211

Полученные нагрузки импортировались в программные продукты для проведения прочностных и оптимизационных расчетов с использованием МКЭ. Примеры проведенных прочностных расчетов и полученной в результате топологической оптимизации конструкции коромысла механизма опрокидывания ковша показано на рис. 8, а и б соответственно. Если положение шарниров не менялось – возможно использование одних и тех же полученных нагрузок для проведения прочностных расчетов различных конструкций.

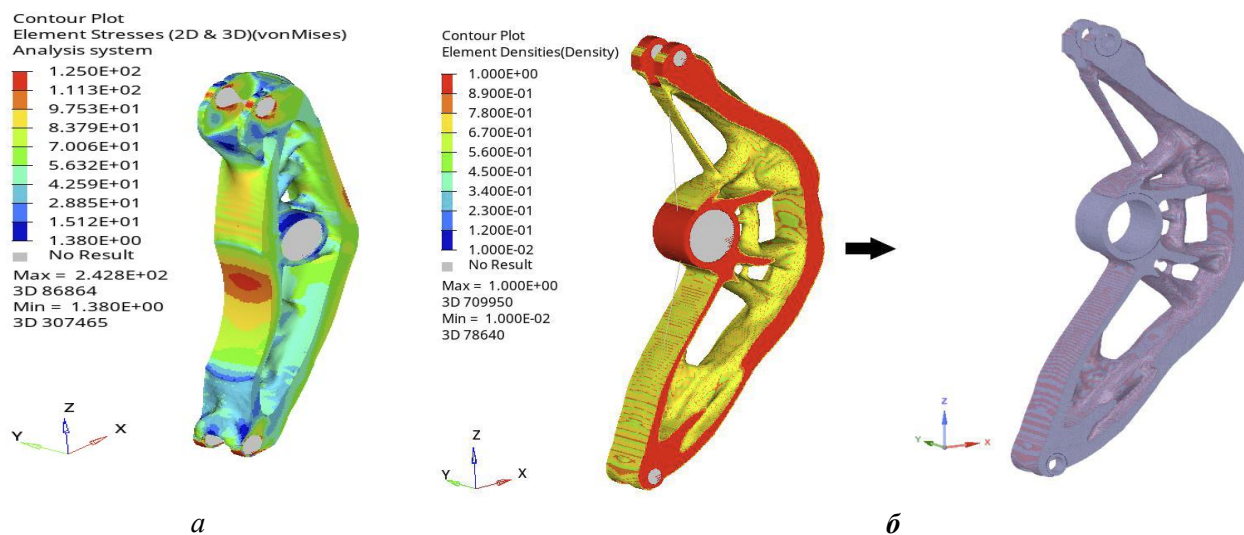


Рис. 8. Примеры использования полученных при моделировании нагрузок при проведении: а – прочностных расчетов; б – топологической оптимизации

Fig. 8. Examples of using loads obtained from modeling during: a – strength calculations; b – topological optimization

Заключение

Представлена универсальная имитационная модель динамики ФП для получения нагрузок, действующих звенья. Разработанная модель также пригодна для анализа эксплуатационных свойств. Показан список нагрузочных режимов, в которых определяются максимальные нагрузки, действующие на звенья механизма подъема и опрокидывания ковша ФП. Используя полученные нагрузки, были подобраны стандартные компоненты (гидроцилиндры и шарниры) механизма подъема и опрокидывания ковша разрабатываемого ФП и проведены прочностные и оптимизационные расчеты стрелы и коромысла с использованием МКЭ.

Исследования выполнены ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» по договору № 517-21 от 22 апреля 2021 г. при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации комплексного проекта по теме «Создание высокотехнологичного импортозамещающего производства семейства фронтальных погрузчиков с гибридным электроприводом» Соглашения № 075-11-2021-051 от 24 июня 2021 г.

Библиографический список

1. **ГОСТ 31555-2012.** Погрузчики строительные фронтальные одноковшовые. – М.: Стандартинформ, 2013. – 13 с.
2. **Чичекин, И.В.** Разработка динамической модели фронтального погрузчика для анализа эксплуатационных свойств и определения нагрузок, действующих на его элементы / И.В. Чичекин, Ф.А. Нырков, В.С. Григорьев // Известия МГТУ «МАМИ». 2022. Т. 16. № 1. С. 71-80. DOI: 10.17816/2074-0530-108869
3. **Базанов, А.Ф.** Самоходные погрузчики / А.Ф. Базанов, Г.В. Забегалов. 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1979. – 406 с.

4. **Боровков, Ю.А.** Основы горного дела: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Ю.А. Боровков, В.П. Дробаденко, Д.Н. Ребриков. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 432 с.
5. **Gottschalk, M.** Test Method for Evaluating the Energy Efficiency of Wheel Loaders / M. Gottschalk, G. Jacobs, A. Kramer // ATZ offhighw worldw. 2018. VI. 11. P. 44-49. Doi: 10.1007/s41321-018-0008-0.
6. **Чудаков, О.И.** Анализ условий эксплуатации фронтальных погрузчиков и синтез расчетных нагрузочных режимов // ИНТЕРСТРОЙМЕХ-2022: материалы XXVI Международной научно-технической конференции, 12-14 октября 2022 г. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2022. С. 143-151.
7. **Özdoğan, M.** Wheel Loader Buckets & Digging Forces, September 2019 / M. Özdoğan, H. Özdoğan. Electronic resource, URL: <https://www.researchgate.net/publication/335618855> (дата обращения 13.01.2022).
8. **Бояркина, И.В.** Технологическая механика одноковшовых фронтальных погрузчиков: монография / И.В. Бояркина. – Омск: СибАДИ, 2011. – 336 с.
9. **Li, X.** Research on dynamic behaviors of wheel loaders with different layout of hydropneumatic suspension / X. Li, W. Lv, W. Zhang, H. Zhao. // JVE International LTD. Journal of Vibroengineering. Nov 2017, Vol. 19, Issue 7.
10. **Gorelov, V.A.** Mathematical Model of the Straight-line Rolling Tire-Rigid Terrain Irregularities Interaction / V.A. Gorelov, A.I. Komissarov // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 1322-1328.
11. **Vdovin, D.** Loads and Stress Analysis Cycle Automation in the Automotive Suspension Development Process / D. Vdovin, I. Chichekin // Procedia Engineering. 2016. Т. 150. С. 1276-1279.
12. **Вдовин, Д.С.** Прогнозирование усталостной долговечности элементов подвески полуприцепа на ранних стадиях проектирования / Д.С. Вдовин, И.В. Чичекин, Я.Ю. Левенков // Труды НАМИ. 2019. № 2 (277). С. 14-23.
13. **Расејка, Н.В.** Tyre and Vehicle Dynamics. – Oxford, Butterworth Heinemann, 2006. 672 p.
14. **Расејка, Н.В.** Magic Formula Tyre Model with Transient Properties / Н.В. Расејка, I.Y. Besselink // Supplement to Vehicle System Dynamics. 1997. Vol. 27. P. 234-249.
15. TNO Automotive: MF-Tool 6.1 User Manual. – Netherlands, 2008.

*Дата поступления
в редакцию: 14.04.2023*

*Дата принятия
к публикации: 31.10.2023*

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Багиров Мираббас Бахтиярович – руководитель регионального научно-образовательного центра «НЕЙМАРК. Школа хакатонщиков» НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Вернигор Ирина Сергеевна – сотрудник Российского Федерального Ядерного Центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики

Логанов Сергей Викторович – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Пальгуев Дмитрий Анатольевич – доцент Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, канд. техн. наук

Свеженцев Андрей Геннадьевич – сотрудник Российского Федерального Ядерного Центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики

Седаков Денис Владимирович – заместитель директора филиала Российского Федерального Ядерного Центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики

Соколова Элеонора Станиславовна – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук

Старостин Николай Владимирович – руководитель Передовой инженерной школы Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, д-р техн. наук, профессор

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Аксенова Анна Евгеньевна – старший научный сотрудник Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, канд. физ.-мат. наук

Аркадов Геннадий Викторович – президент Некоммерческого партнерства содействия развитию системной инженерии «Райз», канд. техн. наук

Бокова Татьяна Александровна – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Волков Никита Сергеевич – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Зырянова Татьяна Константиновна – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Курдюмов Александр Сергеевич – младший научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Лобанов Павел Дмитриевич – старший научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, д-р техн. наук

Маров Александр Романович – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Мелузов Александр Георгиевич – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук

Павелко Владимир Ильич – заместитель директора Акционерного общества «Научно-технический центр «Диапром», канд. техн. наук

Первичко Валерий Алексеевич – старший научный сотрудник Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН

Прибатурин Николай Алексеевич – главный научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, д-р техн. наук, член-корреспондент РАН

Светонос Александр Игоревич – инженер Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Слепов Михаил Тимофеевич – начальник отдела филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС», канд. техн. наук

Чинак Александр Владимирович – научный сотрудник Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Чуданов Владимир Васильевич – ведущий научный сотрудник Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, канд. физ.-мат. наук

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Ван Ичжоу – аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Григорьев Владимир Станиславович – руководитель Чебоксарского инжинирингового центра транспортного и сельскохозяйственного машиностроения Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова

Зыбкин Андрей Вячеславович – доцент Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, канд. техн. наук

Зузов Валерий Николаевич – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Косицын Борис Борисович – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Масленников Никита Александрович – заведующий кафедрой Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, канд. техн. наук, доцент

Назаренко Сергей Владимирович – главный конструктор инновационных автомобилей ПАО «КАМАЗ»

Нырков Филипп Алексеевич – студент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Падалкин Борис Васильевич – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Репин Сергей Васильевич – профессор Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, д-р техн. наук

Стадухин Антон Алексеевич – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, д-р техн. наук

Чичекин Илья Викторович – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

Чудаков Олег Игоревич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, канд. техн. наук

4-7 июня 2024 г.

на базе Академии наук Республики Татарстан (АН РТ),
Казанского государственного института культуры (КазГИК),
Казанского национального исследовательского технического университета
им. А.Н. Туполева – КАИ; Казанского национального исследовательского
технологического университета – КНИТУ (Казань, Россия) состоится

**Международная научная мультиконференция:
XXXVII Международная научная конференция
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ – ММТТ-37
(РИНЦ, DOI, Crossref)**

Секции конференции

1. Качественные и численные методы исследования дифференциальных и интегральных уравнений.
2. Оптимизация, автоматизация и оптимальное управление технологическими процессами.
3. Математическое моделирование технологических и социальных процессов.
4. Математическое моделирование и оптимизация в задачах САПР, аддитивных технологий, цифрового производства.
5. Математические методы в задачах радиотехники, радиоэлектроники и телекоммуникаций, геоинформатики, авионики и космонавтики.
6. Математические методы и интеллектуальные системы в робототехнике и мехатронике
7. Математические методы в медицине, биотехнологии и экологии.
8. Математические методы в экономике и гуманитарных науках.
9. Информационные и интеллектуальные технологии в технике и образовании.
10. Математические и инструментальные методы технологий Индустрии 4.0
11. Обсуждение квалификационных работ.

**Киберфизические системы: проектирование и моделирование»
«Cyber-physical systems design and modelling» (CyberPhy-2024)
(Springer, Scopus)**

Секции

1. Проектирование киберфизических систем (Design of Cyber-physical systems).
2. Моделирование киберфизических систем и цифровых двойников Cyber-physical systems and Digital Twins).
3. Интеллектуальное управление киберфизическими системами (Intelligent Control of Cyber-physical systems).
4. Интернет вещей для промышленных киберфизических систем (IoT for Industrial Cyber-physical systems).
5. Промышленная кибербезопасность (Industrial Cybersecurity).
6. Инженерное образование для разработки киберфизических систем (Engineering education for Cyber-physical systems development).
7. Общество 5.0: киберпространство для развитого общества, ориентированного на человека (Society 5.0: Cyberspace for advanced human-centered society).

Подача заявок на участие с 1 декабря 2023 г.

Подробная информация о конференции и условиях участия: <http://mmtt.sstu.ru/>

ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ «ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

*Адрес редакции: 603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
ауд. 1363-3
e-mail: rsl@nntu.ru*

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляются два печатных экземпляра статьи и комплекты сопроводительной документации: бумажный и электронный.
- Рекомендуемый объем статьи не превышает 15 страниц текста. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 7; **минимальный объем статьи – 0,5 п.л.**
- **Статью необходимо сопроводить** актом и протоколом экспортного контроля, экспертным заключением о возможности открытого опубликования, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию.
- **Печатные экземпляры** статей должны быть подписаны всеми авторами.
- **Первая страница** статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в порядке, отражающем их авторский вклад); аннотацию, ключевые слова.
- **Аннотация** (120-150 слов) отражает перечисление результатов и ключевых выводов, обозначение новизны и сферы применения.
- **Ключевые слова** (не менее 10) отражают тематическую направленность, объект и результаты исследования.
- Изложение материала должно быть логически выстроенным. **Тематика** представленного исследования должна **строго соответствовать рубрике журнала и паспорту специальности ВАК**. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), **библиографический список, содержащий только цитируемые или рассматриваемые в тексте работы**. Ссылки нумеруются в порядке цитирования. **Самоцитирование** рекомендуется **ограничить тремя пунктами**. Рекомендуется использовать в библиографическом списке ссылки на научные работы по теме исследования, индексируемые в международных базах научного цитирования. Библиографический список не должен включать неопубликованные работы.
- К статье необходимо **приложить файл с информацией об авторах** на русском языке: ФИО (полностью), должность, место работы (полное название организации, город, страна), идентификатор ORCID, e-mail, ученая степень и звание.
- Текст набирается через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое, верхнее и нижнее – 20 мм. Переносы не допускаются. Используется формат *Word for Windows* и стандартные шрифты *Times New Roman* и *Symbol*.
- Формульные выражения выполняются строго в редакторе MS Equation 3-12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается. Использованию аббревиатур должна предшествовать их расшифровка.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы: (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel. Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображения выполняются в формате jpg или tif с разрешением 300 dpi. Рисунки выполняются по ГОСТ, 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**](mailto:hranilov@nntu.ru)

**2.4.9 – Ядерные энергетические установки, топливный цикл,
радиационная безопасность**

Максим Александрович Легчанов: [**legchanov@nntu.ru**](mailto:legchanov@nntu.ru)

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

Владимир Сергеевич Макаров: [**vladimir.makarov@nntu.ru**](mailto:vladimir.makarov@nntu.ru)

16+

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 4 (143)

Ответственный редактор: **В.И. Казакова**

Редакция:

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

rsl@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать: 07.12.2023 Дата выхода в свет 12.12.2023. Формат 60x84 ¹/₈.

Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 8,50. Тираж 300 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.

Типография НГТУ.

Адрес университета и типографии:

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24